

เทคนิคการกรองช่องสัญญาณที่ใช้โหนดหลายอันสำหรับโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง
ในระบบสื่อสารไร้สายความเร็วสูง



นายฉวีพงศ์ สุริยา

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

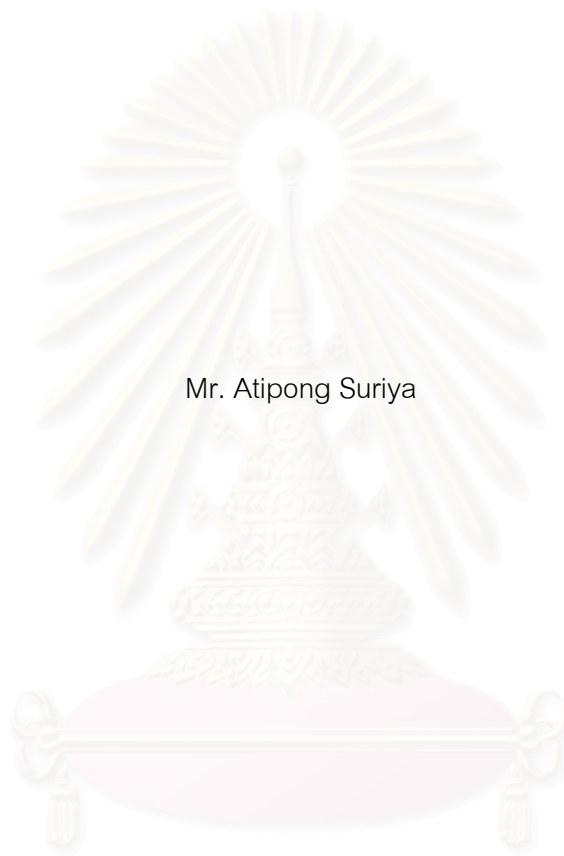
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-5909-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MULTI-TOKEN CHANNEL RESERVATION TECHNIQUES FOR MEDIA ACCESS CONTROL
PROTOCOL IN HIGH SPEED WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS



Mr. Atipong Suriya

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
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 2004

ISBN 974-17-5909-6

อธิพงศ์ สุริยา : เทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นหลายอันสำหรับโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสารไร้สายความเร็วสูง. (MULTI-TOKEN CHANNEL RESERVATION TECHNIQUES FOR MEDIA ACCESS CONTROL PROTOCOL IN HIGH SPEED WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS) อ.ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ, 126 หน้า. ISBN 974-17-5909-6.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทำการศึกษาปัญหาการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นหลายอันสำหรับโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสารไร้สายความเร็วสูง เทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอมี 4 เทคนิค คือ MT-CFP, MT-UNI, MT-UNI+LAU และ MT-UNI+LAT หลักการพื้นฐานที่สำคัญซึ่งนำมาใช้ในการพัฒนาเทคนิคที่เสนอประกอบด้วย การใช้ค่าความน่าจะเป็นในการจองแบบค่าคงที่ การเลือกสล็อตการจองอย่างสุ่ม และการจำกัดจำนวน เทคนิคทั้งหมดที่เสนอได้รับการออกแบบให้เหมาะสมโดยเฉพาะสำหรับระบบที่เวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบ (Round-Trip Propagation Delay) ยาวกว่าเวลาประวิงการส่งสัญญาณ (Transmission Delay) สมรรถนะของเทคนิคแต่ละเทคนิคที่เสนอถูกประเมินในรูปของจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง ภายใต้ข้อกำหนดของระบบที่แตกต่างกันหลากหลายลักษณะ โดยการปรับเปลี่ยนจำนวนผู้ใช้บริการ จำนวนสล็อตการจอง และจำนวนโทเค็นการจอง

การประเมินสมรรถนะของระบบอาศัยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เป็นหลัก ชุดสมการที่ได้พัฒนาขึ้นสามารถให้ผลลัพธ์เป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับระบบ พร้อมทั้งนำเสนอแนวการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และสูตรการประมาณจำนวนโทเค็นที่เหมาะสมในระบบต่าง ๆ ซึ่งถือได้ว่าเป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญอย่างมากต่อสมรรถนะของเทคนิคที่ใช้โทเค็นหลายอัน ผลการวิเคราะห์สมรรถนะของเทคนิคการจองที่นำเสนอได้นำไปเปรียบเทียบกับเทคนิคดั้งเดิมซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้โทเค็นเพียง 1 อัน ได้แก่ CFP, UNI และ UNI+LA พบว่าเทคนิคที่ถูกพัฒนาขึ้นทั้งหมดมีสมรรถนะเหนือกว่าเทคนิคที่มีอยู่เดิมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในสภาวะที่โหลดของระบบมีค่าน้อยถึงปานกลาง

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
 ปีการศึกษา 2547

4470633221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: Multi-Token / Channel Reservation / MAC Protocol / Wireless Communications

ATIPONG SURIYA : MULTI-TOKEN CHANNEL RESERVATION TECHNIQUES FOR MEDIA ACCESS CONTROL PROTOCOL IN HIGH SPEED WIRELESS COMMUNICATION SYSTEMS. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ. Ph.D., 126 pp. ISBN 974-17-5909-6.

This thesis investigates the problem of multi-token channel reservation for media access control protocols in high speed wireless communication systems. Four distinct channel reservation techniques are proposed, namely MT-CFP, MT-UNI, MT-UNI+LAU and MT-UNI+LAT. The key basic methodology applied in developing these techniques includes the use of fixed request probability, uniform and limited access. All techniques 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 technique is evaluated in terms of the average number of successful users under various different system configurations by varying the number of users, the number of request slots and the number of tokens.

The mathematical analysis is extensively used for evaluating the system performance. Mathematical formulations for all techniques are derived in detail to determine the appropriate system parameters so that optimal performance can be achieved. Moreover, the formulas for estimating the appropriate number of tokens under any system load conditions are shown in this thesis. Numerical results of all introduced techniques are presented in comparison to that of single-token channel reservation techniques, namely the CFP, UNI and UNI+LA algorithms. The results show that all developed techniques are superior to the existing techniques, especially for systems with light to medium loads.

Department.....Electrical Engineering..... Student's signature.....

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

Academic year 2004

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สามารสำเร็จลุล่วงไปได้หากขาดความช่วยเหลือ และแนะนำจากผู้เกี่ยวข้องทั้งหลาย

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ลัญฉกร วุฒิสัทติกุลกิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ในการวิจัยอย่างใกล้ชิด นอกจากนี้ท่านยังได้ให้การสนับสนุนเงินบางส่วนในการไปนำเสนอบทความทางวิชาการ ขอขอบคุณรุ่นพี่ รุ่นน้อง และเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าสื่อสารทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำและกำลังใจที่ดีเสมอมา และคุณวรากร ศรีเชวงทรัพย์ ผู้ซึ่งให้ความช่วยเหลือและคำแนะนำที่ดีตลอดมา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและทุกคนในครอบครัวของข้าพเจ้า ซึ่งให้การสนับสนุนด้านการศึกษา รวมถึงกำลังใจและความเข้าใจที่มีให้ข้าพเจ้าเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฏ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	4
1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	4
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	6
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	6
1.6เค้าโครงวิทยานิพนธ์.....	6
2 ความรู้พื้นฐาน.....	8
2.1 โพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง.....	8
2.1.1 โพรโทคอลที่ไม่มีการแข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ (Contention-Free MAC Protocol)	9
2.1.2 โพรโทคอลที่มีการแข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ (Contention-Based MAC Protocol).....	10
2.1.3 โพรโทคอลแบบผสมเทคนิคการแข่งขันและไม่แข่งขันในการเข้า ใช้ช่องสัญญาณ (Contention-Free and Contention-Based MAC Protocol)	11
2.2 พื้นฐานการจองช่องสัญญาณ.....	12
2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดสมรรถนะของโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึง ตัวกลางในระบบสื่อสารไร้สาย.....	13
2.4 เทคนิคการกำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่นำเสนอในอดีต	15

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	2.4.1	15
	2.4.2	16
	2.5	17
	2.6	19
	2.7	20
	2.8	21
3	เทคนิคการจองช่องสัญญาณ.....	22
	3.1	23
	3.1.1	23
	3.1.2	24
	3.1.2.1	24
	3.1.2.1.1	25
	3.1.2.1.2	27
	3.1.2.1.3	30
	3.1.2.1.4	32
	3.1.2.2	35
	3.1.2.2.1	37
	3.1.2.2.2	40

3.1.2.2.3	ระบบที่มีผู้ใช้บริการ M คน สล็อตการ ของ N สล็อต และโทเค็นการของ T อัน.	44
3.2	เทคนิคการเลือกสล็อตการของอย่างสม่ำเสมอ (Multi-Token Uniform : MT- UNI).....	46
3.2.1	หลักการดำเนินงานของเทคนิค MT-UNI.....	46
3.2.2	แนวทางการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิค MT- UNI.....	47
3.2.2.1	ระบบที่มีผู้ใช้บริการ M คน สล็อตการของ N สล็อต และโทเค็นการของ 1 อัน.....	47
3.2.2.2	ระบบที่มีผู้ใช้บริการ M คน สล็อตการของ N สล็อต และโทเค็นการของ T อัน.....	49
3.3	เทคนิคการจำกัดจำนวน (Multi-Token Uniform with Limited Access : MT-UNI+LA).....	54
3.3.1	หลักการดำเนินงานของเทคนิคการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ.....	54
3.3.2	แนวการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิคการจำกัดจำนวน ผู้ใช้บริการ.....	55
3.3.3	หลักการดำเนินงานของเทคนิคการจำกัดจำนวนโทเค็นการของ	56
3.3.4	แนวการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิคการจำกัดจำนวน โทเค็นการของ.....	57
4	ผลทดสอบและการวิเคราะห์.....	61
4.1	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิคการของช่องสัญญาณแบบ MT- CFP.....	62
4.1.1	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิค CFP.....	62
4.1.2	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิค MT-CFP.....	67
4.2	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิคการของช่องสัญญาณแบบ MT- UNI.....	83
4.2.1	ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิค UNI.....	83

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.2.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิค MT-UNI.....	84
4.3 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิคการจ้องช่องสัญญาณแบบ MT-UNI+LA.....	91
4.3.1 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิค UNI+LA.....	91
4.3.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิค MT-UNI+LAU.....	94
4.3.3 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิค MT-UNI+LAT.....	96
4.3.4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบเทคนิค MT-UNI+LAU และ MT-UNI+LAT.....	98
4.4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบเทคนิคการจ้องช่องสัญญาณที่นำเสนอ.....	99
5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	101
5.1 บทสรุป.....	101
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	104
รายการอ้างอิง.....	106
ภาคผนวก.....	108
บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่.....	109
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	126

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
ตารางที่ 3.1	ความน่าจะเป็นในการเกิดของแต่ละเหตุการณ์ และจำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจอง สำหรับเทคนิคการจำกัดจำนวนโทเค็นการจอง.....	58
ตารางที่ 4.1	จำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสมสำหรับเทคนิคการจองแบบ MT-CFP เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 1-16 คนและจำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต.....	70
ตารางที่ 4.2	จำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสมสำหรับเทคนิคการจองแบบ MT-UNI เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 1-16 คน และจำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต.....	86



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงข่ายของระบบการสื่อสารไร้สาย.....	1
รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารไร้สายในพื้นที่ให้บริการหนึ่ง.....	9
รูปที่ 2.2 การทำงานของโพรโทคอลที่ไม่มีการแข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ TDMA.....	10
รูปที่ 2.3 การทำงานของโพรโทคอลที่มีการแข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ Slotted ALOHA.....	11
รูปที่ 2.4 โครงสร้างเฟรมของโพรโทคอล ALOHA Reservation.....	12
รูปที่ 2.5 ผลการจองช่องสัญญาณของโพรโทคอล ALOHA Reservation.....	13
รูปที่ 2.6 โครงสร้างเฟรมและการทำงานเมื่อเวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบมีค่าน้อย.....	17
รูปที่ 2.7 โครงสร้างเฟรมและการทำงานเมื่อเวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบมีค่ามาก.....	18
รูปที่ 3.1 กลไกการทำงานของเทคนิคการจองแบบ Multi-Token Cascade Fixed Probability (MT-CFP).....	24
รูปที่ 3.2 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีผู้ใช้บริการ 2 คน และจำนวนสล็อตการจอง 2 สล็อต..	26
รูปที่ 3.3 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีผู้ใช้บริการ 2 คน และจำนวนสล็อตการจอง 3 สล็อต..	28
รูปที่ 3.4 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีผู้ใช้บริการ 3 คน และจำนวนสล็อตการจอง 2 สล็อต..	30
รูปที่ 3.5 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 2 สล็อต และจำนวนโทเค็นการจอง 2 อัน.....	38
รูปที่ 3.6 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 3 สล็อต และจำนวนโทเค็นการจอง 2 อัน.....	40
รูปที่ 3.7 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณ เมื่อระบบมีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 2-3 สล็อต และโทเค็นการจอง 1-2 อัน	43
รูปที่ 3.8 กลไกการทำงานของเทคนิคการจองแบบ Multi-Token Uniform (MT-UNI)....	47
รูปที่ 3.9 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 3 สล็อต และโทเค็นการจอง 2 อัน.....	50
รูปที่ 3.10 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบที่มีผู้ใช้บริการ M คน สล็อตการจอง N สล็อต และ โทเค็นการจอง T อัน.....	52

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ฐ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.11 กลไกการทำงานของเทคนิคการจองแบบ MT-UNI+LAU.....	54
รูปที่ 3.12 กลไกการทำงานของเทคนิคการจองแบบ MT-UNI+LAT.....	56
รูปที่ 3.13 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดของกรณี (1,2,1,3) สำหรับเทคนิคการจำกัดจำนวน โทเค็นการจอง ในระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 3 สล็อต และ โทเค็นการจอง 2 อัน.....	58
รูปที่ 4.1 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองและค่าความน่าจะเป็น ในการส่งโทเค็นการจอง เมื่อกำหนดจำนวนผู้ใช้บริการ 1 2 4 8 16 คน.....	65
รูปที่ 4.2 จำนวนสล็อตการจองและค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอง ที่ทำให้ ค่าสมรรถนะของระบบสูงสุด เมื่อกำหนดจำนวนผู้ใช้บริการ 1 2 4 8 16 คน.....	65
รูปที่ 4.3 จำนวนผู้ใช้บริการและค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอง ที่ทำให้ค่า สมรรถนะของระบบสูงสุด เมื่อกำหนดจำนวนสล็อตการจอง 1 2 4 8 16 สล็อต	66
รูปที่ 4.4 จำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการ จองของระบบเมื่อกำหนดจำนวนสล็อตการจองเป็น 1 2 4 8 และ 16 สล็อต...	66
รูปที่ 4.5 จำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจองและความน่าจะเป็นในการ เข้าจองเมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 1 2 4 8 และ 16 คน และจำนวนสล็อตการจอง 16 สล็อต.....	74
รูปที่ 4.6 ความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการเข้าจองและจำนวนโทเค็นการจองเมื่อ จำนวนผู้ใช้บริการ 1 2 4 8 และ 16 คน และจำนวนสล็อตการจอง 16 สล็อต...	75
รูปที่ 4.7 จำนวนของการว่าง การสำเร็จ และการชนกันที่สล็อตการจองต่าง ๆ เมื่อ จำนวนผู้ใช้บริการ 16 คน จำนวนโทเค็น 8 อัน และค่าความน่าจะเป็นในการ เข้าจองเท่ากับ 0.44.....	76
รูปที่ 4.8 จำนวนของการว่าง การสำเร็จ และการชนกันที่สล็อตการจองต่าง ๆ เมื่อ จำนวนผู้ใช้บริการ 16 คน จำนวนโทเค็น 8 อัน และค่าความน่าจะเป็นในการ เข้าจองเท่ากับ 0.72.....	78
รูปที่ 4.9 จำนวนของการว่าง การสำเร็จ และการชนกันที่สล็อตการจองต่าง ๆ เมื่อ จำนวนผู้ใช้บริการ 16 คน จำนวนโทเค็น 8 อัน และใช้ค่าความน่าจะเป็นที่ เหมาะสมในการเข้าจอง $p=0.06$	79

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.10 จำนวนครั้งที่ประสบความสำเร็จในการจองของผู้ใช้บริการรายต่าง ๆ เมื่อจำนวนผู้ให้บริการ 16 คน จำนวนโทเค็น 8 อัน และค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจอง $p=0.06$	80
รูปที่ 4.11 จำนวนโทเค็นการจองและเปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้ให้บริการเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อจำนวนผู้ให้บริการ 1 2 4 8 และ 16 คน และจำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต.....	80
รูปที่ 4.12 จำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสม โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสูตรการประมาณและค่าที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เมื่อจำนวนสล๊อตการจอง 4 8 11 24 และ 32 สล๊อต.....	82
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองของเทคนิค CFP และ MT-CFP เมื่อมีจำนวนผู้ให้บริการ 1 ถึง 16 คน และสล๊อตการจอง 16 สล๊อต.....	82
รูปที่ 4.14 จำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองและจำนวนผู้ให้บริการเมื่อใช้เทคนิค UNI และจำนวนสล๊อตการจอง 1 2 4 8 16 สล๊อต.....	84
รูปที่ 4.15 จำนวนผู้ให้บริการเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองและจำนวนผู้ให้บริการเมื่อจำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต และจำนวนของโทเค็น 1 2 4 8 16 อัน.....	88
รูปที่ 4.16 จำนวนครั้งที่ประสบความสำเร็จในการจองของผู้ใช้บริการรายต่าง ๆ เมื่อจำนวนผู้ให้บริการ 8 คน จำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต และจำนวนโทเค็นการจอง 2 อัน.....	88
รูปที่ 4.17 จำนวนโทเค็นการจองและเปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้ให้บริการเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อจำนวนผู้ให้บริการ 2 4 8 และ 16 คน และจำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต.....	89
รูปที่ 4.18 จำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสม โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสูตรการประมาณและค่าที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เมื่อจำนวนสล๊อตการจอง 4 8 11 24 และ 32 สล๊อต.....	90
รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองของเทคนิค UNI และ MT-UNI เมื่อมีจำนวนผู้ให้บริการ 1 ถึง 16 คน และสล๊อตการจอง 16 สล๊อต.....	90

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ผ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.20 จำนวนผู้ใช้บริการและค่าโอกาสในการเข้าของช่องสัญญาณที่ทำให้สมรรถนะของระบบสูงสุด เมื่อเมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 32 คน และสลีตการจอง 2 4 8 และ 16 สลีสิต.....	93
รูปที่ 4.21 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของเทคนิค UNI+LA เปรียบเทียบกับเทคนิค UNI เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 32 คน และสลีตการจอง 2 4 8 16 สลีสิต.....	93
รูปที่ 4.22 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของเทคนิค UNI+LA เปรียบเทียบกับเทคนิค UNI เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 32 คน และสลีตการจอง 16 สลีสิต.....	94
รูปที่ 4.23 จำนวนผู้ใช้บริการและค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ เมื่อจำนวนโทเค้นการจอง 1 2 4 และ 8 อัน และสลีตการจอง 16 สลีสิต.....	95
รูปที่ 4.24 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของเทคนิค MT-UNI+LAU เปรียบเทียบกับเทคนิค MT-UNI เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 16 คน และสลีตการจอง 16 สลีสิต.....	96
รูปที่ 4.25 จำนวนผู้ใช้บริการและค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนโทเค้นการจองเมื่อจำนวนโทเค้นการจอง 1 2 4 8 และ 16 อัน และสลีตการจอง 16 สลีสิต.....	97
รูปที่ 4.26 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของเทคนิค MT-UNI+LAT เปรียบเทียบกับเทคนิค MT-UNI เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 16 คน และสลีตการจอง 16 สลีสิต.....	98
รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบเทคนิค MT-UNI+LAU และเทคนิค MT-UNI+LAT เมื่อพิจารณาที่จำนวนโทเค้นการจองเท่ากัน.....	99
รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอและเทคนิคที่เคยมีผู้นำเสนอไว้.....	100

บทที่ 1

บทนำ

บทนำนี้จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่ได้รับ และเค้าโครงวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

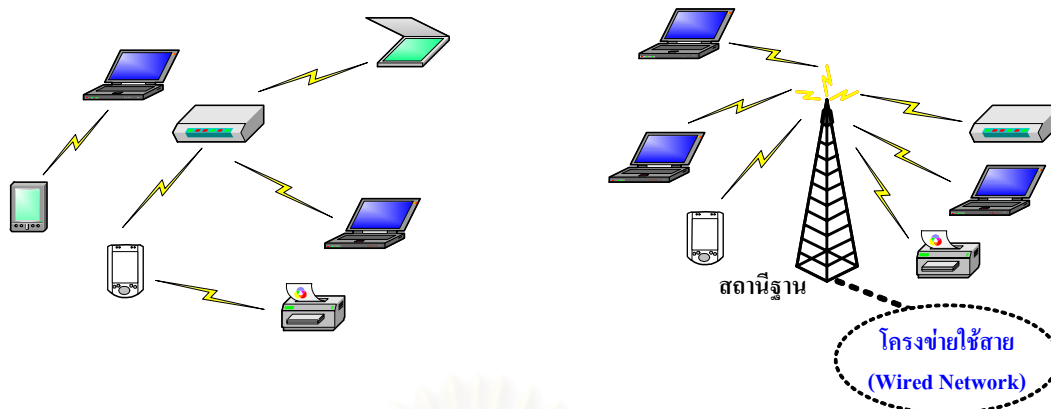
ในปัจจุบันนี้ โลกได้เปลี่ยนแปลงเข้าสู่ยุคโลกาภิวัตน์ ซึ่งเป็นยุคแห่งข้อมูลข่าวสาร การติดต่อสื่อสารได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการเชื่อมต่อและแลกเปลี่ยนข้อมูลข่าวสารบนโลกใบนี้ ดังที่มีคำกล่าวไว้ว่าโลกสื่อสารไร้พรมแดน ระบบสื่อสารซึ่งได้รับความนิยมเป็นอย่างมากคือระบบสื่อสารไร้สาย ดังจะเห็นได้จากจำนวนผู้ใช้บริการที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทั้งนี้เนื่องจากประโยชน์ และความสะดวกที่ผู้ใช้บริการได้รับ ทั้งยังมีความยืดหยุ่น มีความสามารถในการจัดการกับบริการข้อมูลมัลติมีเดีย (Multimedia) และประยุกต์ใช้งานแบบเวลาจริง (Real Time Applications)

การจัดการทรัพยากรและผู้ใช้บริการในระบบสื่อสารไร้สาย มีความแตกต่างกันไปตามลักษณะโครงข่ายที่พิจารณา ซึ่งโครงข่ายของระบบสื่อสารไร้สาย แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ [1] คือ

1. โครงข่ายไร้สายแบบกระจาย (Distributed Wireless Networks) หรือ Ad Hoc Networks ผู้ใช้บริการในระบบใช้สัญญาณความถี่วิทยุ (Radio Frequency) หรือสัญญาณอินฟราเรด (Infrared) ติดต่อกัน และมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกันในลักษณะการกระจายมีการทำงานในโหมด Time Division Duplex (TDD) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ก.

2. โครงข่ายไร้สายแบบควบคุมจากศูนย์กลาง (Centralized Wireless Networks) หรือ Last Hop Networks ประกอบไปด้วยสถานีฐานคอยควบคุมจัดการและจัดสรรการให้บริการแก่ผู้ใช้บริการปลายทาง โครงข่ายลักษณะนี้สามารถทำงานได้ทั้งในโหมด Time Division Duplex (TDD) และโหมด Frequency Division Duplex (FDD) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ข.

สิ่งที่ถือเป็นหัวใจสำคัญในระบบการสื่อสารไร้สาย คือ ทำอย่างไรเพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์จากปริมาณแบนด์วิดท์ที่มีอยู่อย่างจำกัดได้คุ้มค่าและสามารถให้บริการกับผู้ใช้ตามคุณภาพของการบริการที่ต้องการ ซึ่งแนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวคือ การสรรหาโปรโตคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางที่มีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับบริการที่ระบบรองรับได้



1.1 ก. โครงข่ายไร้สายแบบกระจาย

1.1 ข. โครงข่ายไร้สายแบบควบคุมจากศูนย์กลาง

รูปที่ 1.1 โครงข่ายของระบบการสื่อสารไร้สาย

โพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสารไร้สายได้เริ่มมีการศึกษาและพัฒนาในช่วงปีคริสต์ศักราช 1970 เป็นต้นมา หลังจากที่ Norman Abramson ได้ค้นพบโพรโทคอล ALOHA ซึ่งโพรโทคอลในยุคแรกๆ จะนำมาประยุกต์ใช้กับการสื่อสารข้อมูลและดาวเทียม (Data and Satellite Communications) หลังจากนั้นเป็นต้นมา ระบบสื่อสารไร้สายได้มีการพัฒนาขึ้นมาเป็นลำดับพร้อมกับปัญหา และความท้าทายในการคิดค้นพัฒนาโพรโทคอลนำมาใช้จัดการกับระบบสื่อสารไร้สาย เพื่อให้เกิดสมรรถนะของระบบสูงสุด

จากความสำคัญของโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางจึงมีผู้ให้ความสนใจในการพัฒนางานด้านนี้ตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน ในช่วงเริ่มต้นนั้นโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางที่มีการนำเสนอจะอาศัยพื้นฐานการจัดสรรแบนด์วิดท์แบบที่ไม่มีการแข่งขันกันของผู้ใช้บริการ [2-3,20] เช่น TDMA, FDMA หรือแบบที่มีการแข่งขันกันของผู้ใช้บริการ [2-3,20] เช่น Pure ALOHA , Slotted ALOHA เป็นต้น

โดยทั่วไปเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้จะอาศัยการทำงานของเทคนิค Slotted ALOHA เพราะเป็นเทคนิคที่ง่ายและมีความยืดหยุ่นสูง อย่างไรก็ตามการทำงานของเทคนิค Slotted Aloha จะเกิดปัญหาถ้าหากขณะเวลาหนึ่ง ๆ มีผู้ใช้บริการจำนวนมากเข้าทำการจองช่องสัญญาณพร้อมกัน จึงมีการพัฒนาให้เกิดการจัดการที่ง่ายขึ้นโดยรวมกลุ่มของสลิตของ Slotted ALOHA ออกเป็นเฟรม ๆ นอกจากนี้ยังได้มีการคิดหาแนวทางในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการที่เข้าสู่ระบบในกรณีผู้ใช้บริการเข้าระบบเป็นจำนวนมาก จึงมีการนำการกำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณมาใช้เพื่อจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการที่เข้าจองช่องสัญญาณในขณะหนึ่ง ๆ เช่น การปรับค่าโอกาสในการเข้าถึงตัวกลางเพิ่มหรือลดสอดคล้องกับปริมาณทราฟฟิกที่เปลี่ยนแปลงโดยวิธีการที่ถือว่าเป็นพื้นฐานคือ เทคนิค Exponential Backoff [4,19] หรือว่าจะเป็นการกำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณแบบ Pseudo Bayesian [3] ซึ่งกำหนดค่าโอกาสในการเข้า

จองช่องสัญญาณสัมพันธ์กับปริมาณไหลที่ระบบรองรับ (ซึ่งได้จากการประมาณ) ในขณะนั้น โดยมีสมมติฐานว่าผู้ใช้บริการสามารถทราบผลการจองช่องสัญญาณของตนได้ก่อนที่จะถึงช่องสัญญาณจองถัดไปและสามารถเข้าจองช่องสัญญาณได้ใหม่ถ้าหากไม่ประสบความสำเร็จในการจอง

เนื่องจากคุณสมบัติที่แตกต่างกันในโพรโทคอลทั้ง 2 ประเภทจึงได้มีการพัฒนาโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางประเภทผสม [4,5] ที่รวมเอาข้อดีของโพรโทคอลทั้งสองประเภทข้างต้นเข้าไว้ด้วยกัน โครงสร้างเฟรมของโพรโทคอลประเภทนี้จะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ช่วงการจอง และช่วงการส่งข่าวสาร โดยลักษณะการทำงานของโพรโทคอล เริ่มจากผู้ใช้บริการที่ต้องการส่งข่าวสารทำการจองช่องสัญญาณ ณ ช่องสัญญาณจองก่อน ซึ่งเป็นการแข่งขันกับผู้ใช้บริการคนอื่น ถ้าหากว่าการจองเป็นผลสำเร็จ สถานีฐานผู้ซึ่งเป็นศูนย์กลางการควบคุมจะทำการจัดสรรช่องสัญญาณให้กับผู้ใช้บริการคนนั้น โดยผู้ใช้บริการจะส่งข่าวสารในช่องสัญญาณที่สถานีฐานกำหนด

การทำงานในช่วงการจองจึงมีความสำคัญมากต่อสมรรถนะ (Performance) ของระบบ เพราะผู้ใช้บริการทุกคนต้องผ่านการทำงานในช่วงการจองก่อนจึงจะได้รับการจัดสรรช่องสัญญาณในช่วงการส่งข่าวสาร ดังนั้นถ้าการจองในช่วงนี้ไม่ประสบความสำเร็จ การบริการจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้ โดยผลในข้อนี้จะแสดงอย่างชัดเจนเมื่อระบบรองรับทราฟฟิกเป็นปริมาณมาก ๆ ซึ่งที่สภาวะนี้จะทำให้เกิดปัญหาการชนกันของโหนดการจอง

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีผู้เสนอวิธีการจองช่องสัญญาณในช่วงการจองเป็นจำนวนมาก [3, 6-8] บางบทความอาจเรียกวิธีการนี้ว่า อัลกอริทึมสำหรับจัดการการแข่งขัน/การชน [9-10] (Contention/Collision Resolution Algorithm, CRA) แต่วิธีการส่วนใหญ่เป็นวิธีที่ตั้งอยู่บนข้อกำหนดที่ว่าเวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบ (Round-Trip Propagation Delay) มีค่าน้อยจนสามารถละเลยได้ ซึ่งเป็นข้อกำหนดที่เป็นจริงสำหรับระบบสื่อสารไร้สายในอดีตที่ผ่านมา แต่ในปัจจุบันผู้ใช้บริการมีความต้องการที่จะส่งข้อมูลข่าวสารเป็นจำนวนมากผ่านระบบสื่อสารไร้สาย ทำให้ระบบสื่อสารไร้สายในอนาคตอันใกล้จะเป็นระบบสื่อสารไร้สายความเร็วสูง [11-13] ส่งผลให้เวลาประวิงการแพร่กระจายมีผลต่อการจองช่องสัญญาณ ดังนั้นวิธีการจองช่องสัญญาณที่เคยมีผู้นำเสนอจึงไม่เหมาะสมสำหรับกรณีนี้

จากปัญหาที่กล่าวในข้างต้น จึงได้มีผู้ให้ความสนใจและเสนอเทคนิคการจองช่องสัญญาณสำหรับโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสาร ซึ่งเวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบยาวกว่าเวลาประวิงการส่งสัญญาณ (กำหนดให้เวลาประวิงการส่งสัญญาณคือ ระยะเวลาในการส่งข้อมูลภายในหนึ่งช่วงการจอง) โดยกำหนดให้ผู้ใช้บริการแต่ละรายจะสามารถเข้าจองช่องสัญญาณได้เพียงครั้งเดียวต่อเฟรม พบว่าเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ได้

นำเสนอให้สมรรถนะของระบบที่ค่อนข้างดี จึงเกิดเป็นแนวความคิดในการนำเทคนิคการจองช่องสัญญาณดังกล่าวมาพัฒนาเพื่อให้ได้สมรรถนะที่เพิ่มสูงขึ้น จากสมมติฐานที่ว่าสมรรถนะของระบบน่าจะเพิ่มขึ้นได้ หากเพิ่มโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณให้มากกว่า 1 ครั้งต่อเฟรม และอาศัยพื้นฐานเดิมที่ว่าผู้ใช้บริการไม่ทราบผลการจองได้ทันในช่วงการจองและการจองจะประสบผลสำเร็จได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น จนเกิดเป็นเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นหลายอัน (Multi-Token Channel Reservation Techniques)

วิทยานิพนธ์นี้ มุ่งเน้นการศึกษาการทำงาน ออกแบบและพัฒนาเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นหลายอัน สำหรับโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสารไร้สายความเร็วสูง โดยมุ่งความสนใจและพิจารณาเฉพาะช่วงการจองช่องสัญญาณเป็นสำคัญ ทั้งนี้เพื่อการพัฒนาและเพิ่มสมรรถนะของระบบ ซึ่งในที่นี้คือจำนวนผู้ใช้บริการในระบบที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณ โครงข่ายสื่อสารไร้สายที่ใช้เป็นแบบควบคุมจากศูนย์กลางและทำงานในโหมด Frequency Division Duplex (FDD) นอกจากนี้ พบว่าจำนวนของโทเค็นที่ใช้ถือเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อสมรรถนะของระบบ จึงได้นำเสนอวิธีการวิเคราะห์จำนวนโทเค็นที่เหมาะสม (Appropriate Number of Tokens) ในระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนช่องสัญญาณจองที่แตกต่างกันด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1. พัฒนาเทคนิคการจองช่องสัญญาณสำหรับโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางซึ่งใช้โทเค็นหลายอัน เพื่อเพิ่มสมรรถนะและประสิทธิภาพการใช้งานช่องสัญญาณจองในระบบสื่อสารไร้สายความเร็วสูง
2. วิเคราะห์และทดสอบสมรรถนะของเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอ โดยนำมาเปรียบเทียบกับวิธีซึ่งได้เคยมีผู้นำเสนอไว้

1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ มีเป้าหมายในการพัฒนาเทคนิคและวิธีการที่เหมาะสมในการเข้าจองช่องสัญญาณ เพื่อที่จะทำให้สมรรถนะในช่วงการจองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อสมรรถนะในช่วงการจองวัดจากจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในช่วงการจอง โดยวิธีที่นำเสนอนี้จะเพิ่มโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณให้กับผู้ใช้บริการ ด้วยการให้สิทธิ์กับผู้ใช้บริการทุกคนสามารถเข้าจองได้มากกว่า 1 ครั้งต่อเฟรม บนพื้นฐานของระบบที่มีเวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบมีค่ายาวกว่าเวลาประวิงการส่งสัญญาณ ซึ่งผู้ใช้บริการไม่สามารถทราบผลการจองช่องสัญญาณได้

ทันทีและอาจทราบผลการจองช่องสัญญาณภายหลังจากสิ้นสุดส่วนการจองไปแล้ว และการจองจะประสบความสำเร็จได้ 1 ครั้งเท่านั้น สำหรับการหาสมรรถนะของวิธีที่นำเสนอทำได้ด้วยการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ โดยนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับสมรรถนะของวิธีการและเทคนิคที่เคยมีผู้ได้นำเสนอไว้ นอกจากนี้จะได้ทำการวิเคราะห์หาจำนวนของโทเค็นที่เหมาะสมในระบบที่มีช่องสัญญาณจองและผู้ใช้บริการจำนวนแตกต่างกันไป

ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตและสภาพแวดล้อมของโครงข่ายการสื่อสารไร้สายที่ใช้ในการทดสอบ ดังนี้

1. โครงข่ายการสื่อสารไร้สายที่พิจารณา เป็นแบบควบคุมจากศูนย์กลาง เซลล์หนึ่งเซลล์ ประกอบด้วยสถานีฐาน 1 สถานีและผู้ใช้จำนวนหนึ่ง การติดต่อสื่อสารของผู้ใช้บริการทุกรายภายในเซลล์ จะต้องกระทำผ่านสถานีฐานที่ให้บริการภายในเซลล์นั้น ๆ เพียงอย่างเดียว
2. โพรโทคอลที่ทำการศึกษาคือจะประกอบด้วยช่องสัญญาณขาขึ้นและขาลง ซึ่งมีการแยกออกจากกันบนพื้นฐานของ FDD และภายในแต่ละช่องสัญญาณมีการใช้เทคนิคของระบบ TDMA ในการเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณ โครงสร้างของช่องสัญญาณแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนการจองและส่วนการส่งข้อมูลข่าวสาร ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการทำงานเฉพาะส่วนการจองเท่านั้น
3. ระบบสื่อสารไร้สายที่ใช้ในการพิจารณาและจำลองแบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นระบบซึ่งค่าของเวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบมีค่ามากกว่าเวลาประวิงการส่งสัญญาณ ดังนั้นผู้ให้บริการจะทราบผลการจองหลังจากหมดช่วงการจองไปแล้ว เทคนิคการจองช่องสัญญาณที่พัฒนาขึ้นมีการปรับปรุงให้ผู้ใช้บริการแต่ละคนมีโอกาสเข้าจองช่องสัญญาณหรือส่งโทเค็นการจองได้หลายครั้งในหนึ่งเฟรม แม้ว่าจะไม่ทราบผลการจองช่องสัญญาณ
4. ช่องสัญญาณที่พิจารณาในการจำลองแบบ เป็นช่องสัญญาณในอุดมคติ กล่าวคือ ไม่มีความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูล รวมทั้งละเลยผลของเฟดดิ้งและผลของปรากฏการณ์รั้งจับ (Capture Effect)
5. สถานีฐานสามารถทราบจำนวนช่องสัญญาณจองในเฟรม จำนวนโทเค็นและจำนวนผู้ใช้บริการที่จุดเริ่มต้นเฟรม โดยจำนวนผู้ใช้บริการภายในโครงข่ายจะมีค่าคงที่ตลอดการทดสอบ เนื่องจากไม่ได้คำนึงถึงผลของการส่งต่อระหว่างเซลล์ (ไม่เกิดการแฮนด์โอเวอร์)
6. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงถึงสมรรถนะของวิธีที่นำเสนอจะใช้จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง (Average Number of Successful User) เป็น

พารามิเตอร์หลักในการเปรียบเทียบ เพราะจุดประสงค์หลักในวิทยานิพนธ์นี้คือการหาวิธีที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพในช่วงการจอบมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการ

1. ศึกษาโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสารไร้สายแบบต่าง ๆ ที่ได้มีการพัฒนาและนำเสนอมาในปัจจุบัน ทั้งในแบบที่ไม่มีการแข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ แบบที่มีการแข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ และแบบผสมเทคนิคการแข่งขันและไม่แข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ เพื่อให้ทราบข้อดีและข้อด้อยต่าง ๆ ที่มีในโพรโทคอลแต่ละประเภท
2. ศึกษาเทคนิคการจอบช่องสัญญาณ ซึ่งได้มีผู้เสนอไว้ พร้อมทั้งเขียนโปรแกรมจำลองการทำงานของเทคนิคดังกล่าว เพื่อทราบแนวโน้มและผลกระทบของตัวแปรต่าง ๆ
3. พัฒนาเทคนิคการจอบช่องสัญญาณแบบใหม่ ซึ่งเป็นระบบที่ใช้โหนดหลายอัน
4. เขียนโปรแกรมจำลองการทำงานของเทคนิคการจอบช่องสัญญาณที่นำเสนอ เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของเทคนิคดังกล่าว
5. วิเคราะห์และประเมินผล โดยการเปรียบเทียบระหว่างวิธีการก่อนหน้า และวิธีการที่นำเสนอ
6. สรุป วิจัย และรวบรวมข้อมูลทั้งหมด พร้อมทั้งจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. สามารถวิเคราะห์สมรรถนะของโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางแบบต่าง ๆ ที่มีในปัจจุบัน
2. สามารถออกแบบและพัฒนาเทคนิคการจอบช่องสัญญาณแบบใหม่ ซึ่งใช้โหนดหลายอันและมีประสิทธิภาพในโครงข่ายการสื่อสารไร้สายความเร็วสูง
3. สามารถพัฒนาโปรแกรม เพื่อใช้ในการทดสอบสมรรถนะของโพรโทคอลและเทคนิคการจอบช่องสัญญาณที่ได้นำเสนอ

1.6 คำโครงวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งรายละเอียดออกเป็น 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน ประโยชน์ที่ได้รับ และเค้าโครงวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐาน กล่าวถึงประเภทของโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางที่มีในปัจจุบัน พื้นฐานการจองช่องสัญญาณ เทคนิคการกำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่นำเสนอในอดีต ผลของเวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบ ปัญหาของเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่มีนำเสนอในอดีต และเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอ

บทที่ 3 เทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอ กล่าวถึงหลักการทำงานและแนวทางการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ โดยแบ่งเทคนิคการเข้าจองช่องสัญญาณเป็น 3 ประเภท ได้แก่ เทคนิคการใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมแบบค่าคงที่ (Multi-Token Cascade Fixed Probability : MT-CFP) , เทคนิคการเลือกสล็อตการจองอย่างสุ่ม (Multi-Token Uniform : MT-UNI) และเทคนิคการจำกัดจำนวน (Multi-Token Uniform with Limited Access : MT-UNI+LA)

บทที่ 4 ผลการทดสอบ กล่าวถึงผลการจำลองแบบและการวิเคราะห์ผลการจำลองแบบของเทคนิคการเข้าจองช่องสัญญาณที่นำเสนอ พร้อมทั้งผลการเปรียบเทียบเทคนิคที่นำเสนอและเทคนิคที่มีผู้เคยนำเสนอไว้

บทที่ 5 บทสรุป กล่าวถึงบทสรุป และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

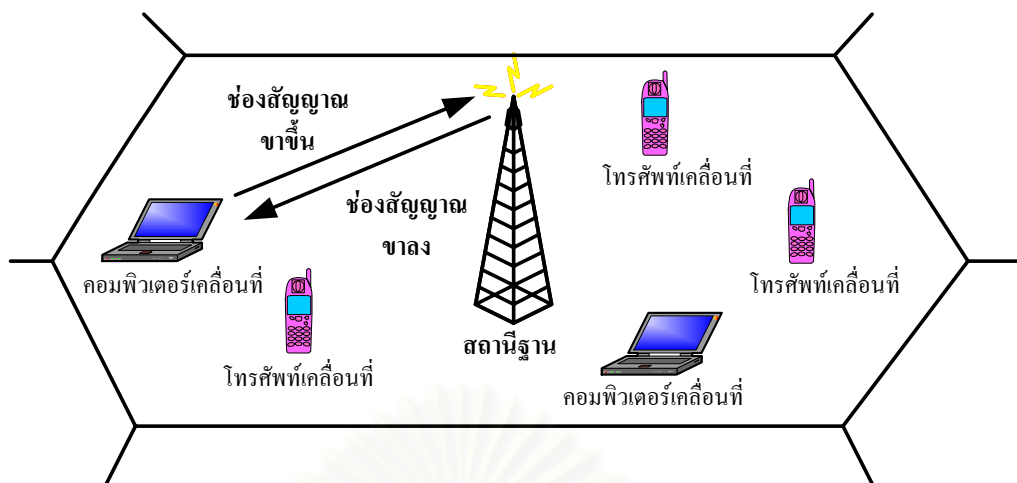
ความรู้พื้นฐาน

บทนี้กล่าวถึงความรู้พื้นฐาน ซึ่งประกอบด้วยความรู้เกี่ยวกับโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง โดยกล่าวถึงประเภทของโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางที่มีการนำเสนอและตัวอย่างของโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง จากนั้นจะกล่าวถึงพื้นฐานการจองช่องสัญญาณ เทคนิคการกำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่นำเสนอในอดีต ผลของเวลาประวัติการแพร่กระจายครบรอบ ปัญหาของเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่มีนำเสนอในอดีต และสุดท้ายจะกล่าวถึงเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์

2.1 โพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง

โพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง หรือ Media Access Control Protocol (MAC Protocol) คือ วิธีการที่กำหนดให้ผู้ให้บริการสามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีการทำงานอยู่ในส่วนของชั้นเชื่อมโยงข้อมูล (Data Link Layer) ตามมาตรฐานของแบบจำลองอ้างอิง 7 ชั้น (Open Systems Interconnection (OSI) Reference Model) และมีหน้าที่จัดสรรช่องสัญญาณให้ผู้ให้บริการหลาย ๆ ราย ซึ่งอาจเป็นโทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์เคลื่อนที่ หรืออุปกรณ์สื่อสารไร้สายชนิดอื่น ๆ ให้สามารถติดต่อสื่อสารกัน และ/หรือ ติดต่อกับสถานีฐานได้

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โพรโทคอลหลายอัน โดยโครงข่ายที่ใช้ในการพิจารณาเป็นโครงข่ายไร้สายแบบควบคุมจากศูนย์กลาง เนื่องจากโครงข่ายในลักษณะนี้ สถานีฐานสามารถทำการควบคุมได้อย่างสมบูรณ์ อีกทั้งไม่เกิดปัญหาด้านการชิงโครโนซ์ และช่องสัญญาณขาขึ้นและขาลงสามารถใช้งานได้ในขณะเดียวกันจากโมดการทำงานแบบ Frequency Division Duplex (FDD) เมื่อพิจารณาโครงข่ายไร้สายแบบควบคุมจากศูนย์กลางพบว่า ในบริเวณพื้นที่ให้บริการหนึ่งประกอบด้วยสถานีฐาน (Base Station) 1 สถานี ผู้ใช้อุปกรณ์ปลายทางเคลื่อนที่จำนวนหนึ่ง (Mobile Terminal Users) และช่องสัญญาณสำหรับสื่อสาร (Channel) [14,20] ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ระบบสื่อสารไร้สายในพื้นที่ให้บริการหนึ่ง

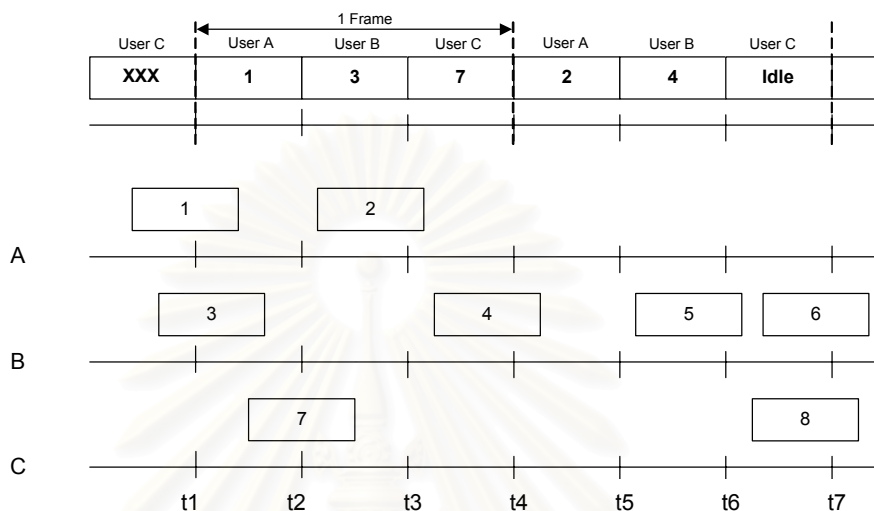
สถานีฐานเป็นส่วนหนึ่งของโครงข่ายหลัก (Backbone Network) และผู้ใช้อุปกรณ์ปลายทางเคลื่อนที่ ได้แก่ ผู้ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือผู้ใช้อุปกรณ์คอมพิวเตอร์เคลื่อนที่ โดยสถานีฐานและผู้ใช้บริการจะติดต่อสื่อสารกันผ่านทางช่องสัญญาณ ซึ่งจะแบ่งเป็นช่องสัญญาณขาขึ้น (Upward Channel) และช่องสัญญาณขาลง (Downward Channel) สถานีฐานใช้ช่องสัญญาณขาลงเพื่อส่งกราฟฟิกควบคุม (Broadcast Control Traffic) และ/หรือ กราฟฟิกข่าวสาร (Information Traffic) ไปยังผู้ใช้บริการ ในขณะที่ผู้ใช้บริการส่งกราฟฟิกข่าวสารของตนไปยังสถานีฐานในช่องสัญญาณขาขึ้น

จากพัฒนาการของโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางที่มีการนำเสนอมานั้น สามารถจำแนกออกตามลักษณะการทำงาน [1,4-5,15] ได้เป็นสามกลุ่มดังนี้คือ

2.1.1 โพรโทคอลที่ไม่มีการแข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ (Contention-Free MAC Protocol)

โพรโทคอลประเภทนี้ ผู้ใช้บริการแต่ละรายจะสามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณได้แน่นอน โดยระบบจะจัดสรรช่องสัญญาณที่กำหนดแน่นอนสำหรับผู้ใช้บริการแต่ละคน ตัวอย่างของโพรโทคอลที่ไม่มีการแข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ เช่น Frequency Division Multiple Access (FDMA), Time Division Multiple Access (TDMA) , Code Division Multiple Access (CDMA) เป็นต้น ข้อดีของโพรโทคอลประเภทนี้คือระบบจะมีเสถียรภาพในทุกสภาวะกราฟฟิก เพราะไม่เกิดการชนกันของเทเค้นของผู้ใช้บริการ แต่ข้อเสียคือจะทำให้ไม่สามารถใช้แบนด์วิดท์ที่มีอย่างจำกัดให้เกิดประโยชน์มากที่สุด เนื่องจากถ้าผู้ใช้บริการคนใดไม่ได้ส่งข่าวสาร จะทำให้สูญเสียแบนด์วิดท์ในส่วนนั้นไปเพราะผู้ใช้บริการคนอื่นไม่สามารถเข้ามาใช้ได้ นอกจากนี้ระบบยังไม่สามารถรองรับ

ผู้ใช้บริการจำนวนมากได้ รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างการทำงานของโพรโทคอลที่ไม่มีการแข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ TDMA การทำงานของโพรโทคอลนี้ ช่องสัญญาณแต่ละช่องจะมีการกำหนดช่องสัญญาณล่วงหน้าให้แก่ผู้ใช้บริการแต่ละคน จากนั้นผู้ใช้บริการที่ต้องการส่งข้อมูลจะทำการรอจนถึงช่องสัญญาณของตนจึงจะส่งข้อมูล

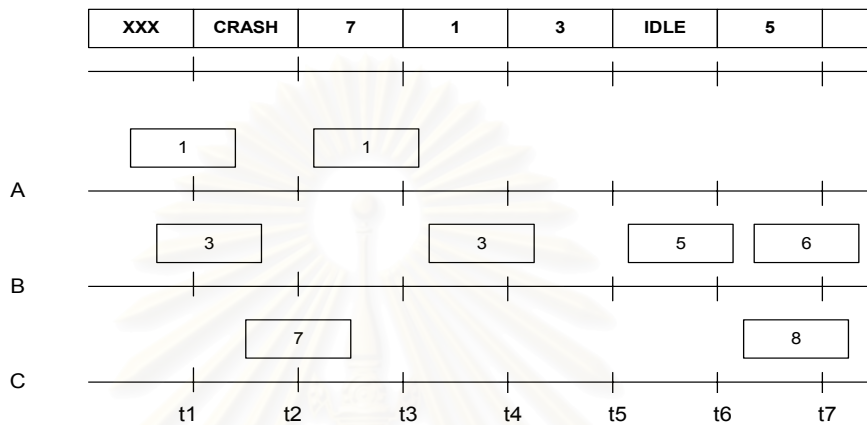


รูปที่ 2.2 การทำงานของโพรโทคอลที่ไม่มีการแข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบ TDMA

2.1.2 โพรโทคอลที่มีการแข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ (Contention-Based MAC Protocol)

โพรโทคอลประเภทนี้ ช่องสัญญาณแต่ละช่องจะไม่มีกำหนดให้กับผู้ใช้บริการคนใดคนหนึ่งอย่างแน่นอน ดังนั้นผู้ใช้บริการทุกคนจะต้องทำการแข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ ตัวอย่างของโพรโทคอลที่มีการแข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ เช่น Pure ALOHA [2,3], Slotted ALOHA [2,3] และ Carrier Sense Multiple Access (CSMA) [2,3] ข้อดีของโพรโทคอลประเภทนี้คือ สามารถรองรับผู้ใช้บริการได้จำนวนมาก และสามารถรองรับทราฟฟิกที่มีขนาดปรับเปลี่ยนอยู่ตลอดเวลาได้ แต่ข้อเสียคือที่สภาวะทราฟฟิกสูง ๆ ระบบจะขาดเสถียรภาพในการทำงานเนื่องจากเกิดการชนกันมากเกินไปของโหนดผู้ใช้บริการ นอกจากนี้ยังไม่สามารถคาดเดาเวลาประวิงเนื่องจากการส่งโหนดได้ จึงทำให้โพรโทคอลประเภทนี้ไม่เหมาะสมกับการส่งทราฟฟิกประเภทเสียงเพราะเป็นบริการที่ต้องการเวลาประวิงที่ต่ำ รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างการทำงานของระบบที่มีการแข่งขันแบบ Slotted ALOHA การทำงานของระบบนี้จะมีลักษณะคล้ายกับระบบ Pure-ALOHA คือผู้ใช้บริการที่ต้องการส่งข้อมูลจะสามารถส่งข้อมูลได้ทันทีเมื่อต้องการแต่มีข้อยกเว้นว่าการส่งข้อมูลนั้นจะต้องกระทำที่ต้นช่องสัญญาณย่อยเท่านั้น ที่เป็นเช่นนี้เพราะ

ลักษณะโครงสร้างของระบบนี้จะแบ่งเวลาออกเป็นช่องสัญญาณย่อยๆ ไม่ต่อเนื่องเหมือนระบบ Pure-ALOHA ทำให้ผู้ใช้บริการที่ต้องการส่งข้อมูลจะต้องรอจนถึงจุดเริ่มต้นของช่องสัญญาณย่อยๆ จึงจะสามารถส่งข้อมูลได้ และหากมีผู้ใช้มากกว่าหนึ่งคนทำการส่งข้อมูลลงบนช่องสัญญาณช่องเดียวกันแล้ว ข้อมูลทั้งหมดก็จะชนกันและเกิดความเสียหาย ในกรณีแบบนี้ผู้ใช้บริการทุกคนจะต้องส่งข้อมูลใหม่อีกครั้งในช่องสัญญาณย่อยถัดไป



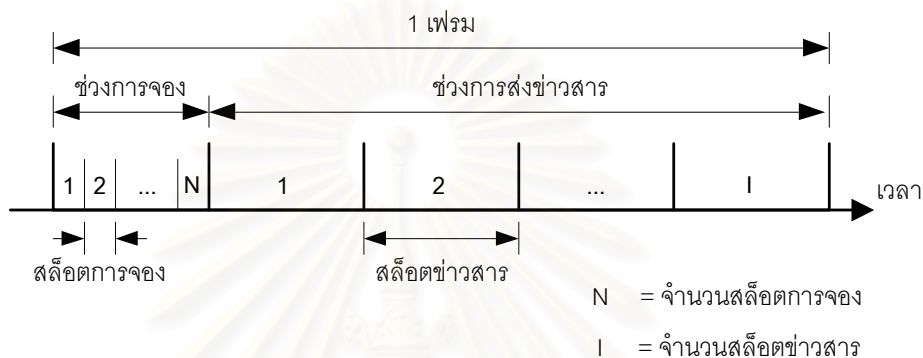
รูปที่ 2.3 การทำงานของโพรโทคอลที่มีการแข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ Slotted ALOHA

2.1.3 โพรโทคอลแบบผสมเทคนิคการแข่งขันและไม่แข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ (Contention-Free and Contention-Based MAC Protocol)

โพรโทคอลประเภทนี้ เป็นการนำเทคนิคที่ดีของโพรโทคอลทั้งสองกลุ่มแรกมารวมกัน จากการศึกษาโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางประเภทต่าง ๆ พบว่าโพรโทคอลที่ผสมเทคนิคการแข่งขันและไม่แข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ ได้รับความสนใจในการนำมาพัฒนาเป็นจำนวนมาก เนื่องจากสมรรถนะที่ระบบได้รับคือ สามารถรองรับทราฟฟิกได้ทุกสภาวะ แม้ว่าสภาวะที่มีปริมาณทราฟฟิกสูง ๆ ระบบยังคงมีเสถียรภาพในการทำงาน โดยระบบสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกได้ใกล้เคียงกับระบบที่ไม่มีการแข่งขัน และยังสามารถรองรับผู้ใช้บริการจำนวนมากได้ จึงมีความยืดหยุ่นในการให้บริการสูงคล้ายกับระบบที่มีการแข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ ตัวอย่างโพรโทคอลกลุ่มนี้ เช่น ALOHA Reservation [4], Round Robin Reservation (RRR) [5], PRMA [7] , DR-TDMA [16] เป็นต้น

เนื่องจากโพรโทคอลแบบ ALOHA Reservation เป็นโพรโทคอลที่มีข้อดีหลายอย่างเมื่อเทียบกับโพรโทคอลแบบผสมเทคนิคการแข่งขันและไม่แข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณประเภทอื่น จึงมีผู้ให้ความสนใจและพัฒนาเป็นจำนวนมาก [14,17-18] โครงสร้างเฟรมเพื่อรองรับการทำงานของโพรโทคอลแบบนี้ แสดงในรูปที่ 2.4 โดยในแต่ละเฟรมประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ช่วงการ

จอง (Reservation Period) ซึ่งถูกแบ่งเป็นสล็อตขนาดเล็กจำนวนหนึ่งเพื่อใช้ในการจอง (Minislots) เรียกว่า สล็อตการจอง (Reservation Slots) และ ช่วงการส่งข่าวสาร (Transmission Period) ซึ่งถูกแบ่งเป็นสล็อตเพื่อใช้ในการส่งข่าวสารเรียกว่า สล็อตข้อมูลข่าวสาร (Information Slots) ดังนั้น ข้อได้เปรียบที่สำคัญของโพรโทคอลประเภทนี้คือ สล็อตการจองมีขนาดเล็ก เมื่อเกิดการสูญเสียซึ่งอาจเกิดจากการชนกันหรือการว่าง ก็จะไม่สูญเสียแบนด์วิดท์และข้อมูลเฉพาะในส่วนการจอง



รูปที่ 2.4 โครงสร้างเฟรมของ โพรโทคอล ALOHA Reservation

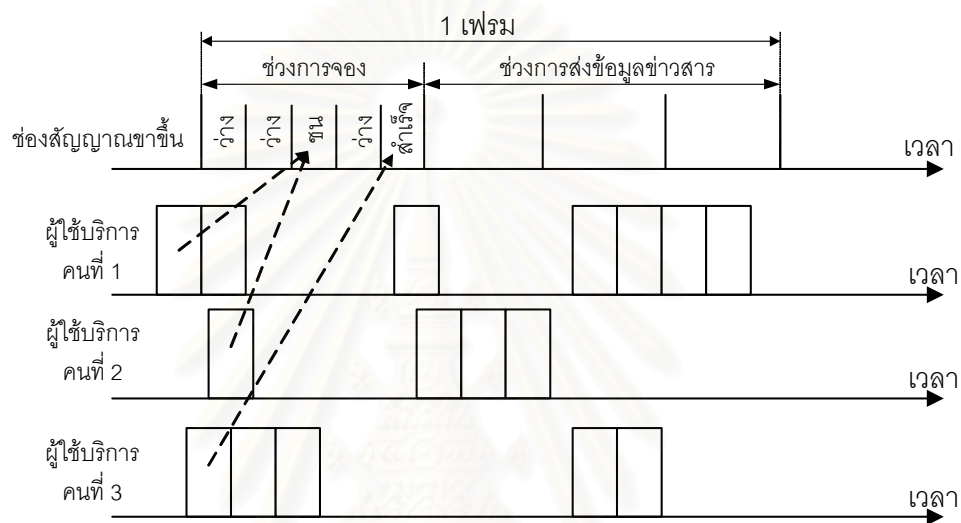
2.2 พื้นฐานการจองช่องสัญญาณ

โดยทั่วไปกระบวนการจองช่องสัญญาณในช่วงการจองของโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางแบบผสมเทคนิคการแข่งขันและไม่แข่งขันในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ รวมถึงโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางแบบต่าง ๆ ที่มีช่วงการจอง มักจะอาศัยวิธีที่มีพื้นฐานจากโพรโทคอล Slotted ALOHA กล่าวคือ เมื่อผู้ใช้บริการมีข่าวสารที่ต้องการส่ง ผู้ใช้บริการจะต้องรอจนกระทั่งถึงช่วงการจองจึงจะเริ่มเข้าจองช่องสัญญาณได้ โดยสถานีฐานจะเป็นผู้ทำหน้าที่ตรวจสอบผลการจองในช่วงการจอง ซึ่งผลจากการจองช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นภายหลังจากที่ผู้ใช้บริการทำการเข้าจองช่องสัญญาณนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

- การสำเร็จ (Success) เกิดขึ้นเมื่อมีผู้ใช้บริการเพียงรายเดียวเข้าจองในช่องสัญญาณจองนั้น ๆ
- การชน (Collision) เกิดขึ้นเมื่อมีผู้ใช้บริการเกินกว่า 1 ราย ทำการเข้าจองช่องสัญญาณพร้อมกันในช่องสัญญาณจองเดียวกัน
- การว่าง (Idle) เกิดขึ้นเมื่อไม่มีผู้ใช้บริการรายใดในระบบเข้าจองในช่องสัญญาณจองนั้น

ในกรณีที่ผู้ใช้บริการประสบความสำเร็จในการจอง สถานีฐานจะตรวจสอบตำแหน่งสล็อตข่าวสารที่ยังว่างอยู่แล้วจึงจัดสรรสล็อตข่าวสารให้กับผู้ใช้บริการ แล้วแจ้งตำแหน่งสล็อตข่าวสาร

ดังกล่าวให้ผู้ใช้บริการทราบ หลังจากนั้นผู้ใช้บริการจะรอเวลาจนกระทั่งถึงช่วงเวลาของสลิตข้อมูลข่าวสารที่ได้รับการจัดสรรจึงเริ่มทำการส่งโทเคนข่าวสาร (Information Packet) โดยถ้าผู้ใช้บริการส่งข่าวสารไม่หมดภายในเฟรมนั้นผู้ใช้บริการอาจได้สิทธิในการส่งโทเคนข่าวสาร ณ สลิตข่าวสารเดิมในเฟรมถัดไป (Piggy backing) จนกว่าจะส่งข่าวสารหมด สำหรับผู้ใช้บริการที่ไม่ประสบความสำเร็จจะต้องเริ่มเข้าจองใหม่ ซึ่งอาจจะสามารถเข้าจองในสลิตการจองถัดไปหรืออาจต้องเข้าจองในเฟรมถัดไป ทั้งนี้ขึ้นกับประเภทของทราฟฟิกที่ทำการส่งและโพรโทคอลแต่ละชนิดที่เลือกใช้



รูปที่ 2.5 ผลการจองช่องสัญญาณของโพรโทคอล ALOHA Reservation

รูปที่ 2.5 แสดงผลการจองช่องสัญญาณของโพรโทคอล ALOHA Reservation ในระบบที่ประกอบด้วยผู้ใช้บริการจำนวน 3 คน และช่องสัญญาณจองจำนวน 5 ช่อง จะเห็นได้ว่าในช่องสัญญาณจองที่ 1 ช่องสัญญาณจองที่ 2 และช่องสัญญาณจองที่ 4 จะไม่มีผู้ใช้บริการคนใดทำการเข้าจอง ดังนั้นช่องสัญญาณจึงเกิดการว่าง ในขณะที่ในช่องสัญญาณจองช่องที่ 3 นั้นจะมีผู้ใช้บริการคนที่ 1 และผู้ใช้บริการคนที่ 2 เข้าจองช่องสัญญาณพร้อมกัน ดังนั้นจึงเกิดการชนกันขึ้น และไม่มีผู้ใช้บริการคนใดประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณ ในขณะที่ในช่องสัญญาณจองช่องที่ 5 นั้นจะมีผู้ใช้บริการคนที่ 3 เพียงคนเดียวเข้าจองช่องสัญญาณ ดังนั้นผู้ใช้บริการคนที่ 3 จะสามารถจองช่องสัญญาณได้สำเร็จ

2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดสมรรถนะของโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสารไร้สาย

พารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการวัดเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสารไร้สาย [1] ได้แก่

- ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) คือ ค่าของจำนวนข้อมูลที่ได้รับการส่งสำเร็จ เทียบกับค่าของข้อมูลที่ทำกาส่งทั้งหมด หรือจำนวนการส่งที่ประสบความสำเร็จเทียบกับจำนวนช่องสัญญาณที่มีอยู่ในระบบ ซึ่งโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางโดยทั่วไป มีจุดประสงค์หลักในการทำให้ค่าวิสัยสามารถมีค่าสูงที่สุด

- ค่าการประวิงเวลา (Delay) คือ เวลาเฉลี่ยซึ่งใช้ไปตั้งแต่ข้อมูลเข้าไปรอในคิวจนกระทั่งได้รับการบริการ ค่าการประวิงเวลาเป็นผลขึ้นกับลักษณะกราฟฟิกที่เข้ามาด้วย ดังนั้น เพื่อให้การเปรียบเทียบผลมีความถูกต้อง จำเป็นต้องกำหนดค่าพารามิเตอร์ของกราฟฟิกที่เข้ามาให้เป็นพารามิเตอร์เดียวกัน

- ความสามารถในการจัดการกับบริการแบบมัลติมีเดีย ซึ่งประกอบด้วยทั้ง บริการเสียง บริการข้อมูลคอมพิวเตอร์ และบริการวิดีโอ

- ความยุติธรรม (Fairness) ของการให้บริการ สำหรับผู้ใช้บริการทุก ๆ ราย

- ความมีเสถียรภาพ (Stability) ระบบที่ดีต้องมีความสามารถรักษาเสถียรภาพได้ในทุก ๆ ปริมาณกราฟฟิก หรือรองรับปริมาณกราฟฟิกและจำนวนผู้ใช้บริการได้ทุก ๆ ขนาด

- ความทนทานต่อการจางหายของช่องสัญญาณ (Robustness against Channel Fading) ซึ่งพารามิเตอร์ตัวนี้จะส่งผลนำไปสู่การขาดเสถียรภาพของระบบ

- การใช้พลังงาน (Power Consumption) โพรโทคอลที่ดีควรมีการใช้พลังงานอย่างประหยัดและคุ้มค่าที่สุด

สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดสมรรถนะทั้งหมดนี้ ในการออกแบบโพรโทคอลหนึ่ง ๆ ไม่สามารถที่จะได้สมรรถนะทุกตัวที่สูงทั้งหมด เนื่องจากเป็นลักษณะของการชดเชยข้อดีข้อเสีย (Tradeoff) กล่าวคือ เมื่อได้สมรรถนะบางอย่างที่สูง อาจทำให้สมรรถนะอีกอย่างลดลง สาเหตุดังกล่าวเป็นสิ่งที่ผู้ออกแบบและพัฒนาโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสารไร้สายต้องทราบและหาจุดเด่นของโพรโทคอลที่พัฒนาขึ้น จากการศึกษาพบว่าได้มีผู้พยายามออกแบบและพัฒนาโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางที่แตกต่างกันออกไป และให้ค่าสมรรถนะที่เป็นจุดเด่นของโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางแต่ละโพรโทคอล

วิทยานิพนธ์นี้ วัดสมรรถนะของเทคนิคการจองช่องสัญญาณของโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง โดยใช้พารามิเตอร์ที่สำคัญคือ ค่าวิสัยสามารถ ซึ่งนิยามว่าเป็นจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณเทียบกับจำนวนช่องสัญญาณที่มีอยู่ในระบบ และพิจารณาการทำงานเฉพาะส่วนการจองเท่านั้น นอกจากนี้ ระบบยังให้ความยุติธรรมสำหรับผู้ใช้บริการทุกรายในการเข้าจองช่องสัญญาณ โดยผู้ใช้บริการแต่ละรายมีโอกาสที่จะประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณได้เท่าเทียมกันและได้รับสิทธิ์ในการใช้โทเค็นจำนวนเท่ากันในช่วงการจองของแต่ละเฟรม

2.4 เทคนิคการกำหนดค่าโอกาสในการเข้าของช่องสัญญาณที่นำเสนอในอดีต

การแข่งขันกันของผู้ใช้บริการในส่วนของจองของโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางประเภทผสมนั้นส่วนมากจะอาศัยกลไกการทำงานแบบ Slotted Aloha [2,3] เนื่องจากเป็นกลไกที่ง่ายและมีความยืดหยุ่นสูง โดยเมื่อผู้ให้บริการมีความต้องการส่งข้อมูล ผู้ให้บริการจะต้องรอให้ถึงจุดเริ่มต้นของช่องสัญญาณจอง แล้วจึงทำการส่งโทเค็นการจองออกมาอย่างสุ่ม หลังจากนั้น ผู้ให้บริการจะต้องรอเพื่อทราบผลการจองช่องสัญญาณของตน โดยถ้าหากไม่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณ ผู้ให้บริการจะต้องรอให้ถึงจุดเริ่มต้นของช่องสัญญาณจองถัดไปหรืออาจทำการประวิงเวลาก่อนที่จะทำการเข้าจองช่องสัญญาณใหม่

อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาจากกลไกการแข่งขันกันของผู้ให้บริการแบบ Slotted Aloha พบว่า อาจเกิดปัญหาต่อระบบ ถ้าหากในเวลาใด ๆ มีผู้ให้บริการจำนวนมากเข้าทำการจองช่องสัญญาณพร้อมกัน เพราะจะเกิดปัญหาการชนกันของผู้ให้บริการ และส่งผลให้แบนด์วิดท์ในส่วนส่งข้อมูลไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นจึงได้มีผู้เสนอแนวทางสำหรับการแก้ไขโดยใช้การกำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณรวมกับการทำงานของเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ Slotted Aloha ทั้งนี้เพื่อเป็นการจำกัดจำนวนผู้ให้บริการขณะหนึ่ง ๆ ที่จะสามารถผ่านเข้าไปจองช่องสัญญาณ โดยผู้ให้บริการจะต้องทำการสุ่มค่าระหว่าง 0-1 และหากค่าที่สุ่มได้มีค่าต่ำกว่าค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่กำหนด ผู้ให้บริการรายนั้นจะสามารถผ่านเข้าไปจองช่องสัญญาณได้ ทั้งนี้สถานีฐานจะเป็นผู้กำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณและแจ้งค่าดังกล่าวให้ผู้ให้บริการในระบบทราบ

การกำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณในเทคนิคที่มีการนำเสนอนี้มีหลักการพื้นฐานคือจะทำการปรับค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณตามปริมาณโหลดที่ระบบรองรับ (จำนวนผู้ให้บริการ) โดยจะทำการลดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณเมื่อจำนวนผู้ให้บริการมีจำนวนมาก ในทางตรงกันข้ามจะทำการเพิ่มค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณเมื่อจำนวนผู้ให้บริการลดต่ำลง ดังนี้

2.4.1 วิธี Exponential Backoff

การกำหนดค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจองด้วยวิธีนี้ จะกำหนดตามสถานะของช่องการจองที่ผ่านมา กล่าวคือค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจองในสล็อตการจองถัดไป ($p(t+1)$) จะทำการคำนวณจากค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจองของสล็อตการจองที่ผ่านมา ($p(t)$) ดังแสดงในสมการที่ (2.1)

$$p(t+1) = \min \left\{ p_{\max}, p(t) \times \left(\frac{1}{q} \cdot I_{z(t)=0} + 1 \cdot I_{z(t)=1} + q \cdot I_{z(t) \geq 2} \right) \right\} \quad (2.1)$$

เมื่อ $0 < p_{\max} \leq 1$ และ $0 < q \leq 1$

โดยที่ $z(t)$ เป็นตัวแปรบอกจำนวนผู้ใช้บริการที่สังเกตเห็นการจองในสล็อตการจองนั้น เพื่อใช้ในการบอกสถานะของสล็อตการจอง คือ $z(t) = 0$ แสดงสถานะการว่าง, $z(t) = 1$ แสดงสถานะการจองเป็นผลสำเร็จ และ $z(t) \geq 2$ แสดงสถานะการชน สำหรับค่าของ I_A จะมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อเกิดเหตุการณ์ A และเป็นศูนย์เมื่อไม่เกิดเหตุการณ์ สำหรับผลการทดสอบใน [19] ได้กำหนดค่า $p_{\max} = 1$ และได้สรุปว่าค่า $q = \frac{1}{2}$ เป็นค่าที่เหมาะสมที่จะทำให้ระบบได้สมรรถนะที่ดีในสถานะทราฟฟิกปกติ

2.4.2 วิธี Pseudo Bayesian

การกำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณในวิธีนี้มีสมมติฐานที่ผู้ออกแบบกำหนด คือผู้ใช้บริการสามารถทราบผลการจองช่องสัญญาณได้ทันทีและสามารถเข้าจองช่องสัญญาณได้ใหม่เมื่อไม่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณ ทางด้านสถานีฐานสามารถทำการปรับค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณและแจ้งให้ผู้ใช้บริการทราบได้ทันทีก่อนที่จะถึงจุดเริ่มต้นของช่องสัญญาณจองถัดไป โดยค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่แต่ละต้นช่องสัญญาณจองจะมีค่าเปลี่ยนไปตามปริมาณโหลดหรือจำนวนผู้ใช้บริการที่ประมาณได้ในระบบขณะนั้น โดยการประมาณจำนวนผู้ใช้บริการจะประมาณจากเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นภายในระบบ 3 ประเภท คือ การสำเร็จ การชน หรือการว่าง นอกจากนี้จะทำการพิจารณาอัตราการเกิดของผู้ใช้บริการใหม่ (Arrival Rate , λ) ซึ่งค่าดังกล่าวจะช่วยให้การประมาณมีความใกล้เคียงกับจำนวนผู้ใช้บริการจริงเพิ่มมากขึ้น

พิจารณาระบบที่ต้นเฟรมซึ่งประกอบด้วยผู้ใช้บริการจำนวน n รายและกำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณเท่ากับ p จะได้ว่าอัตราข้อมูลของระบบมีค่าเป็น np และความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการจะประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณมีค่าเป็น $np(1-p)^{n-1}$ โดยจะมีค่าสูงสุดเมื่อ $np = 1$ โดยก่อนที่จะถึงช่องสัญญาณจองถัดไป กลไกการทำงานนี้จะทำการประมาณจำนวนผู้ใช้บริการในช่องสัญญาณจองถัดไป (η_{t+1}) จากจำนวนผู้ใช้บริการในช่องสัญญาณจองก่อนหน้า (η_t) แล้วจึงกำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณของช่องสัญญาณจองถัดไป ($p(t+1)$) จำนวนผู้ใช้บริการและค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณในช่องสัญญาณจองช่องถัดไป สามารถหาได้จากสมการที่ (2.2)

$$\eta_{t+1} = \left\{ \begin{array}{ll} \max(\lambda, \eta_t + \lambda - 1) & : \text{Success or Idle} \\ \eta_t + \lambda + (e - 2)^{-1} & : \text{Collision} \end{array} \right\} \quad (2.2)$$

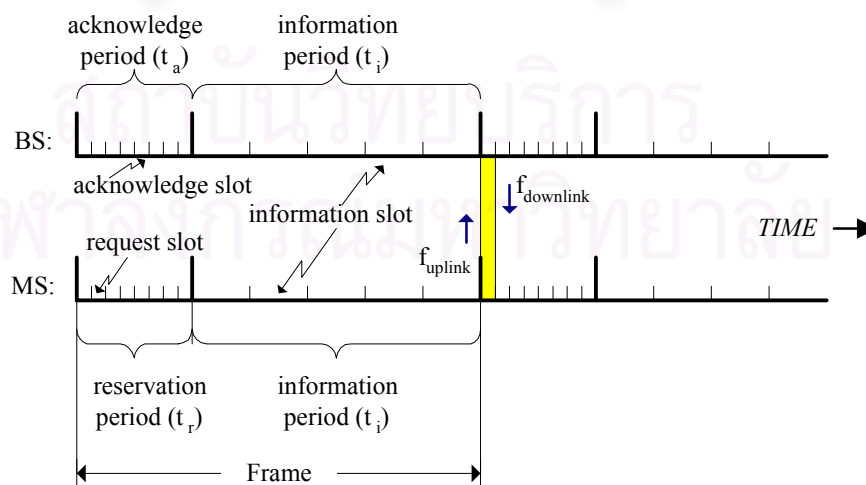
โดยที่ λ แทน อัตราการเกิดของผู้ใช้บริการใหม่ และ $e \approx 2.71$

ค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณของช่องสัญญาณองถัดไป ($p(t+1)$) สามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.3)

$$p(t+1) = \min\left(1, \frac{1}{\eta_{t+1}}\right) \quad (2.3)$$

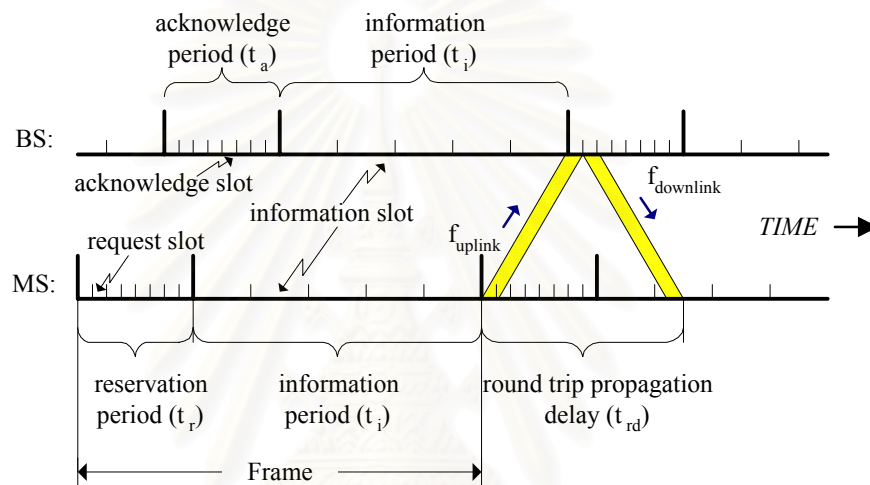
2.5 ผลของเวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบ

การทำงานของระบบทั้งสอง (Exponential Backoff และ Pseudo Bayesian) จะทำบนสมมติฐานว่า สถานีฐานและผู้ให้บริการสามารถส่งสัญญาณการตอบรับระหว่างกันได้ในทันที กล่าวคือ เมื่อผู้ให้บริการทำการจองช่องสัญญาณในสล็อตการจองที่ t ผ่านทางช่องสัญญาณขาขึ้น สถานีฐานจะทำการตรวจสอบผู้ให้บริการที่ทำการจอง ณ สล็อตการจองนั้น แล้วจึงแจ้งผลการจองกลับไปยังผู้ให้บริการผ่านทางช่องสัญญาณขาลงในทันทีก่อนจะเริ่มการจองในสล็อตการจองที่ $t+1$ ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งในกรณีที่ผู้ให้บริการไม่ประสบความสำเร็จในการจองเนื่องจากเกิดการชนกัน ผู้ให้บริการเหล่านี้สามารถทำการจองช่องสัญญาณในสล็อตการจองถัดไปได้เลย (สล็อตการจองที่ $t+1$) หมายความว่าระบบที่ใช้วิธีการทั้งสองจะต้องมีเวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบ (Round-Trip Propagation Delay) ที่สั้นมาก ดังนั้นจึงทำให้ผู้ให้บริการสามารถเข้าจองช่องสัญญาณได้ทุกสล็อตการจอง



รูปที่ 2.6 โครงสร้างเฟรมและการทำงานเมื่อเวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบมีค่าน้อย

อย่างไรก็ดี เมื่อพิจารณาระบบสื่อสารบางประเภทซึ่งค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบมีค่ามากกว่าเวลาประวิงการส่งสัญญาณ เช่น ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม ระบบสื่อสารไร้สายความเร็วสูง เป็นต้น พบว่าในระบบสื่อสารดังกล่าวนี้ ผู้ใช้บริการไม่สามารถทราบผลการจองช่องสัญญาณได้ทันทีและอาจทราบผลการจองช่องสัญญาณภายหลังจากสิ้นสุดส่วนการจองไปแล้ว นั่นหมายถึงว่าผู้ให้บริการจะสามารถเข้าจองช่องสัญญาณได้เพียงครั้งเดียวต่อเฟรม หรืออาจเข้าจองได้หลายครั้งต่อเฟรม แต่ไม่สามารถทราบผลการจองว่าประสบความสำเร็จหรือไม่ในช่วงการจอง และจะประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างเฟรมและการทำงานเมื่อเวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบมีค่ามาก

เพื่อแสดงให้เห็นภาพที่ชัดเจนขึ้น สำหรับระบบที่มีค่าเวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบมากกว่าค่าเวลาประวิงการส่งข้อมูลข่าวสาร ยกตัวอย่างเช่น สมมุติให้สล็อดการจองมีขนาด 16 บิต มีจำนวนสล็อดการจอง 10 สล็อดในแต่ละเฟรม และผู้ให้บริการอยู่ห่างจากสถานีฐานเป็นระยะทาง 3 กิโลเมตร ระยะเวลาที่ใช้ในการส่งโทเค็นการจองจากผู้ให้บริการไปยังสถานีฐาน (Propagation Delay) เท่ากับ $\frac{3 \times 10^3}{3 \times 10^8} = 10 \mu\text{sec}$ ดังนั้นระยะเวลาประวิงหลังจากที่ผู้ให้บริการเริ่มส่งข้อมูลจนกระทั่งได้รับสัญญาณตอบรับกลับมา (Round Trip Propagation Delay) มีค่าเท่ากับ $20 \mu\text{sec}$ เมื่อพิจารณาระบบที่มีอัตราส่งข้อมูล (Transmission Rate) เท่ากับ 1 Mbps ช่วงการจองจะมีขนาด $\frac{16 \times 10}{1 \times 10^6} = 160 \mu\text{sec}$ ผู้ให้บริการยังมีโอกาสที่จะเข้าจองในสล็อดการจองอื่น ๆ ได้อีก แต่ถ้าอัตราส่งข้อมูลเพิ่มเป็น 10 Mbps ช่วงการจองจะมีขนาด $\frac{16 \times 10}{10 \times 10^6} = 16 \mu\text{sec}$ ดังนั้นผู้ให้บริการจะทราบผลการจองหลังจากหมดช่วงการจองในเฟรมที่กำลังพิจารณาไปแล้วจึงต้องรอเข้าจองในเฟรมถัดไป

2.6 การประมาณช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval)

การประมาณค่าแบบช่วง (Interval Estimation) คือการประมาณช่วงที่พารามิเตอร์ของประชากรมีโอกาสตกอยู่ด้วยความเชื่อมั่นค่าหนึ่ง บางทีเรียกว่า การประมาณช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval Estimation) เราจะประมาณช่วงความเชื่อมั่นของพารามิเตอร์ได้โดยอาศัยการแจกแจงของค่าสถิติที่ใช้ในการประมาณพารามิเตอร์นั้น

การประมาณช่วงความเชื่อมั่นด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ยแบบกลุ่ม (Method of batch means) มีกรรมวิธีและขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ทำการจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยจำนวน m ครั้งที่แตกต่างกันและเป็นอิสระจากกัน (m independent simulation runs) ดังนั้นจะกลุ่มตัวอย่างคือ X_1, X_2, \dots, X_m
2. แบ่งกลุ่มตัวอย่างที่ได้เป็น n กลุ่มย่อย (Batch) ซึ่งมีขนาดเท่ากับ k เมื่อ $m = nk$ ดังนั้นกลุ่มย่อยที่ 1 (Batch 1) ประกอบด้วยกลุ่มตัวอย่าง X_1, X_2, \dots, X_k กลุ่มย่อยที่ 2 (Batch 2) ประกอบด้วยกลุ่มตัวอย่าง $X_{k+1}, X_{k+2}, \dots, X_{2k}$ กลุ่มย่อยถัด ๆ ไปก็จะเป็นลักษณะเดียวกันนี้
3. กำหนดให้ $\bar{X}_j(k)$ คือค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างย่อย (Sample Mean หรือ Batch Mean) ของกลุ่มตัวอย่างจำนวน k กลุ่มที่อยู่ภายในกลุ่มย่อยลำดับที่ j (j th batch) กล่าวคือ

$$\begin{aligned}\bar{X}_1(k) &= \frac{\sum_{i=1}^k X_i}{k}, \\ \bar{X}_2(k) &= \frac{\sum_{i=1}^k X_{k+i}}{k}, \\ &\vdots \\ \bar{X}_n(k) &= \frac{\sum_{i=1}^k X_{(n-1)k+i}}{k}\end{aligned}$$

4. สามารถหาค่าเฉลี่ยรวมของกลุ่มตัวอย่าง (Overall Sample Mean หรือ Grand Sample Mean) ได้ดังสมการที่ (2.4)

$$\bar{X}(n, k) = \frac{\sum_{j=1}^n \bar{X}_j(k)}{n} = \frac{\sum_{i=1}^m X_i}{n} \quad (2.4)$$

และหาค่าความแปรปรวนรวมของกลุ่มตัวอย่าง (Overall Sample Variance) ได้ดังสมการที่ 2.5

$$\check{V}(n, k) = \frac{\sum_{j=1}^n (X_j(k) - \check{X}(n, k))^2}{n-1} \quad (2.5)$$

ถ้าเราเลือกกลุ่มย่อยที่มีขนาด k ที่มีค่ามากเพียงพอ จากทฤษฎีขีดจำกัดกลาง (Central Limit Theorem) กล่าวได้ว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่างย่อย $\bar{X}_j(k)$ ($j = 1, 2, \dots, n$) มีค่าเข้าใกล้ การแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) และ $\bar{X}_j(k)$ มีความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน (Mutually Independent) แสดงให้เห็นว่า ตัวแปรสุ่มแบบบรรทัดฐาน (Normalised Random Variable) $T_{n-1} = (\check{X}(n, k) - \mu) / \sqrt{\check{V}(n, k) / n}$ มีการแจกแจงแบบ t (Student t-distribution) ที่มี $n-1$ ระดับขั้นความเสรี (Degree of Freedom) ทำให้สามารถสรุปได้ว่า

$$\begin{aligned} P(-t_{\alpha/2, n-1} \leq T_{n-1} \leq t_{\alpha/2, n-1}) &= 1 - \alpha \\ P\left(-t_{\alpha/2, n-1} \leq \frac{\check{X}(n, k) - \mu}{\sqrt{\check{V}(n, k) / n}} \leq t_{\alpha/2, n-1}\right) &= 1 - \alpha \\ P\left(\check{X}(n, k) - t_{\alpha/2, n-1} \sqrt{\check{V}(n, k) / n} \leq \mu \leq \check{X}(n, k) + t_{\alpha/2, n-1} \sqrt{\check{V}(n, k) / n}\right) &= 1 - \alpha \quad (2.6) \end{aligned}$$

จากสมการที่ 2.6 สามารถระบุได้ถึงโอกาสหรือความน่าจะเป็นที่ค่าเฉลี่ย (μ) จะอยู่ภายในช่วง $[\check{X}(n, k) - t_{\alpha/2, n-1} \sqrt{\check{V}(n, k) / n}, \check{X}(n, k) + t_{\alpha/2, n-1} \sqrt{\check{V}(n, k) / n}]$ มีค่าเท่ากับ $1 - \alpha$ เรียกช่วงดังกล่าวนี้ว่า " ช่วงความเชื่อมั่น $(1 - \alpha) \times 100\%$ " สำหรับค่าเฉลี่ย μ ซึ่งไม่รู้ค่า และเรียก $(1 - \alpha) \times 100\%$ หรือ $1 - \alpha$ ว่า " สัมประสิทธิ์ความเชื่อมั่น " (Confidence Coefficient) หรือ " ระดับความเชื่อมั่น " (Confidence Level)

ในทางปฏิบัติ สามารถใช้ค่า $\alpha = 0.01, 0.05, 0.10$ แทนค่าระดับความเชื่อมั่นที่ 99%, 95%, 90% ตามลำดับ และค่าของ $t_{\alpha/2, n-1}$ สามารถคำนวณหาได้จากฟังก์ชันซึ่งมีอยู่ในโปรแกรม MATLAB คือ ฟังก์ชัน tinv โดยการใส่คำสั่ง

```
>> tinv(1-alpha/2, n-1);
```

2.7 ปัญหาของเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอในอดีต

จากการทำงานของเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอในข้างต้น พบว่ายังมีปัญหาดังนี้

1. เทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอในอดีตนั้นต่างออกแบบมา โดยมีสมมติฐานว่าผู้ใช้บริการสามารถทราบผลการจองช่องสัญญาณได้ทันที และสามารถเข้าจองช่องสัญญาณใหม่เมื่อไม่ประสบความสำเร็จในการเข้าจองช่องสัญญาณ ทางด้านสถานีฐานก็สามารถปรับค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณและแจ้งให้ผู้ใช้บริการทราบได้ก่อนถึงช่องสัญญาณจองถัดไป

เมื่อพิจารณาในระบบที่ใช้จำลองแบบในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นโครงข่ายของระบบสื่อสารไร้สายความเร็วสูง ซึ่งในระบบเช่นนี้ ค่าเวลาประมวลผลแพร่กระจายครบรอบมีค่ามากกว่าเวลาประมวลผลส่งสัญญาณ พบว่าเป็นไปได้ยากที่ผู้ใช้บริการจะสามารถทราบผลการจองช่องสัญญาณได้ทันที

2. การกำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณนั้นส่วนมากจะทำการกำหนดโดยคำนึงถึงเพียงปริมาณโหลดที่ระบบรองรับ (จำนวนผู้ใช้บริการ) โดยเมื่อจำนวนผู้ใช้บริการมีจำนวนมาก ค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณจะมีค่าต่ำลง แต่หากจำนวนผู้ใช้บริการมีจำนวนน้อย ค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณจะเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าการพิจารณาเพียงปริมาณโหลดที่ระบบรองรับอาจทำให้ค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่ได้เป็นค่าที่ไม่เหมาะสม เนื่องจากยังมีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ไม่ได้คำนึงถึงคือจำนวนช่องสัญญาณจองที่มีในเฟรม เช่น ในกรณีที่มีจำนวนช่องสัญญาณจองในเฟรมมีมาก ผู้ใช้บริการอาจจะลดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณลง เพื่อหลีกเลี่ยงโอกาสที่ผู้ใช้บริการจะเกิดการชนกัน เพราะผู้ใช้บริการยังมีโอกาสอีกมากในการเข้าจองช่องสัญญาณ นอกจากนี้จำนวนของโทเค็นที่ผู้ใช้บริการแต่ละรายได้รับสิทธิ์สำหรับการจองช่องสัญญาณ ก็ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องนำมาพิจารณาด้วย

2.8 เทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอ

จากปัญหาที่กล่าวในข้างต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้เสนอเทคนิคการจองช่องสัญญาณซึ่งใช้โทเค็นหลายอัน และเหมาะสำหรับโครงข่ายสื่อสารไร้สายความเร็วสูง ซึ่งค่าเวลาประมวลผลแพร่กระจายครบรอบมีค่ามาก โดยเทคนิคการเข้าจองช่องสัญญาณที่นำเสนอนี้เป็นเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่คำนึงถึงจำนวนผู้ใช้บริการ จำนวนช่องสัญญาณจองที่มีในเฟรม และจำนวนโทเค็นที่เหมาะสมกับการจองช่องสัญญาณ โดยเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1. เทคนิคการใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมแบบค่าคงที่ (Multi-Token Cascade Fixed Probability : MT-CFP)
2. เทคนิคการเลือกสรรการจองอย่างสุ่ม (Multi-Token Uniform : MT-UNI)
3. เทคนิคการจำกัดจำนวน (Multi-Token Uniform with Limited Access : MT-UNI+LA) โดยได้นำเสนอเป็น 2 เทคนิคย่อย ได้แก่
 - 3.1 เทคนิคการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ (Multi-Token Uniform with Limited Access User : MT-UNI+LAU)
 - 3.2 เทคนิคการจำกัดจำนวนโทเค็น (Multi-Token Uniform with Limited Access Token : MT-UNI+LAT)

บทที่ 3

เทคนิคการจองช่องสัญญาณ

บทนี้กล่าวถึงเทคนิคการจองช่องสัญญาณซึ่งใช้โทเค็นหลายอันสำหรับโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสารไร้สายความเร็วสูง และแนวการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอแต่ละเทคนิค โดยเทคนิคการจองช่องสัญญาณทั้งหมดที่เสนอมีด้วยกัน 3 เทคนิค ได้แก่

1. เทคนิคการใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมแบบค่าคงที่ (Multi-Token Cascade Fixed Probability : MT-CFP)
2. เทคนิคการเลือกสล็อตการจองอย่างสุ่ม (Multi-Token Uniform : MT-UNI)
3. เทคนิคการจำกัดจำนวน (Multi-Token Uniform with Limited Access : MT-UNI+LA) โดยได้นำเสนอเป็น 2 เทคนิคย่อย ได้แก่
 - 3.1 เทคนิคการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ (Multi-Token Uniform with Limited Access User : MT-UNI+LAU)
 - 3.2 เทคนิคการจำกัดจำนวนโทเค็น (Multi-Token Uniform with Limited Access Token : MT-UNI+LAT)

วัตถุประสงค์หลักของเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอเป็นการทำให้ระบบมีสมรรถนะในช่วงการจองสูงสุด กล่าวคือ ต้องการทำให้ผู้ใช้บริการที่เข้าจองประสบความสำเร็จมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งสมรรถนะในช่วงการจองมีค่าเท่ากับจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในช่วงการจอง (Average Number of Successful Users) หรือ ค่าวิสัยสามารถในช่วงการจอง (Throughput) เมื่อค่าวิสัยสามารถคือ จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จต่อจำนวนสล็อตการจองที่มีในระบบ การคำนวณหาจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองของเทคนิคที่นำเสนอสามารถทำได้โดยอาศัยวิธีวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ เนื้อหาในบทนี้จะเริ่มต้นด้วยการอธิบายหลักการดำเนินงานของเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอ พร้อมทั้งกรณีตัวอย่างซึ่งมีจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนสล็อตการจองในระบบไม่มากนัก เพื่อให้สามารถเข้าใจหลักการในการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ และนำไปสู่ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์รูปทั่วไป แสดงในพจน์ของจำนวนผู้ใช้บริการ (M) จำนวนสล็อตการจอง (N) และจำนวนของโทเค็นการจอง (T)

3.1 เทคนิคการใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมแบบค่าคงที่

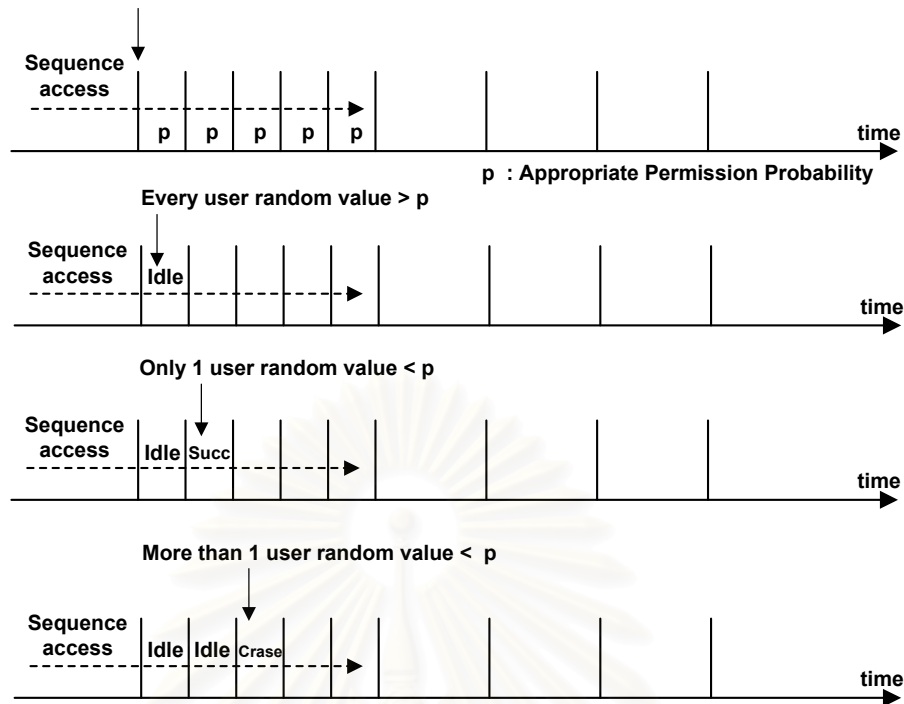
(Multi-Token Cascade Fixed Probability : MT-CFP)

จากการศึกษาเทคนิคการกำหนดค่าโอกาสในการเข้าของช่องสัญญาณ ซึ่งได้กล่าวโดยรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.4 พบว่าค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอง (p) เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อสมรรถนะของระบบ การเลือกค่านี้นี้จึงต้องเลือกอย่างเหมาะสม ถ้าค่า p มีค่ามากเกินไปจะทำให้ผู้ใช้บริการเกือบทั้งหมดจะเข้าจองในสล็อตการจองอันดับแรก ๆ ซึ่งจะทำให้ผู้ใช้บริการเกิดการชน หลังจากนั้นผู้ใช้บริการที่เหลืออยู่จำนวนน้อยจะเข้าจองในสล็อตที่เหลือส่งผลให้จำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจองมีเพียงเล็กน้อยเนื่องจากการชนกันในสล็อตการจองแรก ๆ ในทางตรงกันข้ามถ้าค่า p มีค่าน้อยเกินไป ทำให้แทบจะไม่มีผู้ใช้บริการคนใดตัดสินใจเข้าจอง สล็อตการจองจำนวนมากจะไม่ถูกใช้ และจำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจองคาดว่าจะมีเพียงเล็กน้อยเช่นกัน เพราะสล็อตการจองมีการใช้งานน้อยเกินไป

ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวและเพื่อให้ระบบได้รับสมรรถนะสูงสุดในช่วงการจองวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอ “เทคนิคการใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมแบบค่าคงที่”

3.1.1 หลักการทำงานของเทคนิค MT-CFP

เทคนิคนี้จะใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมค่าหนึ่งในแต่ละเฟรม (ช่วงการจอง) โดยค่านี้นี้จะเท่ากันสำหรับผู้ใช้บริการทุกคน และเท่ากันตลอดทุกสล็อตการจองในเฟรมนั้น ๆ เมื่อขึ้นเฟรมใหม่จะคำนวณค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมค่าใหม่ ซึ่งจะหาโดยพิจารณาจากจำนวนผู้ใช้บริการที่ต้องการจอง ณ เวลาเริ่มต้นในแต่ละเฟรม จำนวนสล็อตการจองที่มีอยู่ในแต่ละช่วงการจอง และจำนวนของโทเค็นที่กำหนดโดยสถานีฐาน โดยกำหนดให้ผู้ใช้บริการแต่ละคนเข้าจองในแต่ละสล็อตการจองตามลำดับจากสล็อตแรกถึงสุดท้าย (Cascade) ในแต่ละสล็อตการจองผู้ใช้บริการจะตัดสินใจว่าจะเข้าจองหรือไม่ด้วยความน่าจะเป็นที่แน่นอนค่าหนึ่ง (Fixed Probability) และผู้ใช้บริการแต่ละคนมีสิทธิ์ที่จะเข้าจองช่องสัญญาณได้เท่ากับจำนวนของโทเค็นที่มีอยู่ (Multi - Token) แต่มีข้อกำหนดว่าผู้ใช้บริการหนึ่งรายจะสามารถประสบความสำเร็จในการจองได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น ซึ่งจะเรียกวิธีนี้ว่า “Multi - Token Cascade Fixed Probability” หรือ “MT-CFP” กลไกการทำงานของเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ MT-CFP แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กลไกการทำงานของเทคนิคการจองแบบ Multi-Token Cascade Fixed Probability (MT-CFP)

3.1.2 แนวทางการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิค MT-CFP

หัวข้อนี้เป็นแนวทางการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ เพื่อคำนวณหาจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง และค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจองช่องสัญญาณ เนื่องจากเทคนิคการใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมแบบค่าคงที่ของระบบที่ใช้โทเค็นหลายอัน มีรากฐานมาจากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ใช้โทเค็นเพียง 1 อัน เนื้อหาในส่วนแรกนี้ จึงขอเสนอหลักการและการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิคการใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมแบบค่าคงที่ของระบบที่ใช้โทเค็น 1 อัน (Cascade Fixed Probability : CFP) เพื่อประกอบความเข้าใจและนำไปสู่การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ในรูปทั่วไปของระบบที่ใช้โทเค็นหลายอันในลำดับต่อไป

3.1.2.1 แนวทางการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิค CFP

เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจในหลักการและแนวทางการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สำหรับเทคนิค CFP ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้โทเค็นการจองเพียง 1 อัน จึงจะขอยกตัวอย่างระบบในกรณีที่มีจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนสล๊อตการจองไม่มากนัก ซึ่งจะเป็นแนวทางของการวิเคราะห์ระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนสล๊อตการจองใด ๆ ในลำดับต่อไป

กำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จะใช้ในการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สำหรับเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็น 1 อัน ดังนี้

M	แทนจำนวนของผู้ใช้บริการในระบบ
N	แทนจำนวนสล๊อตการจองที่เหลืออยู่
p	แทนค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจองหรือส่งโทเค็นการจอง (Permission Probability)
k	แทนจำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จ
$\Pr[k M, N, p]$	แทนความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการ k คนประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อมีผู้ใช้บริการ M คน จำนวนสล๊อตการจอง N สล๊อต และผู้ใช้บริการตัดสินใจเข้าจองด้วยค่าความน่าจะเป็น p
$T[M, N, p]$	แทนจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จ เมื่อมีผู้ใช้บริการ M คน จำนวนสล๊อตการจอง N สล๊อต และผู้ใช้บริการตัดสินใจเข้าจองด้วยค่าความน่าจะเป็น p

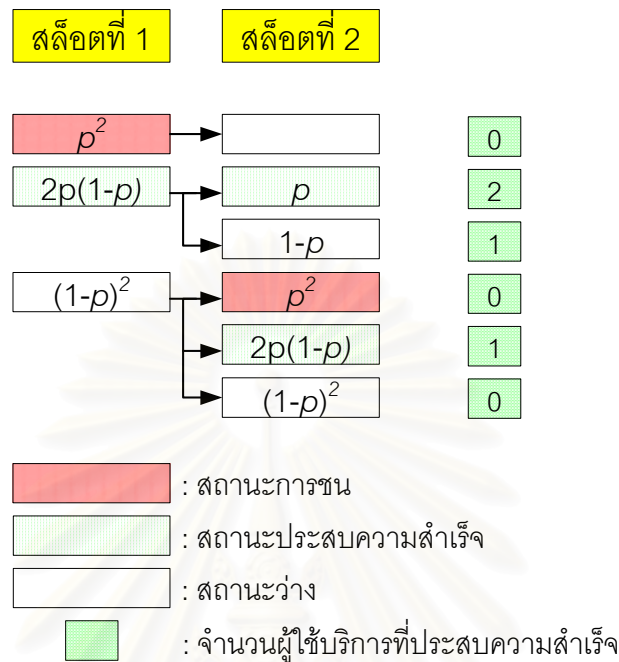
3.1.2.1.1 ระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน และสล๊อตการจอง 2 สล๊อต

ระบบนี้ เมื่อพิจารณาสล๊อตการจองแรก พบว่ามีเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ 3 เหตุการณ์ คือ

- ผู้ใช้บริการทั้ง 2 คนเข้าจองพร้อมกัน ดังนั้นเกิดการชนกันทำให้ไม่มีผู้ใช้บริการคนใดประสบความสำเร็จในการจอง และในสล๊อตการจองถัดไปจะไม่เหลือผู้ใช้บริการที่มีสิทธิเข้าจอง เพราะผู้ใช้ทั้งคู่ใช้สิทธิไปแล้ว
- มีผู้ใช้บริการ 1 คนเข้าจอง ดังนั้นผู้ใช้บริการจะประสบความสำเร็จในการจอง และในสล๊อตการจองถัดไปจะเหลือผู้ใช้บริการที่ยังมีสิทธิเข้าจองอีก 1 คน
- ไม่มีผู้ใช้บริการคนใดเข้าจอง ดังนั้นในสล๊อตการจองการจองถัดไปจะมีเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ 3 เหตุการณ์เหมือนสล๊อตการจองแรก

ตัวอย่างของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน และจำนวนสล๊อตการจอง 2 สล๊อต เมื่อผู้ใช้บริการตัดสินใจเข้าจองด้วยค่าความน่าจะเป็น p สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าในแต่ละสล๊อตการจองมีสถานะที่เกิดขึ้นได้ 3 สถานะคือ สถานะว่างเมื่อไม่มีผู้ใช้บริการ

คนใดเข้าจอง สถานะประสบความสำเร็จเมื่อผู้ใช้บริการตัดสินใจเข้าจอง และสถานะเกิดการชนเมื่อผู้ใช้บริการเข้าจองพร้อมกัน



รูปที่ 3.2 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีผู้ใช้บริการ 2 คน และจำนวนสล๊อตการจอง 2 สล๊อต

ดังนั้นความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการ k คนประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อมีผู้ใช้บริการ 2 คน จำนวนสล๊อตการจอง 2 สล๊อต และผู้ใช้บริการตัดสินใจเข้าจองด้วยค่าความน่าจะเป็น p ($\Pr[k | 2, 2, p]$) โดยที่ $k = 0, 1, 2$ สามารถหาได้ดังนี้

กรณีที่ $k = 0$: ความน่าจะเป็นที่ไม่มีผู้ใช้บริการคนใดเลยประสบความสำเร็จในการจอง คือ

$$\begin{aligned} \Pr[0 | 2, 2, p] &= p^2 + (1-p)^2 \times p^2 + (1-p)^2 \times (1-p)^2 \\ &= p^2 + p^2(1-p)^2 + (1-p)^4 \end{aligned} \quad (3.1)$$

กรณีที่ $k = 1$: ความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการ 1 คนประสบความสำเร็จในการจอง คือ

$$\begin{aligned} \Pr[1 | 2, 2, p] &= 2p(1-p) \times (1-p) + (1-p)^2 \times 2p(1-p) \\ &= 2p(1-p)^2 + 2p(1-p)^3 \end{aligned} \quad (3.2)$$

กรณีที่ $k = 2$: ความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการ 2 คนประสบความสำเร็จในการจอง คือ

$$\Pr[2 | 2, 2, p] = 2p(1-p) \times p = 2p^2(1-p) \quad (3.3)$$

ระบบที่มีผู้ให้บริการ 2 คน จำนวนสล๊อตการจอง 2 สล๊อต และผู้ให้บริการตัดสินใจเข้าจองด้วยค่าความน่าจะเป็น p จะหาจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จได้คือ

$$T[2,2,p] = 0 \cdot \Pr[0|2,2,p] + 1 \cdot \Pr[1|2,2,p] + 2 \cdot \Pr[2|2,2,p] \quad (3.4)$$

เมื่อ $\Pr[0|2,2,p]$, $\Pr[1|2,2,p]$ และ $\Pr[2|2,2,p]$ เป็นไปตามสมการ (3.1), (3.2) และ (3.3) ตามลำดับ

ดังนั้น จำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณในระบบที่มีผู้ให้บริการ 2 คน และสล๊อตการจอง 2 สล๊อต คือ

$$\begin{aligned} T[2,2,p] &= 0 + [2p(1-p)^2 + 2p(1-p)^3] + [2 \times 2p^2(1-p)] \quad (3.5) \\ &= 2p(1-p)^2 + 2p(1-p)^3 + 4p^2(1-p) \end{aligned}$$

ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทเค็นการจอง สำหรับระบบนี้ซึ่งมีผู้ให้บริการ 2 คน และสล๊อตการจอง 2 สล๊อต คือ ค่าที่ทำให้อนุพันธ์ของสมการ (3.5) เทียบกับ p เป็นศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (3.6)

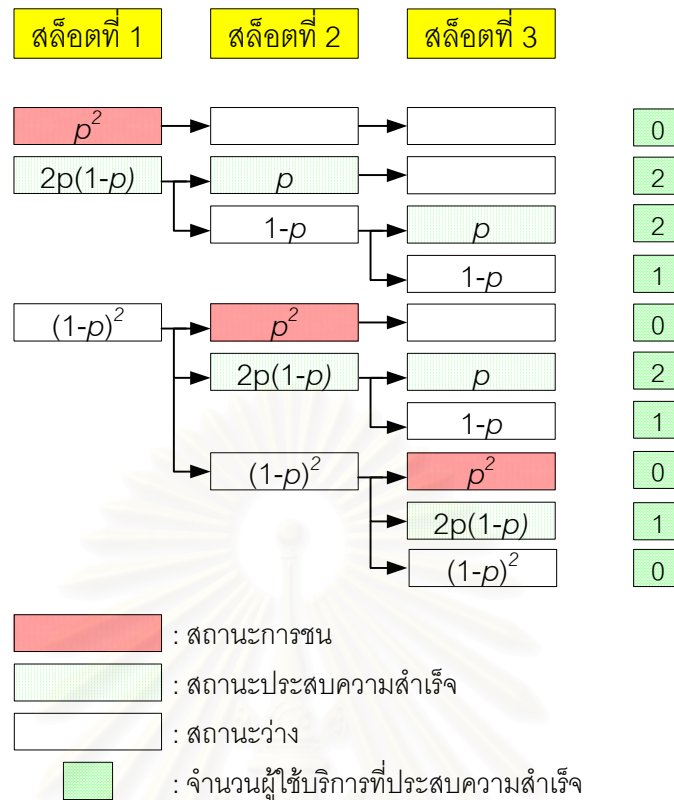
$$\frac{\partial}{\partial p} T[2,2,p] = \frac{\partial}{\partial p} [2p(1-p)^2 + 2p(1-p)^3 + 4p^2(1-p)] = 0 \quad (3.6)$$

$$\text{จะได้ } 2p^3 - 3p^2 + 3p - 1 = 0 \quad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.7) สามารถหาคำตอบได้จำนวน 3 ราก ได้แก่ 0.5, $\frac{1 \pm \sqrt{3}i}{2}$ ซึ่งรากคำตอบที่เหมาะสมคือรากคำตอบที่เป็นจำนวนจริง เพราะฉะนั้น จะได้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทเค็นการจอง สำหรับระบบนี้ซึ่งมีผู้ให้บริการ 2 คน และสล๊อตการจอง 2 สล๊อต คือ $p = 0.5$

3.1.2.1.2 ระบบที่มีผู้ให้บริการ 2 คน และสล๊อตการจอง 3 สล๊อต

ระบบนี้ เมื่อพิจารณาสล๊อตการจองแรก พบว่ามีเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ 3 เหตุการณ์ เช่นเดียวกันกับในกรณีของระบบที่มีผู้ให้บริการ 2 คน และสล๊อตการจอง 2 สล๊อต คือ สถานะว่าง เมื่อไม่มีผู้ให้บริการคนใดเข้าจอง สถานะประสบความสำเร็จเมื่อผู้ให้บริการ 1 คนตัดสินใจเข้าจอง และสถานะเกิดการชนเมื่อผู้ให้บริการเข้าจองพร้อมกัน ตัวอย่างของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีผู้ให้บริการ 2 คน และจำนวนสล๊อตการจอง 3 สล๊อต เมื่อผู้ให้บริการตัดสินใจเข้าจองด้วยค่าความน่าจะเป็น p สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีผู้ใช้บริการ 2 คน และจำนวนสล๊อตการจอบ 3 สล๊อต

ดังนั้นความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการ k คนประสบความสำเร็จในการจอบ เมื่อมีผู้ใช้บริการ 2 คน จำนวนสล๊อตการจอบ 3 สล๊อต และผู้ใช้บริการตัดสินใจเข้าจอบด้วยค่าความน่าจะเป็น p ($\Pr[k | 2,3, p]$) โดยที่ $k = 0,1,2$ สามารถหาได้ดังนี้

กรณีที่ $k = 0$: ความน่าจะเป็นที่ไม่มีผู้ใช้บริการคนใดเลยประสบความสำเร็จในการจอบ คือ

$$\Pr[0 | 2,3, p] = p^2 + p^2(1-p)^2 + p^2(1-p)^4 + (1-p)^6 \quad (3.8)$$

กรณีที่ $k = 1$: ความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการ 1 คนประสบความสำเร็จในการจอบ คือ

$$\Pr[1 | 2,3, p] = 2p(1-p)^3 + 2p(1-p)^4 + 2p(1-p)^5 \quad (3.9)$$

กรณีที่ $k = 2$: ความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการ 2 คนประสบความสำเร็จในการจอบ คือ

$$\Pr[2 | 2,3, p] = 2p^2(1-p) + 2p^2(1-p)^2 + 2p^2(1-p)^3 \quad (3.10)$$

ระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน จำนวนสล๊อตการจอบ 3 สล๊อต และผู้ใช้บริการตัดสินใจเข้าจอบด้วยค่าความน่าจะเป็น p จะหาจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จได้คือ

$$T[2,3,p] = 0 \cdot \Pr[0 | 2,3,p] + 1 \cdot \Pr[1 | 2,3,p] + 2 \cdot \Pr[2 | 2,3,p] \quad (3.11)$$

เมื่อ $\Pr[0 | 2,3,p]$, $\Pr[1 | 2,3,p]$ และ $\Pr[2 | 2,3,p]$ เป็นไปตามสมการ (3.8), (3.9) และ (3.10) ตามลำดับ

จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณ ในระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน และสล๊อตการจอง 3 สล๊อต คือ

$$T[2,3,p] = 2p(1-p)^3 + 2p(1-p)^4 + 2p(1-p)^5 + 4p^2(1-p) + 4p^2(1-p)^2 + 4p^2(1-p)^3 \quad (3.12)$$

ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทรเค้นการจอง สำหรับระบบนี้ซึ่งมีผู้ใช้บริการ 2 คน และสล๊อตการจอง 3 สล๊อต คือ ค่าที่ทำให้อนุพันธ์ของสมการ (3.12) เทียบกับ p เป็นศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (3.13)

$$\frac{\partial}{\partial p} T[2,3,p] = 0$$

$$\text{จะได้ } 6p^5 - 20p^4 + 28p^3 - 21p^2 + 12p - 3 = 0 \quad (3.13)$$

จากสมการที่ (3.13) สามารถหารากคำตอบของสมการได้ด้วยวิธีการหารสังเคราะห์ ซึ่งพบว่าอาจต้องใช้เวลาในการแทนค่าพหุสมการ สำหรับการหาคำตอบของพหุนาม (Polynomial) มีฟังก์ชันในโปรแกรม MATLAB ที่สนับสนุน คือ ฟังก์ชัน roots วิธีการคำนวณคำตอบของสมการที่ (3.13) สามารถกระทำได้ดังนี้

$$p = [6 \ -20 \ 28 \ -21 \ 12 \ -3];$$

$$r = \text{roots}(p)$$

$$r = \begin{matrix} 1.2956 + 0.6350i \\ 1.2956 - 0.6350i \\ 0.1448 + 0.7140i \\ 0.1448 - 0.7140i \\ 0.4526 \end{matrix}$$

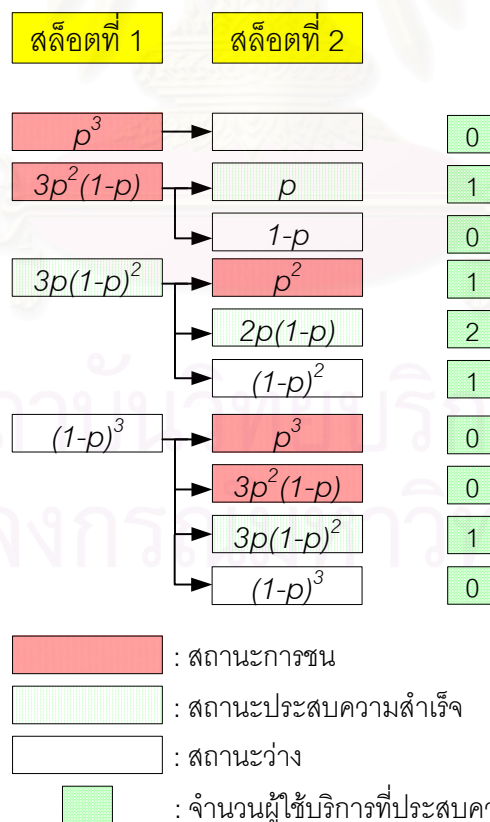
จากสมการที่ (3.13) หารากคำตอบได้จำนวน 5 ราก ซึ่งรากคำตอบที่เหมาะสมคือรากคำตอบที่เป็นจำนวนจริง เพราะฉะนั้น จะได้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทรเค้นการจอง สำหรับระบบนี้ซึ่งมีผู้ใช้บริการ 2 คน และสล๊อตการจอง 3 สล๊อต คือ $p = 0.4526$

3.1.2.1.3 ระบบที่มีผู้ให้บริการ 3 คน และสล๊อตการจอง 2 สล๊อต

ระบบนี้ เมื่อพิจารณาสล๊อตการจองแรกมีเหตุการณ์เกิดขึ้นได้ 4 เหตุการณ์ คือ

- ผู้ให้บริการทั้ง 3 คนเข้าจองพร้อมกัน ดังนั้นเกิดการชนกันทำให้ไม่มีผู้ให้บริการคนใดประสบความสำเร็จในการจอง และในสล๊อตการจองถัดไปจะไม่เหลือผู้ให้บริการที่จะมีสิทธิเข้าจอง เพราะผู้ให้บริการทั้งหมดใช้สิทธิไปแล้ว
- มีผู้ให้บริการ 2 คนเข้าจอง ดังนั้นเกิดการชนกันผู้ให้บริการจึงไม่ประสบความสำเร็จในการจอง และในสล๊อตการจองถัดไปจะเหลือผู้ให้บริการที่ยังมีสิทธิเข้าจองอีก 1 คน
- มีผู้ให้บริการ 1 คนเข้าจอง ดังนั้นผู้ให้บริการจะประสบความสำเร็จในการจอง และในสล๊อตการจองถัดไปจะเหลือผู้ให้บริการที่ยังมีสิทธิเข้าจองอีก 2 คน
- ไม่มีผู้ให้บริการคนใดเข้าจอง ดังนั้นในสล๊อตการจองการจองถัดไปจะมีเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ 4 เหตุการณ์เหมือนสล๊อตการจองแรก

ตัวอย่างของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีผู้ให้บริการ 3 คน และจำนวนสล๊อตการจอง 2 สล๊อต เมื่อผู้ให้บริการตัดสินใจเข้าจองด้วยค่าความน่าจะเป็น p สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีผู้ให้บริการ 3 คน และจำนวนสล๊อตการจอง 2 สล๊อต

ดังนั้นความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการ k คนประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อมีผู้ใช้บริการ 3 คน จำนวนสล๊อตการจอง 2 สล็อต และผู้ใช้บริการตัดสินใจเข้าจองด้วยค่าความน่าจะเป็น p ($\Pr[k | 3,2, p]$) โดยที่ $k = 0,1,2,3$ สามารถหาได้ดังนี้

กรณีที่ $k = 0$: ความน่าจะเป็นที่ไม่มีผู้ใช้บริการคนใดเลยประสบความสำเร็จในการจอง คือ

$$\Pr[0 | 3,2, p] = p^3 + 3p^2(1-p)^2 + p^3(1-p)^3 + 3p^2(1-p)^4 + (1-p)^6 \quad (3.14)$$

กรณีที่ $k = 1$: ความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการ 1 คนประสบความสำเร็จในการจอง คือ

$$\Pr[1 | 3,2, p] = 3p^3(1-p) + 3p^3(1-p)^2 + 3p(1-p)^4 + 3p(1-p)^5 \quad (3.15)$$

กรณีที่ $k = 2$: ความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการ 2 คนประสบความสำเร็จในการจอง คือ

$$\Pr[2 | 3,2, p] = 6p^2(1-p)^3 \quad (3.16)$$

กรณีที่ $k = 3$: ความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการ 3 คนประสบความสำเร็จในการจอง คือ

$$\Pr[3 | 3,2, p] = 0 \quad (3.17)$$

ระบบที่มีผู้ใช้บริการ 3 คน จำนวนสล๊อตการจอง 2 สล็อต และผู้ใช้บริการตัดสินใจเข้าจองด้วยค่าความน่าจะเป็น p จะหาจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จได้คือ

$$T[3,2, p] = 0 \cdot \Pr[0 | 3,2, p] + 1 \cdot \Pr[1 | 3,2, p] + 2 \cdot \Pr[2 | 3,2, p] \quad (3.18)$$

เมื่อ $\Pr[0 | 3,2, p]$, $\Pr[1 | 3,2, p]$, $\Pr[2 | 3,2, p]$ และ เป็นไปตามสมการ (3.14), (3.15), (3.16) และ (3.17) ตามลำดับ

จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองของสถานีวิทยุ ในระบบที่มีผู้ใช้บริการ 3 คน และสล๊อตการจอง 2 สล็อต คือ

$$T[3,2, p] = 3p^3(1-p) + 3p^3(1-p)^2 + 3p(1-p)^4 + 3p(1-p)^5 + 12p^2(1-p)^3 \quad (3.19)$$

ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทเค็นการจอง สำหรับระบบนี้ซึ่งมีผู้ใช้บริการ 3 คน และสล๊อตการจอง 2 สล็อต คือ ค่าที่ทำให้อนุพันธ์ของสมการ (3.19) เทียบกับ p เป็นศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (3.20)

$$\frac{\partial}{\partial p} T[3,2, p] = 0$$

$$\text{จะได้ } 6p^5 - 15p^4 + 20p^3 - 18p^2 + 10p - 2 = 0 \quad (3.20)$$

สามารถหาคำราคำตอบได้ทั้งหมด 5 คำ ได้แก่ $0.1817 + 0.9706i$, $0.1817 - 0.9706i$, $0.8852 + 0.3873i$, $0.8852 - 0.3873i$ และ 0.3662 เพราะฉะนั้น จะได้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทรเค้นการจ้อง สำหรับระบบนี้ซึ่งมีผู้ใช้บริการ 3 คน และสล็ตการจ้อง 2 สล็ต คือ $p = 0.3662$

จากกรณีของระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนสล็ตการจ้องตามที่ได้ยกตัวอย่างทั้ง 3 กรณีข้างต้น พบว่าค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมสำหรับการส่งโทรเค้นการจ้องขึ้นกับจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนสล็ตการจ้องที่มีอยู่ในระบบ ในส่วนของจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละระบบจะมีค่าขึ้นกับจำนวนของผู้ใช้บริการที่มีอยู่ในระบบ โดยจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจะมีค่าเท่ากับ $M + 1$ เหตุการณ์ เมื่อ M แทนจำนวนของผู้ใช้บริการในระบบ โดยที่สามารถแบ่งกลุ่มเหตุการณ์ได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

- การว่าง (Idle) เกิดขึ้นเมื่อไม่มีผู้ใช้บริการรายใดเข้าจ้องช่องสล็ตการจ้อง
- การสำเร็จ (Success) เกิดขึ้นเมื่อมีผู้ใช้บริการเพียง 1 ราย เข้าจ้องช่องสล็ตการจ้อง
- การชนกัน (Collision) เกิดขึ้นเมื่อมีผู้มใช้บริการมากกว่า 1 ราย เข้าจ้องช่องสล็ตการจ้อง

นอกจากนี้ตัวแปรที่ถือว่ามีค่าสำคัญมากคือ $\Pr[k | M, N, p]$ ซึ่งนิยามว่าเป็นค่าความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการ k คนประสบความสำเร็จในการจ้องช่องสล็ตการจ้องในระบบที่มีผู้ใช้บริการ M คนและสล็ตการจ้อง N สล็ต จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าของ \Pr มีลักษณะการเกิดขึ้นอย่างมีรูปแบบ ซึ่งลักษณะดังกล่าวทำให้สามารถเขียน \Pr ในรูปของรีเคอร์ซีฟ (Recursive Formula) ได้ ดังจะกล่าวในรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

3.1.2.1.4 ระบบที่มีผู้ใช้บริการ M คน และสล็ตการจ้อง N สล็ต

เมื่อพิจารณาระบบที่มีผู้ใช้บริการที่เข้าจ้องช่องสล็ตการจ้องจำนวน M รายและสล็ตการจ้องจำนวน N สล็ต กำหนดค่าโอกาสในการเข้าจ้องช่องสล็ตการจ้องเท่ากับ p พบว่าเหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นเมื่อพิจารณาช่องสล็ตการจ้องช่องใด ๆ เป็นไปได้ 3 กรณีคือ

- การว่าง เกิดเนื่องจากไม่มีผู้ใช้บริการรายใดในระบบเข้าจ้องช่องสล็ตการจ้อง โดยความน่าจะเป็นที่ช่องสล็ตการจ้องจะเกิดการว่าง $= b[M, 0, p]$
- การสำเร็จ เกิดเนื่องจากมีผู้ใช้บริการเพียงรายเดียวในระบบเข้าจ้องช่องสล็ตการจ้อง โดยความน่าจะเป็นที่ช่องสล็ตการจ้องจะเกิดการสำเร็จ $= b[M, 1, p]$

- การชน เกิดเนื่องจากมีผู้ใช้บริการตั้งแต่ 2 รายขึ้นไปเข้าจองช่องสัญญาณพร้อมกัน โดยความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะเกิดการชน $= \sum_{i=2}^M b[M, i, p]$

$$\text{โดยที่ } b[m, i, x] = \binom{m}{i} x^i (1-x)^{m-i}$$

จากค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นในช่องสัญญาณจองช่องใด ๆ จะสามารถหาค่าความน่าจะเป็นที่จะมีผู้ใช้บริการจำนวน k รายสามารถจองช่องสัญญาณสำเร็จ โดยอาศัยหลักการรีเคอร์ซีฟดังนี้

$$\begin{aligned} P_{CFP}[k | M, N] &= b[M, 0, p] P_{CFP}[k | M, N - 1] \\ &+ b[M, 1, p] P_{CFP}[k - 1 | M - 1, N - 1] \\ &+ \sum_{i=2}^M b[M, i, p] P_{CFP}[k | M - i, N - 1] \end{aligned} \quad (3.21)$$

โดยที่ $P_{CFP}[k | M, N]$ คือ ค่าความน่าจะเป็นที่จะมีผู้ใช้บริการ k รายสามารถจองช่องสัญญาณได้สำเร็จ จากระบบที่ประกอบด้วยผู้ใช้บริการจำนวน M ราย สล็อตการจองจำนวน N สล็อต กำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณเท่ากับ p และกำหนดค่าเริ่มต้นหรือเงื่อนไขขอบ (Boundary Condition) ของสมการ (3.21) ไว้ดังนี้

$$P_{CFP}[k | M, N] = \begin{cases} 0 & \text{if } k < 0, M \geq 0, N \geq 0 \\ 1 & \text{if } k = 0, M \geq 0, N = 0 \\ 0 & \text{if } k > 0, M \geq 0, N = 0 \\ 1 & \text{if } k = 0, M = 0, N \geq 0 \\ 0 & \text{if } k > 0, M = 0, N \geq 0 \end{cases}$$

นอกจากนี้จะสามารถนำค่าความน่าจะเป็นที่จะมีผู้ใช้บริการจองช่องสัญญาณสำเร็จกรณีต่าง ๆ มาคำนวณหาค่าวิสัยสามารถของระบบ ($T_{CFP}[M, N]$) ซึ่งนิยามว่าเป็นจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่จองช่องสัญญาณได้สำเร็จ ได้จากสมการ (3.22)

$$T_{CFP}[M, N] = \sum_{j=0}^M (j \times P_{CFP}[j | M, N]) \quad (3.22)$$

สำหรับค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้บริการ คือค่า p ที่ทำให้อนุพันธ์ของสมการ (3.22) เทียบกับ p เป็นศูนย์ ($\frac{\partial}{\partial p} T_{CFP}[M, N] = 0$) และทำให้ค่าวิสัยสามารถของระบบสูงสุด

นอกจากนี้ ยังสามารถหาสมรรถนะของวิธี CFP ด้วยหลักการรีเคอร์ซีฟในรูปของจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากในแต่ละสล็อตการจองจะมีผู้ให้บริการเพียงคนเดียวที่สามารถประสบความสำเร็จในการจอง ซึ่งจะเกิดเมื่อไม่มีผู้ให้บริการคนอื่นยกเว้นผู้ให้บริการคนนี้เข้าจอง พิจารณาสล็อตการจองแรกจะมีเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ 3 เหตุการณ์คือ

กรณี $i = 0$: ไม่มีผู้ให้บริการคนใดเลยเข้าจอง สล็อตการจองจะอยู่ในสถานะว่าง และในสล็อตการจองถัดไปมีผู้ให้บริการเหลืออยู่เท่าเดิม M คน ดังนั้นจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของกรณีนี้หาได้จากผลคูณของความน่าจะเป็นที่เกิดเหตุการณ์ ($b[M,0,p]$) กับจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในสล็อตการจองถัดไป ($T[M,N-1,p]$)

$$b[M,0,p] \cdot T[M,N-1,p] \quad (3.23)$$

กรณี $i = 1$: มีผู้ให้บริการเพียงคนเดียวเข้าจอง ผู้ให้บริการจะประสบความสำเร็จในการจอง และในสล็อตการจองถัดไปมีจำนวนผู้ให้บริการเหลือ $M - 1$ คน ดังนั้นจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของกรณีนี้หาได้จากผลคูณของความน่าจะเป็นที่เกิดเหตุการณ์ ($b[M,1,p]$) กับผลรวมของ 1 และจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในสล็อตการจองถัดไป ($1 + T[M-1,N-1,p]$) เมื่อ 1 เป็นจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จที่เพิ่มขึ้นเพราะมีผู้ให้บริการประสบความสำเร็จในการจอง 1 คน

$$b[M,1,p] \cdot (1 + T[M-1,N-1,p]) \quad (3.24)$$

กรณี $i > 1$: มีผู้ให้บริการมากกว่าหนึ่งคนเข้าจอง จึงเกิดการชนกันทำให้ผู้ให้บริการทั้ง i คนไม่ประสบความสำเร็จในการจอง และในสล็อตการจองถัดไปมีจำนวนผู้ให้บริการเหลือ $M - i$ คน ดังนั้นจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของกรณีนี้หาได้จากผลคูณของความน่าจะเป็นที่เกิดเหตุการณ์ ($b[M,i,p]$) กับจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในสล็อตการจองถัดไป ($T[M-i,N-1,p]$)

$$b[M,i,p] \cdot T[M-i,N-1,p] \quad (3.25)$$

ดังนั้นในระบบที่มีผู้ให้บริการ M คน จำนวนสล็อตการจอง N สล็อต และผู้ให้บริการตัดสินใจเข้าจองด้วยค่าความน่าจะเป็น p จะหาจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จด้วยหลักการรีเคอร์ซีฟในรูปของ T ได้คือ

$$\begin{aligned}
T[M, N, p] &= b[M, 0, p] \cdot T[M, N-1, p] \\
&+ b[M, 1, p] \cdot (1 + T[M-1, N-1, p]) \\
&+ \sum_{i=2}^M b[M, i, p] \cdot T[M-i, N-1, p] \\
&= b[M, 1, p] + \sum_{i=0}^M b[M, i, p] \cdot T[M-i, N-1, p]
\end{aligned} \tag{3.26}$$

เมื่อเงื่อนไขขอบเขตของสมการ (3.26) คือ

$$T[M, 0, p] = T[0, N, p] = 0 \tag{3.27}$$

ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทเค็นการจอง ($p_{CFP}[M, N]$) ในแต่ละเฟรม คือค่า p ที่ทำให้อนุพันธ์ของสมการ (3.26) เทียบกับ p เป็นศูนย์ ซึ่งค่า $p_{CFP}[M, N]$ ที่ได้จะทำให้ได้จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยสูงสุดที่ประสบความสำเร็จ ($T_{CFP}[M, N]$)

3.1.2.2 แนวทางการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิค MT-CFP

แนวทางการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิค MT-CFP ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้โทเค็นหลายอัน สามารถวิเคราะห์ได้โดยการเขียนแผนภาพและวิเคราะห์เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ในแต่ละสล็อตการจอง เช่นเดียวกับเทคนิคที่ใช้โทเค็นเพียง 1 อัน แต่จะมีความแตกต่างในบางประเด็นของการวิเคราะห์ ได้แก่

- จำนวนของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสล็อตการจอง พบว่าในระบบที่ใช้โทเค็นเพียง 1 อัน ไม่จำเป็นต้องพิจารณาลำดับของผู้ใช้บริการว่าผู้ใช้บริการคนใดเป็นผู้เข้าจองช่องสัญญาณ แต่ในระบบที่ใช้โทเค็นหลายอัน จำเป็นที่จะต้องพิจารณาลำดับของผู้ใช้บริการ ทั้งนี้เพื่อการตรวจสอบว่าผู้ใช้บริการรายนั้น ๆ เหลือโทเค็นจำนวนเท่าใดจากที่ได้กล่าวไปแล้วในระบบที่ใช้โทเค็น 1 อันจะมีจำนวนของเหตุการณ์คือ $M + 1$ เมื่อ M คือจำนวนผู้ใช้บริการในระบบ แต่ระบบที่ใช้โทเค็นหลายอัน มีการพิจารณาลำดับของผู้ใช้บริการ พบว่าจำนวนของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสล็อตการจองมีค่าเท่ากับ 2^M เหตุการณ์
- สถานะของการประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณ เนื่องจากบนพื้นฐานของโครงข่ายระบบสื่อสารไร้สายความเร็วสูง ที่มีค่าประวิงเวลาการแพร่กระจายครบรอบมากกว่าค่าประวิงเวลาการส่งสัญญาณข้อมูลข่าวสาร ทำให้ผู้ใช้บริการไม่มีโอกาสทราบผลการจองได้ทันในช่วงเวลาการจอง เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบที่ใช้โทเค็น

หลายอัน พบว่าไม่ว่าจะส่งโทเค็นการจองจำนวนเท่าใดก็ตามในช่วงเวลาการจอง ก็ไม่สามารถทราบผลการจองได้ทันในช่วงเวลาการจอง และสำหรับผู้ใช้บริการ 1 ราย จะมีโทเค็นที่ประสบความสำเร็จในการจองเท่าใดก็ตาม ก็สามารถประสบความสำเร็จในการจองได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้น ด้วยเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ทำให้การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของระบบที่ใช้โทเค็นหลายอัน จำเป็นต้องมีตัวแปรเพื่อแสดงค่าของสถานะการจองของช่องสัญญาณก่อนหน้า

เพื่อเป็นการง่ายต่อความเข้าใจและมองภาพแนวทางการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นหลายอัน จึงได้นำเสนอโดยยกตัวอย่างกรณีของจำนวนผู้ใช้บริการ จำนวนสล๊อตการจอง และจำนวนโทเค็นการจองค่าต่าง ๆ ประกอบกับแผนภาพแสดงเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสล๊อตการจอง พร้อมทั้งการเปรียบเทียบกับเทคนิคการจองที่ใช้โทเค็น 1 อัน และได้กำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่จะใช้ในการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สำหรับเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นหลายอัน ดังนี้

M	แทนจำนวนของผู้ใช้บริการที่มีอยู่ในระบบ
N	แทนจำนวนสล๊อตการจองที่เหลืออยู่ในระบบ
R	แทนจำนวนของผู้ใช้บริการที่เหลืออยู่ในระบบ
p	แทนค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจองหรือส่งโทเค็นการจอง
k	แทนจำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จ
T_i	แทนจำนวนของโทเค็นของผู้ใช้บริการคนที่ i
S_i	แทนบิตแสดงสถานะของการประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณ
$S_i = "0"$	หมายความว่า ผู้ใช้บริการคนที่ i ยังไม่เคยประสบความสำเร็จในการจอง
$S_i = "1"$	หมายความว่า ผู้ใช้บริการคนที่ i เคยประสบความสำเร็จในการจองแล้ว

$$P[k | T_1, T_2, \dots, T_M, S_1, S_1, \dots, S_1, N]$$

แทนความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการ k คนประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อมีผู้ใช้บริการ M คน สล๊อตการจอง N สล๊อต โทเค็นในการจอง T อัน และบิตแสดงสถานะของผู้ใช้บริการแต่ละคนมีสถานะเป็น S

$T[M, N, T]$ แทนจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อมีผู้ใช้บริการ M คน สล็อตการจอง N สล็อต และโทเค็นการจอง T อัน

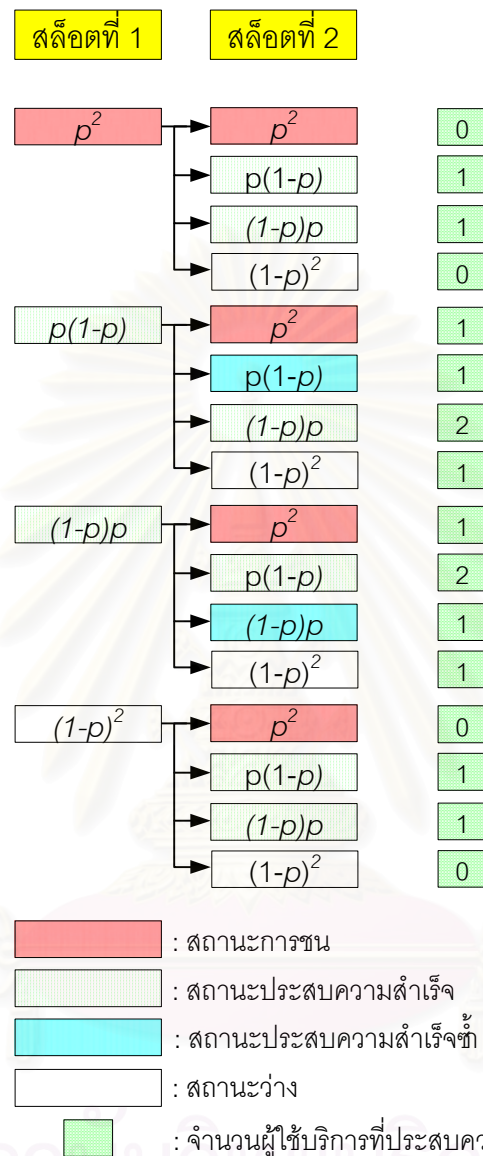
3.1.2.2.1 ระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 2 สล็อต และโทเค็นการจอง 2 อัน

ระบบนี้ ซึ่งเป็นระบบที่ใช้โทเค็นหลายอันมีการพิจารณาลำดับการเข้าจองของผู้ใช้บริการ เมื่อพิจารณาการจองครั้งแรก จะมีเหตุการณ์เกิดขึ้นได้ 2^M เหตุการณ์ ในกรณีนี้มีจำนวนผู้ใช้บริการ 2 คน ดังนั้นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในการจองครั้งแรกเท่ากับ 4 เหตุการณ์ คือ

- ผู้ใช้บริการทั้ง 2 คนเข้าจองพร้อมกัน ดังนั้นเกิดการชนกันทำให้ไม่มีผู้ใช้บริการคนใดประสบความสำเร็จในการจอง และในการจองถัดไปผู้ใช้บริการทั้ง 2 คน จะเหลือโทเค็นในการจองคนละ 1 โทเค็นและมีเหตุการณ์เกิดขึ้น 4 เหตุการณ์เหมือนการจองครั้งแรก
- ผู้ใช้บริการคนที่ 1 เข้าจอง ดังนั้นผู้ใช้บริการคนที่ 1 จะประสบความสำเร็จในการจอง และในการจองถัดไป ผู้ใช้บริการคนที่ 1 เหลือโทเค็นในการจอง 1 โทเค็นและผู้ใช้บริการคนที่ 2 เหลือโทเค็นในการจอง 2 โทเค็นและมีเหตุการณ์เกิดขึ้น 4 เหตุการณ์เหมือนการจองครั้งแรก
- ผู้ใช้บริการคนที่ 2 เข้าจอง ดังนั้นผู้ใช้บริการคนที่ 2 จะประสบความสำเร็จในการจอง และในการจองถัดไป ผู้ใช้บริการคนที่ 2 เหลือโทเค็นในการจอง 1 โทเค็นและผู้ใช้บริการคนที่ 1 เหลือโทเค็นในการจอง 2 โทเค็นและมีเหตุการณ์เกิดขึ้น 4 เหตุการณ์เหมือนการจองครั้งแรก
- ไม่มีผู้ใช้บริการคนใดเข้าจอง ดังนั้นในการจองถัดไป ผู้ใช้บริการทั้ง 2 คน เหลือโทเค็นในการจอง 2 อัน และมีเหตุการณ์เกิดขึ้น 4 เหตุการณ์เหมือนการจองครั้งแรก

ตัวอย่างของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน จำนวนการจอง 2 สล็อต และจำนวนโทเค็นการจอง 2 อัน เมื่อผู้ใช้บริการตัดสินใจเข้าจองด้วยค่าความน่าจะเป็น p สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าในแต่ละการจองมีสถานะที่เกิดขึ้นได้ 4 สถานะคือ สถานะว่างเมื่อไม่มีผู้ใช้บริการคนใดเข้าจอง สถานะประสบความสำเร็จเมื่อผู้ใช้บริการ 1 คนตัดสินใจเข้าจอง สถานะเกิดการชนเมื่อผู้ใช้บริการเข้าจองพร้อมกันและสถานะประสบความสำเร็จ

ในการจองซ้ำ เมื่อผู้ใช้บริการ 1 คน ตัดสินใจเข้าจองแต่เป็นผู้ใช้บริการคนเดิมที่เคยประสบความสำเร็จในการจองแล้ว



รูปที่ 3.5 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีผู้ใช้บริการ 2 คน สล๊อตการจอง 2 สล๊อต และจำนวนโทเค็นการจอง 2 อัน

จากแผนภาพเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสล๊อตการจอง พบว่ามีสถานะที่เพิ่มจากกรณีของเทคนิคที่ใช้โทเค็นเพียง 1 อัน คือสถานะที่จะเกิดการประสบความสำเร็จซ้ำของโทเค็นการจอง ซึ่งจะพบได้ในสล๊อตการจองที่ 2 ในกรณีเช่นนี้การนับจำนวนของผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณจะไม่มีกรบวกเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นฐานที่ได้กล่าวไปแล้วในข้างต้นว่า ผู้ใช้บริการแต่ละรายมีโอกาสที่จะประสบความสำเร็จในการจองได้คนละ 1 ครั้ง

ความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการ k คนประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อมีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 2 สล็อต และจำนวนโทเค็นการจอง 2 อัน โดยที่ผู้ใช้บริการทุกคนยังไม่เคยประสบความสำเร็จในการเข้าจอง ($P[k | 2,2,0,0,2]$) โดยที่ $k = 0,1,2$ สามารถหาได้ดังนี้

กรณีที่ $k = 0$: ความน่าจะเป็นที่ไม่มีผู้ใช้บริการคนใดเลยประสบความสำเร็จในการจอง คือ

$$P[0 | 2,2,0,0,2] = p^4 + 2p^2(1-p)^2 + (1-p)^4 \quad (3.28)$$

กรณีที่ $k = 1$: ความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้บริการ 1 คนประสบความสำเร็จในการจอง คือ

$$P[1 | 2,2,0,0,2] = 4p^3(1-p) + 2p^2(1-p)^2 + 4p(1-p)^3 \quad (3.29)$$

กรณีที่ $k = 2$: ความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้บริการ 2 คนประสบความสำเร็จในการจอง คือ

$$P[2 | 2,2,0,0,2] = 2p^2(1-p)^2 \quad (3.30)$$

ระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 2 สล็อต และจำนวนโทเค็นการจอง 2 อัน จะหาจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จได้คือ

$$T[2,2,2] = 0 \cdot P[0 | 2,2,0,0,2] + 1 \cdot P[1 | 2,2,0,0,2] + 2 \cdot P[2 | 2,2,0,0,2] \quad (3.31)$$

เมื่อ $P[0 | 2,2,0,0,2]$, $P[1 | 2,2,0,0,2]$ และ $P[2 | 2,2,0,0,2]$ เป็นไปตามสมการ (3.28), (3.29) และ (3.30) ตามลำดับ

จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองของสัญญาณ ในระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 2 สล็อต และจำนวนโทเค็นการจอง 2 อัน คือ

$$T[2,2,2] = 4p^3(1-p) + 6p^2(1-p)^2 + 4p(1-p)^3 \quad (3.32)$$

ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทเค็นการจอง สำหรับระบบนี้ซึ่งมีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 2 สล็อต และจำนวนโทเค็นการจอง 2 อัน คือ ค่าที่ทำให้อนุพันธ์ของสมการ (3.32) เทียบกับ p เป็นศูนย์ ดังแสดงในสมการที่ (3.33)

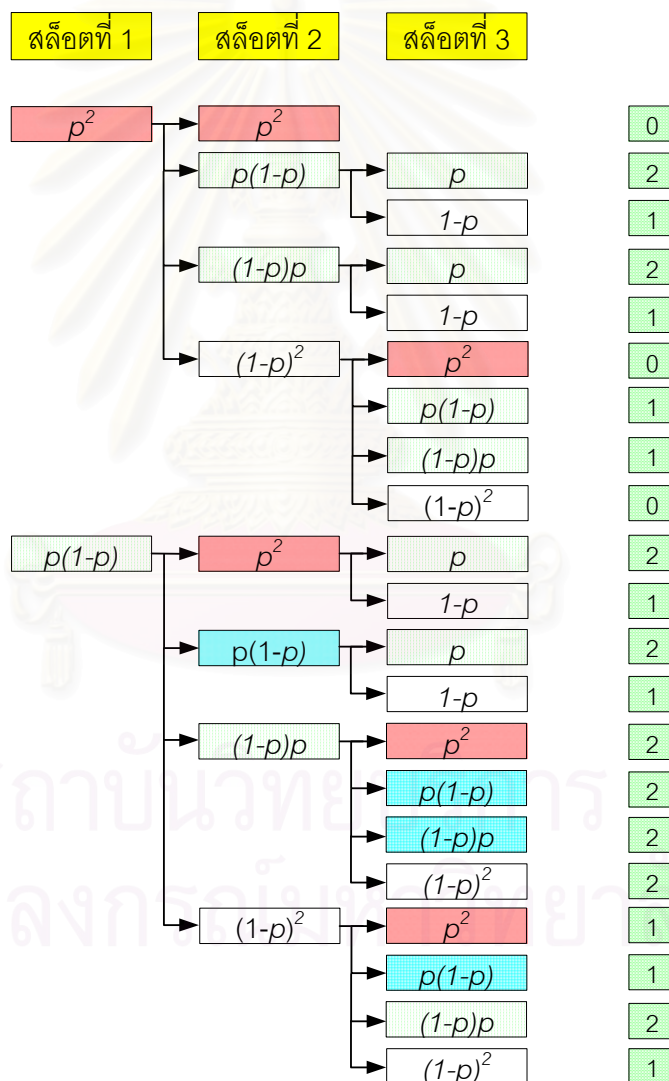
$$\frac{\partial}{\partial p} T[2,2,2] = 0$$

$$\text{จะได้ } 2p^3 - 3p^2 + 3p - 1 = 0 \quad (3.33)$$

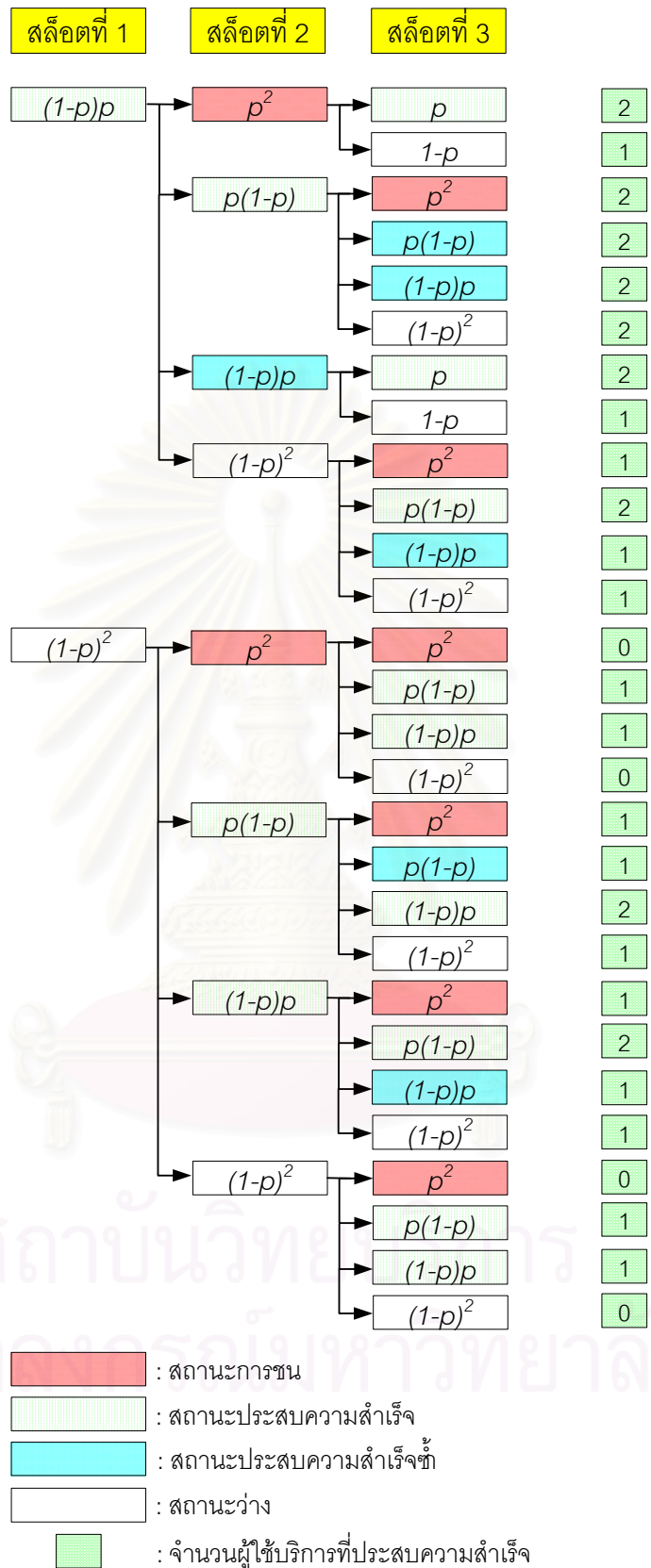
จากสมการที่ (3.33) หาค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทเค็นการจอง สำหรับระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 2 สล็อต และโทเค็นการจอง 2 อัน คือ $p = 0.5$

3.1.2.2.2 ระบบที่มีผู้ให้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 3 สล็อต และโทเค็นการจอง 2 อัน

ระบบนี้ เมื่อพิจารณาสล็อตการจองแรก พบว่ามีเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ 4 เหตุการณ์ เช่นเดียวกันกับในกรณีของระบบที่มีผู้ให้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 2 สล็อตและโทเค็นการจอง 2 อัน คือ การว่างเมื่อไม่มีผู้ให้บริการคนใดเข้าจอง การชนกันเมื่อผู้ให้บริการทั้ง 2 คนเข้าจองพร้อมกัน และการประสบความสำเร็จเมื่อผู้ให้บริการ 1 คนตัดสินใจเข้าจอง โดยพิจารณาได้เป็น 2 เหตุการณ์คือ ผู้ให้บริการคนที่ 1 เข้าจองและผู้ให้บริการคนที่ 2 เข้าจอง ตัวอย่างของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีผู้ให้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 3 สล็อต และจำนวนโทเค็นในการจอง 2 อัน เมื่อผู้ให้บริการตัดสินใจเข้าจองด้วยค่าความน่าจะเป็น p แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีผู้ให้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 3 สล็อต และจำนวนโทเค็นการจอง 2 อัน



รูปที่ 3.6 (ต่อ) เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อมีผู้ใช้บริการ 2 คน สล๊อตการจอง 3 สล๊อต และจำนวนโตะเค้นการจอง 2 อัน

พบว่า มีสถานะที่เพิ่มจากกรณีของเทคนิคที่ใช้โทเค็นเพียง 1 อัน คือสถานะที่จะเกิดการประสบความสำเร็จซ้ำของโทเค็นการจอง ซึ่งจะพบได้ในสล็อตการจองที่ 2 เป็นต้นไป ในกรณีเช่นนี้ การนับจำนวนของผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณจะไม่มีกรบวกเพิ่มขึ้น เนื่องจากพื้นฐานที่ผู้ใช้บริการแต่ละรายมีโอกาสที่จะประสบความสำเร็จในการจองได้คนละ 1 ครั้ง

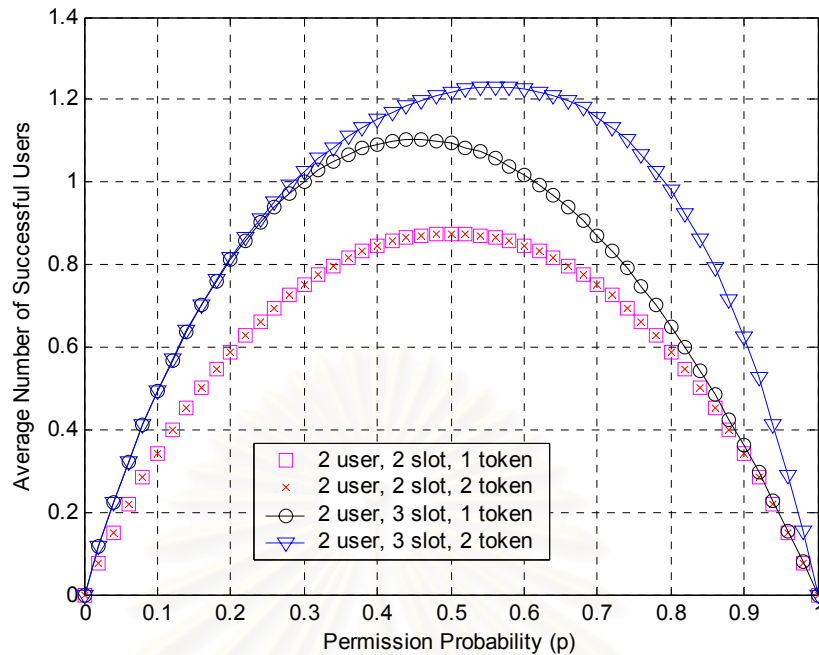
เป็นที่น่าสังเกตว่าจำนวนพจน์ที่เกิดขึ้นในกรณีของระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 3 สล็อต และโทเค็นในการจอง 2 อัน เพิ่มขึ้นอย่างมาก เมื่อเทียบกับระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 2 สล็อต และโทเค็นในการจอง 2 อัน ทั้งที่จำนวนของสล็อตเพิ่มขึ้นเพียง 1 สล็อตเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาการเข้าจองสล็อตของผู้ใช้บริการโดยการคิดลำดับในการเข้าจอง ทำให้จำนวนพจน์ที่ต้องพิจารณามีการเพิ่มขึ้นในลักษณะของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ทำให้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ในกรณีของระบบที่มีผู้ใช้บริการ และ/หรือ สล็อตการจองจำนวนมากต้องใช้เวลาอันค่อนข้างนานพอสมควร

สำหรับในกรณีของระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 3 สล็อต และโทเค็นในการจอง 2 อัน สามารถคำนวณค่าของจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณด้วยหลักการเช่นเดียวกับระบบที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ และแสดงในสมการที่ (3.34)

$$T[2,3,2] = 16p^2(1-p)^4 + 8p^3(1-p)^2 + 16p^3(1-p)^3 + 6p(1-p)^5 + 2p^2(1-p)^3 + 8p^4(1-p) + 4p^4(1-p)^2 \quad (3.34)$$

ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทเค็นการจอง สำหรับระบบนี้ซึ่งมีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 3 สล็อต และจำนวนโทเค็นการจอง 2 อัน คือ ค่าที่ทำให้อนุพันธ์ของสมการ (3.34) เทียบกับ p เป็นศูนย์ ซึ่งค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมที่คำนวณได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนผู้ใช้บริการ จำนวนสล็อตการจอง และจำนวนของโทเค็นการจองที่มีอยู่ในระบบ โดยจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยสูงสุดที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณจะเป็นไปตามสมการ (3.34) เมื่อใช้ p เท่ากับค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทเค็นการจอง

ในส่วนถัดไปจะได้นำเสนอกราฟซึ่งเป็นการเปรียบเทียบจำนวนของผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณของระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการ จำนวนสล็อตการจอง และจำนวนโทเค็น ดังที่แสดงวิธีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ไปแล้วในข้างต้น ได้แก่ ระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 2 สล็อตและโทเค็นการจอง 1-2 อัน และระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 3 สล็อตและโทเค็นการจอง 1-2 อัน เพื่อการวิเคราะห์ว่าเทคนิคที่ใช้โทเค็นหลายอันให้สมรรถนะของระบบที่ดีได้อย่างไร และมีข้อจำกัดในระบบลักษณะใดบ้าง ค่าที่นำมาพล็อตในกราฟเป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3.5), (3.12), (3.32) และ (3.34) ตามลำดับ แสดงดังกราฟในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณ เมื่อระบบมีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 2-3 สล็อต และโทเค็นการจอง 1-2 อัน

จากรูปที่ 3.7 พบว่าเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมแบบค่าคงที่ (Cascade Fixed Probability : CFP) เมื่อปรับปรุงระบบโดยการใช้โทเค็นการจองหลายอัน ทำให้สมรรถนะของระบบ ซึ่งในที่นี้ก็คือจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณมีค่าสูงขึ้น ดังจะเห็นได้จากกรณีของระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 3 สล็อต และโทเค็นการจอง 2 อัน มีสมรรถนะเพิ่มขึ้นจากระบบเดียวกันที่ใช้โทเค็นการจอง 1 อันอย่างชัดเจน ต่างจากกรณีของระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน , สล็อตการจอง 2 สล็อตและโทเค็นการจอง 2 อัน การเพิ่มจำนวนโทเค็นไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะของระบบ ดังนั้น ตัวแปรที่ถือได้ว่ามีความสำคัญอย่างมากในเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่น่าเสนอ คือ จำนวนของโทเค็นในการจอง ซึ่งพบว่าการเพิ่มจำนวนของโทเค็น น่าจะให้ผลที่ดีต่อสมรรถนะของระบบเสมอไป โดยมีข้อสังเกตอยู่ว่า การเพิ่มจำนวนของโทเค็น น่าจะใช้ได้ดีในระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการไม่มากไปกว่าจำนวนของช่องสัญญาณจอง เพราะในระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการมากกว่าจำนวนของช่องสัญญาณจอง โดยตัวของระบบค่อนข้างที่จะมีการชนกันของโทเค็นการจองพอสมควรอยู่แล้ว การเพิ่มจำนวนของโทเค็น น่าจะยิ่งเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกันของโทเค็นการจองและส่งผลให้สมรรถนะของระบบไม่ดีขึ้นเลย ซึ่งรายละเอียดของการวิเคราะห์จำนวนของโทเค็นการจองที่เหมาะสมจะได้นำเสนอในลำดับถัดไป

3.1.2.2.3 ระบบที่มีผู้ใช้บริการ M คน สล็อตการจอง N สล็อต และโหนดการจอง T อัน

จากแนวทางการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของระบบต่าง ๆ ที่นำเสนอแล้วในส่วนก่อนหน้า มีหลักการและขั้นตอนสำคัญในการวิเคราะห์พอสรุปได้ดังนี้

- วาดแผนภาพการทำงานโดยพิจารณาเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสล็อตการจอง จำนวนของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสล็อตเท่ากับ 2^R เหตุการณ์ เมื่อ R คือจำนวนผู้ใช้บริการที่เหลือ อยู่ในระบบเมื่อพิจารณาสล็อตการจองนั้น ๆ
- วิเคราะห์สถานะของแต่ละสล็อตการจอง โดยที่สล็อตการจองแรกจะมี 3 สถานะ คือ สถานะว่าง สถานะสำเร็จ และสถานะชนกัน ส่วนสล็อตการจองที่ 2 เป็นต้นไป จะมีสถานะของสล็อตการจอง 4 สถานะ สถานะที่เพิ่มเข้ามา คือ สถานะสำเร็จซ้ำ (Repeated success) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อผู้ใช้บริการรายเดิมประสบความสำเร็จในการจองสล็อต หลังจากที่เคยประสบความสำเร็จมาแล้วในสล็อตการจองก่อนหน้า
- นำค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจองสล็อตของแต่ละเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นต่อเนื่องกัน มาคูณกัน ตั้งแต่สล็อตการจองแรกจนถึงสล็อตการจองสุดท้าย พร้อมทั้งวิเคราะห์สถานะของแต่ละสล็อตการจอง เพื่อหาจำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจอง
- หาค่าของจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณ โดยการหาผลรวมของพจน์ซึ่งเกิดจากการนำจำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจองคูณด้วยความน่าจะเป็นในการเข้าจองสล็อตของเหตุการณ์ดังกล่าว

จากหลักการดังกล่าวมาแล้วข้างต้นสามารถวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าของจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณในระบบที่มีผู้ใช้บริการ M คน สล็อตการจอง N สล็อต และโหนดการจอง T อัน โดยค่าความน่าจะเป็นที่ผู้ใช้บริการ k คน ประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อมีผู้ใช้บริการ M คน , สล็อตการจอง N สล็อต , โหนดในการจอง T อัน ($P_{MT-CFP}[k | T_1, T_2, \dots, T_M, S_1, S_1, \dots, S_1, N]$) หาได้ดังสมการที่ (3.35)

$$P_{MT-CFP}[k | T_1, T_2, \dots, T_M, S_1, S_2, \dots, S_M, N] = (1-p)^R \times \mathbf{P}_0 + p(1-p)^{R-1} \times \mathbf{P}_1 + \sum_{i=2}^R p^i (1-p)^{R-i} \times \mathbf{P}_i \quad (3.35)$$

เมื่อ $R = M - (\text{จำนวนของบิต "0" ของตัวแปร } T_1, T_2, \dots, T_M)$

$$\mathbf{P}_0 = (P[k | T_1, T_2, T_3, \dots, T_M, S_1, S_2, S_3, \dots, S_M, N-1])$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_1 = & P[k-x | T_1-1, T_2, T_3, \dots, T_{M-1}, T_M, S_1+x, S_2, S_3, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ & + P[k-x | T_1, T_2-1, T_3, \dots, T_{M-1}, T_M, S_1, S_2+x, S_3, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ & + P[k-x | T_1, T_2, T_3-1, \dots, T_{M-1}, T_M, S_1, S_2, S_3+x, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ & \vdots \\ & + P[k-x | T_1, T_2, T_3, \dots, T_{M-1}-1, T_M, S_1, S_2, S_3, \dots, S_{M-1}+x, S_M, N-1] \\ & + P[k-x | T_1, T_2, T_3, \dots, T_{M-1}, T_M-1, S_1, S_2, S_3, \dots, S_{M-1}, S_M+x, N-1] \end{aligned}$$

$$x = \begin{cases} 0 & \text{if repeated success} \\ 1 & \text{if newsuccess} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_2 = & P[k | T_1-1, T_2-1, T_3, T_4, \dots, T_{M-1}, T_M, S_1, S_2, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ & + P[k | T_1-1, T_2, T_3-1, T_4, \dots, T_{M-1}, T_M, S_1, S_2, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ & + P[k | T_1-1, T_2, T_3, T_4-1, \dots, T_{M-1}, T_M, S_1, S_2, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ & \vdots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + P[k | T_1, T_2, T_3, \dots, T_{M-2}-1, T_{M-1}-1, T_M, S_1, S_2, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ & + P[k | T_1, T_2, T_3, \dots, T_{M-2}-1, T_{M-1}, T_M-1, S_1, S_2, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ & + P[k | T_1, T_2, T_3, \dots, T_{M-2}, T_{M-1}-1, T_M-1, S_1, S_2, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_3 = & P[k | T_1-1, T_2-1, T_3-1, T_4, T_5, \dots, T_{M-3}, T_{M-2}, T_{M-1}, T_M, S_1, S_2, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ & + P[k | T_1-1, T_2, T_3-1, T_4-1, T_5, \dots, T_{M-3}, T_{M-2}, T_{M-1}, T_M, S_1, S_2, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ & + P[k | T_1-1, T_2, T_3, T_4-1, T_5-1, \dots, T_{M-3}, T_{M-2}, T_{M-1}, T_M, S_1, S_2, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ & \vdots \\ & + P[k | T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, \dots, T_{M-3}-1, T_{M-2}-1, T_{M-1}, T_M-1, S_1, S_2, S_3, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ & + P[k | T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, \dots, T_{M-3}, T_{M-2}-1, T_{M-1}-1, T_M-1, S_1, S_2, S_3, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \end{aligned}$$

$$\mathbf{P}_R = P[k | T_1-1, T_2-1, \dots, T_{M-1}-1, T_M-1, S_1, S_2, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1]$$

นอกจากนี้ ยังได้กำหนดค่าเริ่มต้น (Boundary Condition) ของสมการ (3.35) ไว้ดังนี้

$$P_{MT-CFP}[k | T_1, T_2, \dots, T_M, S_1, S_2, \dots, S_M, N] = \begin{cases} 0 & \text{if } k < 0, T_i \geq 0, S_i \geq 0, N \geq 0 \\ 1 & \text{if } k = 0, T_i \geq 0, S_i \geq 0, N = 0 \\ 1 & \text{if } k = 0, T_i = 0, S_i \geq 0, N \geq 0 \\ 0 & \text{if } k > N, T_i \geq 0, S_i \geq 0 \end{cases}$$

เมื่อนำค่าความน่าจะเป็นที่จะมีผู้ใช้บริการจองช่องสัญญาณสำเร็จกรณีต่าง ๆ มาคำนวณหาค่าวิสัยสามารถของระบบ ($T_{MT-CFP} [M, N, T]$) ซึ่งนิยามว่าเป็นจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่จองช่องสัญญาณได้สำเร็จ ได้จากสมการ (3.36)

$$T_{MT-CFP} [M, N, T] = \sum_{j=0}^M j \times P_{MT-CFP} [j | T_1, T_2, \dots, T_M, S_1, S_2, \dots, S_M, N] \quad (3.36)$$

สำหรับค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้บริการ คือค่า p ที่ทำให้อนุพันธ์ของสมการ (3.36) เทียบกับ p เป็นศูนย์ ($\frac{\partial}{\partial p} T_{MT-CFP} [M, N, T] = 0$) และทำให้ค่าวิสัยสามารถของระบบสูงสุด

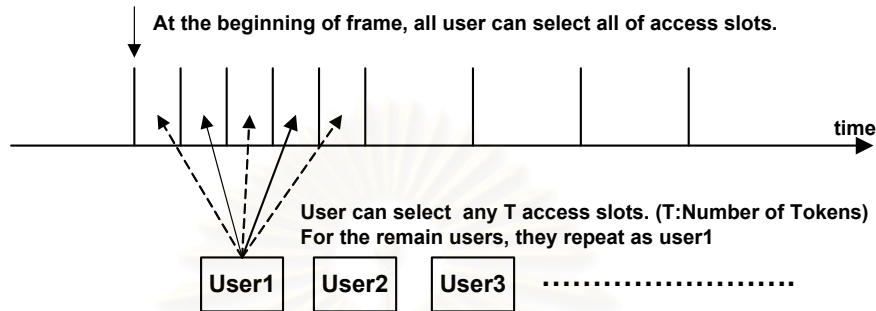
3.2 เทคนิคการเลือกสล็อตการจองอย่างสุ่ม (Multi-Token Uniform : MT-UNI)

เนื่องจากเทคนิคการใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมแบบค่าคงที่ (MT-CFP) มีข้อกำหนดที่สำคัญอย่างหนึ่งคือ ผู้ใช้บริการจะเข้าจองสล็อตการจองเรียงตามลำดับสล็อตจากสล็อตแรกถึงสล็อตสุดท้าย ซึ่งการจองเรียงตามลำดับสล็อตเป็นขั้นตอนควบคุมการเข้าถึงที่งานวิจัยส่วนใหญ่ในอดีตได้เสนอบนพื้นฐานที่ว่าผู้ใช้บริการสามารถทราบผลการจองได้ทันทีหลังจากที่ส่งโทเค็นการจอง โดยวิธีในอดีตที่ใช้เทคนิคนี้จะกำหนดให้ผู้ใช้บริการสามารถเข้าจองในแต่ละสล็อตการจองได้เรื่อย ๆ เรียงตามลำดับสล็อตจนกว่าจะประสบความสำเร็จในสล็อตใดสล็อตหนึ่ง แต่ในระบบสื่อสารไร้สายความเร็วสูง ผู้ใช้บริการไม่สามารถทราบผลการจองได้ทันทีในช่วงการจอง ภายใต้เงื่อนไขนี้เทคนิคการจองโดยพิจารณาลำดับของสล็อตอาจไม่ใช่เทคนิคที่เหมาะสมที่สุด ผู้ใช้บริการไม่จำเป็นต้องพิจารณาเรียงตามลำดับสล็อต ผู้ใช้บริการสามารถใช้เทคนิคง่าย ๆ ในการจองสล็อตโดยเลือกที่จะเข้าจองในสล็อตการจองสล็อตใดสล็อตหนึ่ง ซึ่งจะไม่ขึ้นกับการตัดสินใจของผู้ใช้บริการคนอื่น ดังนั้นจะเรียกเทคนิคนี้ว่า “เทคนิคการเลือกสล็อตการจองอย่างสุ่ม”

3.2.1 หลักการทำงานของเทคนิค MT-UNI

เทคนิคนี้เป็นวิธีที่ใช้เทคนิคการเลือกสล็อตการจองอย่างสุ่ม โดยกำหนดให้ผู้ใช้บริการทั้งหมด ณ เวลาเริ่มต้นของแต่ละเฟรม สุ่มเลือกสล็อตการจอง ซึ่งจำนวนสล็อตการจองที่ถูกเลือกของผู้ใช้บริการแต่ละรายจะมีค่าเท่ากับจำนวนของโทเค็นที่สถานีฐานได้แจ้งบอกผู้ใช้บริการว่าจะได้รับสิทธิ์จำนวนกี่โทเค็น (Multi-Token) และยังมีข้อกำหนดเพิ่มเติมคือ ผู้ใช้บริการแต่ละรายประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณได้เพียงครั้งเดียว หลังจากจบช่วงการจองในแต่ละเฟรมสถานีฐานจะตรวจสอบผลการจองและจัดสรรสล็อตข้อมูลข่าวสารให้ผู้ใช้บริการผ่านทาง

ช่องสัญญาณขาด ผู้ใช้บริการที่ไม่ประสบความสำเร็จจะสุ่มเลือกสล็อตการจองในเฟรมถัดไป ด้วยวิธีนี้จะทำให้ทุก สล็อตการจองรองรับความต้องการการเข้าจองเท่าเทียมกัน (Uniform) ดังนั้น จะเรียกเทคนิคนี้ว่า “Multi-Token Uniform” หรือ “MT-UNI” กลไกการทำงานของเทคนิคการจอง แบบ Multi-Token Uniform (MT-UNI) แสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กลไกการทำงานของเทคนิคการจองแบบ Multi-Token Uniform (MT-UNI)

3.2.2 แนวทางการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิค MT-UNI

ในส่วนนี้จะได้นำเสนอแนวทางการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิคการเลือกสล็อตการจองอย่างสุ่ม (MT-UNI) โดยแบ่งการนำเสนอเป็น 2 ส่วน คือ แนวทางการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบที่ใช้ของโทเค็นการจอง 1 อัน และแนวทางการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบที่ใช้โทเค็นหลายอัน

3.2.2.1 ระบบที่มีผู้ให้บริการ M คน สล็อตการจอง N สล็อต และโทเค็นการจอง 1 อัน

การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบที่ใช้โทเค็นการจอง 1 อัน จะมีแนวทางการวิเคราะห์คล้ายกับเทคนิคการใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมแบบค่าคงที่ (MT-CFP) กล่าวคือ หากวิเคราะห์เทคนิคการเลือกสล็อตการจองอย่างสุ่ม (MT-UNI) โดยการพิจารณาสล็อตการจองเป็นลำดับจะพบว่า ในแต่ละสล็อตการมีโอกาที่จะถูกใช้หรือถูกเข้าจองได้เท่า ๆ กัน ดังนั้น ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการเข้าจองของแต่ละสล็อตการจองจึงมีค่า $p = \frac{1}{N}$ เมื่อ N คือ จำนวนของสล็อตการจองที่มีอยู่ในระบบ เมื่อวิเคราะห์เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสล็อตการจองพบว่าเหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นเป็นไปได้อีก 3 กรณีคือ

- การว่าง เกิดเนื่องจากไม่มีผู้ให้บริการรายใดในระบบเข้าจองช่องสัญญาณ โดยความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะเกิดการว่าง $= b[M, 0, 1/N]$
- การสำเร็จ เกิดเนื่องจากมีผู้ให้บริการเพียงรายเดียวในระบบเข้าจองช่องสัญญาณ โดยความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะเกิดการสำเร็จ $= b[M, 1, 1/N]$

- การชน เกิดเนื่องจากมีผู้ใช้บริการตั้งแต่ 2 รายขึ้นไปเข้าจองช่องสัญญาณพร้อมกัน โดยความน่าจะเป็นที่ช่องสัญญาณจะเกิดการชน $= \sum_{i=2}^M b[M, i, 1/N]$

$$\text{โดยที่ } b[m, i, x] = \binom{m}{i} x^i (1-x)^{m-i}$$

จากค่าความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่สามารถเกิดขึ้นในช่องสัญญาณจองช่องใด ๆ จะสามารถหาค่าความน่าจะเป็นที่จะมีผู้ใช้บริการจำนวน k รายสามารถจองช่องสัญญาณสำเร็จ โดยอาศัยหลักการรีเคอร์ซีฟดังนี้

$$\begin{aligned} P_{UNI}[k | M, N] &= b[M, 0, 1/N] P_{UNI}[k | M, N-1] \\ &+ b[M, 1, 1/N] P_{UNI}[k-1 | M-1, N-1] \\ &+ \sum_{i=2}^M b[M, i, 1/N] P_{UNI}[k | M-i, N-1] \end{aligned} \quad (3.37)$$

โดยที่ $P_{UNI}[k | M, N]$ คือ ค่าความน่าจะเป็นที่จะมีผู้ใช้บริการ k รายสามารถจองช่องสัญญาณได้สำเร็จ จากระบบที่ประกอบด้วยผู้ใช้บริการจำนวน M ราย สล็อตการจองจำนวน N สล็อต กำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณเท่ากับ $p = \frac{1}{N}$ และกำหนดค่าเริ่มต้น (Boundary Condition) ของสมการ (3.37) ไว้ดังนี้

$$P_{UNI}[k | M, N] = \begin{cases} 0 & \text{if } k < 0, M \geq 0, N \geq 0 \\ 1 & \text{if } k = 0, M \geq 0, N = 0 \\ 0 & \text{if } k > 0, M \geq 0, N = 0 \\ 1 & \text{if } k = 0, M \geq 2, N = 1 \\ 0 & \text{if } k > 0, M \geq 2, N = 1 \\ 1 & \text{if } k = 0, M = 0, N \geq 1 \\ 0 & \text{if } k = 0, M = 1, N \geq 1 \\ 1 & \text{if } k = 1, M = 1, N \geq 1 \end{cases}$$

นอกจากนี้จะสามารถนำค่าความน่าจะเป็นที่จะมีผู้ใช้บริการจองช่องสัญญาณสำเร็จกรณีต่าง ๆ มาคำนวณหาค่าวิสัยสามารถของระบบ ($T_{UNI}[M, N]$) ซึ่งนิยามว่าเป็นจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่จองช่องสัญญาณได้สำเร็จ ได้จากสมการ (3.38)

$$T_{UNI}[M, N] = \sum_{j=0}^M (j \times P_{UNI}[j | M, N]) \quad (3.38)$$

สำหรับค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับผู้ใช้บริการ คือค่า p ที่ทำให้อนุพันธ์ของสมการ (3.38) เทียบกับ p เป็นศูนย์ ($\frac{\partial}{\partial p} T_{UNI}[M, N] = 0$) และทำให้ค่าวิสัยสามารถของระบบสูงสุด

นอกจากนี้หากวิเคราะห์ด้วยหลักการรีเคอร์ซีฟในเทอมของ T สามารถหาจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จ $T_{UNI}[M, N]$ ได้ดังสมการที่ (3.39)

$$\begin{aligned}
 T_{UNI}[M, N] &= b\left[M, 0, \frac{1}{N}\right] \cdot T_{UNI}[M, N - 1] \\
 &+ b\left[M, 1, \frac{1}{N}\right] \cdot (1 + T_{UNI}[M - 1, N - 1]) \\
 &+ \sum_{i=2}^M b\left[M, i, \frac{1}{N}\right] \cdot T_{UNI}[M - i, N - 1] \\
 &= b\left[M, 1, \frac{1}{N}\right] + \sum_{i=0}^M b\left[M, i, \frac{1}{N}\right] \cdot T_{UNI}[M - i, N - 1]
 \end{aligned} \tag{3.39}$$

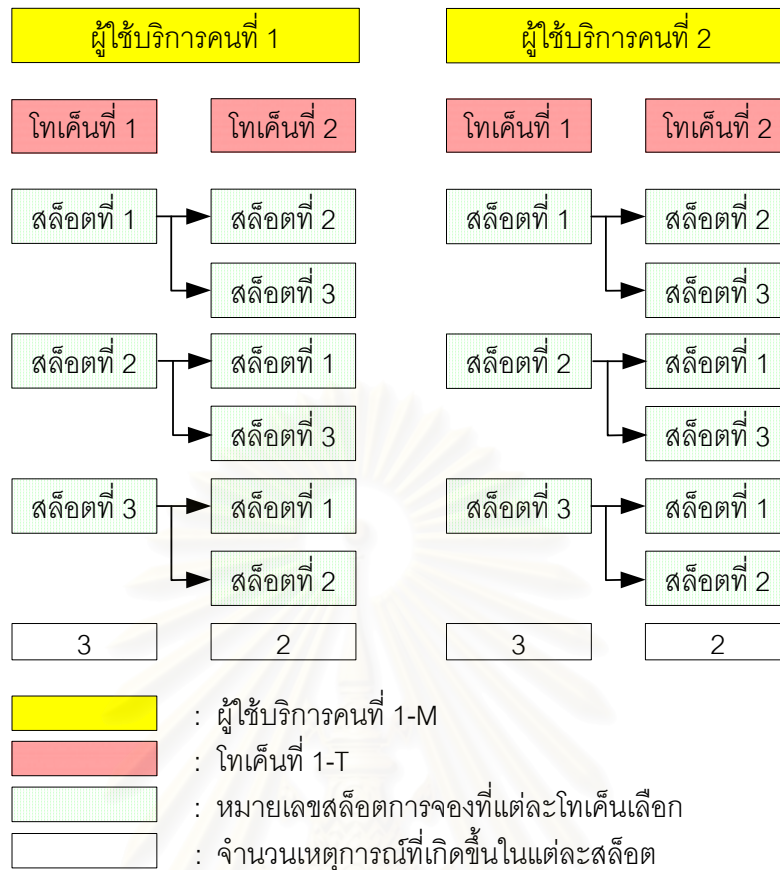
เมื่อเงื่อนไขขอบเขตของสมการ (3.39) คือ

$$T_{UNI}[M, 0] = T_{UNI}[0, N] = 0 \tag{3.40}$$

3.2.2.2 ระบบที่มีผู้ใช้บริการ M คน สล็อตการจอง N สล็อต และโทเค็นการจอง T อัน

แนวทางการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบที่ใช้โทเค็นหลายอัน จะใช้หลักในการพิจารณาที่แตกต่างจากระบบที่ใช้โทเค็น 1 อัน อยู่พอสมควร เนื่องจากเมื่อนำเทคนิคการใช้โทเค็นหลายอันมาประยุกต์ใช้ พบว่าไม่สามารถทำการวิเคราะห์ด้วยการพิจารณาสล็อตการจองเป็นลำดับได้ แต่ยังคงสามารถเขียนแผนภาพประกอบการวิเคราะห์ แต่เปลี่ยนจากการพิจารณาเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละสล็อตการจองเป็นการพิจารณาเหตุการณ์ของโทเค็นการจองแต่ละอันของผู้ใช้บริการว่าโทเค็นแต่ละอันจะเลือกใช้สล็อตการจองใด โดยมีพื้นฐานว่าโทเค็นการจองแต่ละอันไม่สามารถเข้าจองในสล็อตการจองเดียวกันได้ เพื่อให้มองเห็นภาพได้ชัดเจนขึ้นและถ่ายทอดความเข้าใจ จึงได้นำเสนอเป็นแผนภาพในการวิเคราะห์ โดยยกตัวอย่างระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน สล็อตการจอง 3 สล็อต และโทเค็นการจอง 2 อัน ดังแสดงในรูปที่ 3.9

เมื่อพิจารณาเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นของโทเค็นการจองแรกของผู้ใช้บริการคนที่ 1 พบว่ามีเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ 3 เหตุการณ์คือ เข้าจองสล็อตการจองที่ 1 เข้าจองสล็อตการจองที่ 2 และเข้าจองสล็อตการจองที่ 3 ส่วนโทเค็นการจองถัดไป (โทเค็นที่ 2) จะเกิดเหตุการณ์ที่ต่อเนื่องจากโทเค็นแรกได้ 2 เหตุการณ์ คือ เข้าจองสล็อตการจองที่เหลืออีก 2 สล็อต ในส่วนของผู้ใช้บริการคนที่ 2 มีการพิจารณาในขั้นตอนเช่นเดียวกัน และได้เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเหมือนกับกันผู้ใช้บริการคนที่ 1 และมีแนวโน้มว่าหากจำนวนผู้ใช้บริการเพิ่มจำนวนมากขึ้นการพิจารณาเหตุการณ์ก็จะกระทำได้เช่นเดียวกัน และได้เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นของผู้ใช้บริการทุกคนเหมือนกันทั้งหมด



รูปที่ 3.9 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบที่มีผู้บริการ 2 คน สล๊อตการจอง 3 สล๊อต และโทเค็นการจอง 2 อัน

สามารถหาจำนวนผู้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณจากแผนภาพโดยการนำเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดของผู้บริการคนที่ 1 เปรียบเทียบกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดของผู้บริการคนที่ 2 เพื่อหาจำนวนผู้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณของแต่ละกรณี ตัวอย่างเช่น ผู้บริการคนที่ 1 มีโทเค็นที่ 1 เข้าจองสล๊อตที่ 1 และโทเค็นที่ 2 เข้าจองสล๊อตที่ 2 ส่วนผู้บริการคนที่ 2 มีโทเค็นที่ 1 เข้าจองสล๊อตที่ 1 และโทเค็นที่ 2 เข้าจองสล๊อตที่ 2 กรณีเช่นนี้เป็นการเข้าจองซ้ำในสล๊อตการจองเดียวกันของผู้บริการทั้งสองคน ทำให้ไม่มีผู้ประสบความสำเร็จในการจอง แต่ในกรณีที่ผู้บริการคนที่ 1 มีโทเค็นที่ 1 เข้าจองสล๊อตที่ 1 และโทเค็นที่ 2 เข้าจองสล๊อตที่ 2 ส่วนผู้บริการคนที่ 2 มีโทเค็นที่ 1 เข้าจองสล๊อตที่ 1 และโทเค็นที่ 2 เข้าจองสล๊อตที่ 3 กรณีเช่นนี้จะมีผู้ประสบความสำเร็จในการจอง 2 คน เป็นต้น ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการหาค่าจำนวนผู้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณ ซึ่งได้จากผลรวมของจำนวนกรณีทั้งหมดที่ผู้บริการจะประสบความสำเร็จในการจอง k คนคูณกับจำนวนผู้บริการที่ประสบความสำเร็จ (k) โดยที่ $k = 0, 1, 2, \dots, M$ พจน์ที่หาค่าได้นี้นำมาหารด้วยจำนวนของกรณีทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ สำหรับระบบที่มีผู้บริการ 2 คน

สล็ตการจอง 3 สล็ต และโทเค้นการจอง 2 อัน สามารถหาจำนวนของกรณีที่จะมีผู้ประสบความสำเร็จในการจองช่องสล็ตญาณ 0, 1, 2 คนและจำนวนกรณีที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด ดังนี้

- กรณีที่จะมีผู้ประสบความสำเร็จในการจอง 0 คน ($k = 0$) มีจำนวน 12 กรณี
- กรณีที่จะมีผู้ประสบความสำเร็จในการจอง 1 คน ($k = 1$) มีจำนวน 0 กรณี
- กรณีที่จะมีผู้ประสบความสำเร็จในการจอง 2 คน ($k = 2$) มีจำนวน 24 กรณี
- กรณีที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมดมีจำนวน 36 กรณี

สามารถคำนวณหาจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสล็ตญาณของระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน , สล็ตการจอง 3 สล็ต และโทเค้นการจอง 2 อัน ($T_{MT-UNI}[2,3,2]$) ได้ดังนี้

$$T_{MT-UNI}[2,3,2] = (0 \times \text{กรณีที่จะมีผู้ประสบความสำเร็จในการจอง 0 คน} + 1 \times \text{กรณีที่จะมีผู้ประสบความสำเร็จในการจอง 1 คน} + 2 \times \text{กรณีที่จะมีผู้ประสบความสำเร็จในการจอง 2 คน}) / \text{กรณีที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด}$$

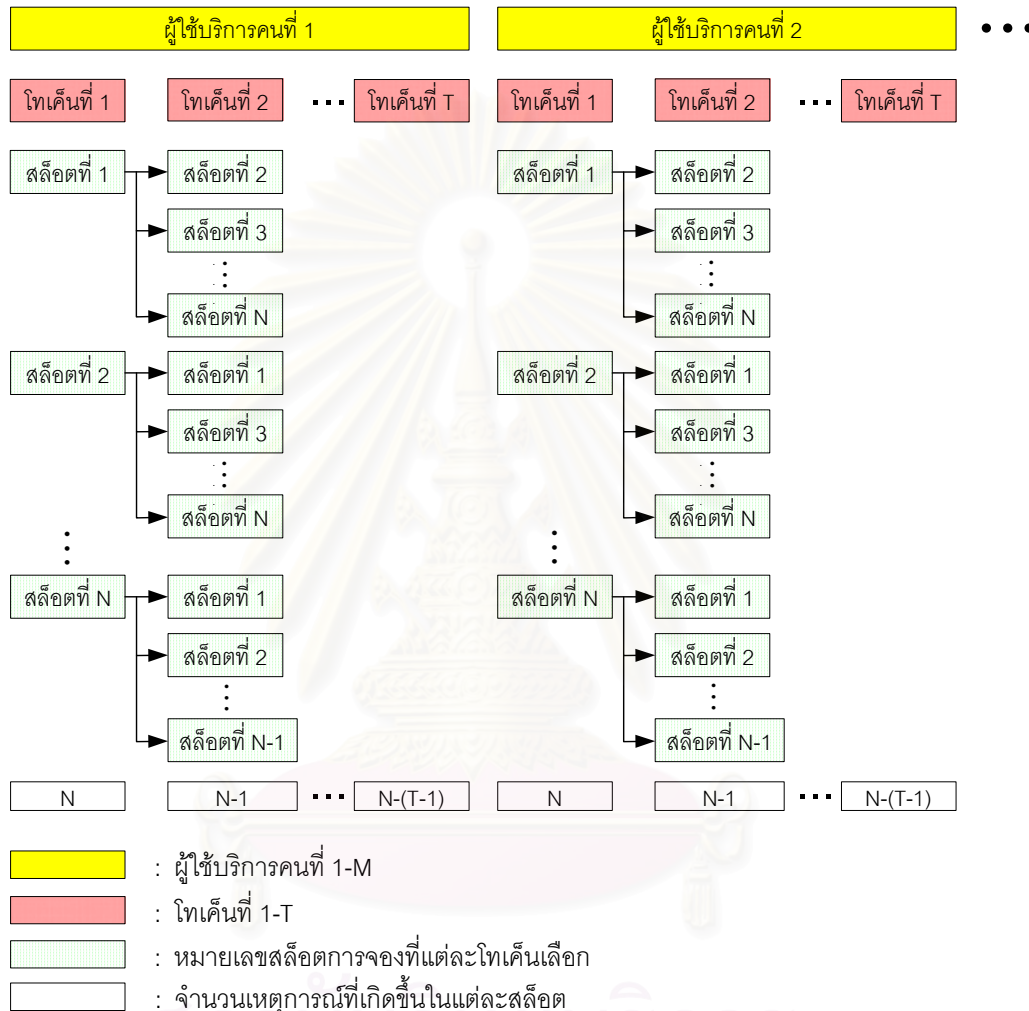
$$T_{MT-UNI}[2,3,2] = \left[\frac{(0 \times 12) + (1 \times 0) + (2 \times 24)}{36} \right] = \frac{48}{36} = 1.333$$

ก่อนที่จะกล่าวถึงในส่วนต่อไป ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ พร้อมสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปทั่วไป ได้กำหนดพารามิเตอร์สำคัญต่าง ๆ ที่จะใช้ในการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สำหรับเทคนิคการเลือกสล็ตการจองอย่างสุ่มซึ่งใช้โทเค้นหลายอัน (MT-UNI) ดังนี้

- M แทนจำนวนของผู้ใช้บริการที่มีอยู่ในระบบ
- N แทนจำนวนสล็ตการจองที่เหลืออยู่ในระบบ
- T แทนจำนวนโทเค้นการจองที่มีอยู่ในระบบ
- $T[M, N, T]$ แทนจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อมีผู้ใช้บริการ M คน สล็ตการจอง N สล็ต และโทเค้นการจอง T อัน
- k แทนจำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จ
- $C[k|M, N, T]$ แทนจำนวนของกรณีทั้งหมดที่ผู้ใช้บริการ k คนประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อมีผู้ใช้บริการ M คน , สล็ตการจอง N สล็ต และโทเค้นในการจอง T อัน

C_{ALL} แทนจำนวนของกรณีทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ (เมื่อ $k = 0,1,2,\dots,M$)

เพื่อนำไปสู่ความเข้าใจในการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และนำเสนอสมการทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบทั่วไป จะขออธิบายโดยใช้แผนภาพประกอบ ในกรณีของระบบที่มีผู้ให้บริการ M คน สล็อตการจอง N สล็อต และโทเค็นการจอง T อัน ดังแสดงในรูปแบบที่ 3.10



รูปที่ 3.10 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบที่มีผู้ให้บริการ M คน สล็อตการจอง N สล็อต และโทเค็นการจอง T อัน

จากแผนภาพดังรูปที่ 3.10 ทำให้สามารถสรุปประเด็นที่น่าสนใจสำหรับการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สำหรับเทคนิคการการเลือกสล็อตการจองอย่างสุ่มซึ่งใช้โทเค็นหลายอัน (MT-UNI) เมื่อมีผู้ให้บริการ M คน สล็อตการจอง N สล็อต และโทเค็นการจอง T อัน ได้ดังนี้

- เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นของผู้ให้บริการทุกคนจะเหมือนกัน และมีจำนวนเท่ากัน ซึ่งในส่วนนี้ทำให้สามารถหากรณีที่เป็นไปได้ทั้งหมด (C_{ALL}) โดยนำจำนวนเหตุการณ์ของผู้ให้บริการทุกคนมาคูณกัน

- เมื่อพิจารณาโทเค็นการจองเป็นลำดับ จากโทเค็นแรกไปยังโทเค็นสุดท้าย พบว่าในโทเค็นแรกจะมีเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ N เหตุการณ์และในโทเค็นอันถัด ๆ ไปจำนวนเหตุการณ์จะลดลงครั้งละหนึ่งเหตุการณ์ ทั้งนี้เนื่องจากโทเค็นแต่ละอันจะเลือกสล๊อตการจองได้ครั้งละหนึ่งสล๊อต และสิ้นสุดเมื่อการลดลงมาถึง $N - (T - 1)$ เหตุการณ์ ดังนั้น เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมดของผู้ใช้บริการแต่ละคนมีค่าเท่ากับ $N \cdot (N - 1) \cdot (N - 2) \cdot \dots \cdot (N - (T - 1))$ เหตุการณ์ ในส่วนนี้ สามารถหากรณีที่ เป็นไปได้ทั้งหมด (C_{ALL}) จาก $C_{ALL} = [N \cdot (N - 1) \cdot (N - 2) \cdot \dots \cdot (N - (T - 1))]^M$
- จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณ ซึ่งได้จากผลรวมของจำนวนกรณีทั้งหมดที่ผู้ใช้บริการจะประสบความสำเร็จในการจอง k คน คูณกับจำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จ (k) โดยที่ $k = 0, 1, 2, \dots, M$ พจน์ที่หาค่าได้นี้นำมาหารด้วยจำนวนของกรณีทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้

สามารถคำนวณหาจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณในรูปทั่วไป เมื่อระบบมีผู้ใช้บริการ M คน สล๊อตการจอง N สล๊อต และโทเค็นการจอง T อัน ดังแสดงในสมการที่ (3.41)

$$\begin{aligned}
 T_{MT-UNI}[M, N, T] &= (0 \times \text{กรณีที่มีผู้ประสบความสำเร็จในการจอง 0 คน} \\
 &+ 1 \times \text{กรณีที่มีผู้ประสบความสำเร็จในการจอง 1 คน} \\
 &+ 2 \times \text{กรณีที่มีผู้ประสบความสำเร็จในการจอง 2 คน} \\
 &\vdots \\
 &+ M \times \text{กรณีที่มีผู้ประสบความสำเร็จในการจอง M คน}) / \text{กรณีที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{MT-UNI}[M, N, T] &= \frac{\sum_{k=0}^M (k \times C[k | M, N, T])}{C_{ALL}} \\
 &= \frac{\sum_{k=0}^M (k \times C[k | M, N, T])}{[N \cdot (N - 1) \cdot (N - 2) \cdot \dots \cdot (N - (T - 1))]^M} \quad (3.41)
 \end{aligned}$$

$$T_{MT-UNI}[M, N, T] = \sum_{k=0}^M (k \times P[k | M, N, T]) \quad (3.42)$$

$$\text{เมื่อ } P[k | M, N, T] = \frac{C[k | M, N, T]}{[N \cdot (N - 1) \cdot (N - 2) \cdot \dots \cdot (N - (T - 1))]^M}$$

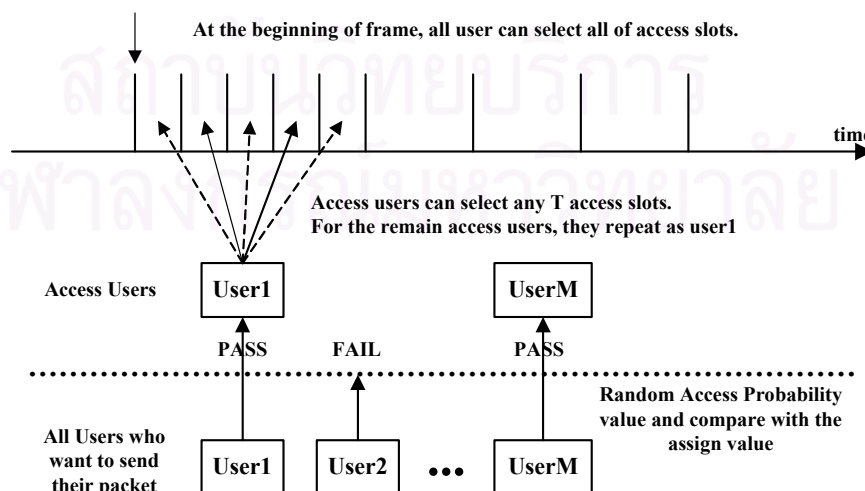
3.3 เทคนิคการจำกัดจำนวน (Multi-Token Uniform with Limited Access : MT-UNI+LA)

เมื่อพิจารณาระบบที่ใช้เทคนิคการเลือกสล็อตการจอบอย่างสุ่ม (MT-UNI) พบว่าการทำงานดังกล่าวจะประสบปัญหาในสภาวะทราฟฟิกสูง กล่าวคือ เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการหรือจำนวนโหนดการจอบมากเกินไป จนเกิดการชนกันของโหนดการจอบในปริมาณมาก ส่งผลให้สมรรถนะของระบบจะลดลง ทำให้เทคนิค MT-UNI ขาดประสิทธิภาพในสถานการณ์เช่นนี้ เพื่อที่จะไม่ให้เกิดเหตุการณ์เช่นนี้จำเป็นต้องหาวิธีการบางอย่างมาจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการที่ตัดสินใจเข้าจอบ (Limited Access User) หรือจำนวนโหนดการจอบที่ผู้ใช้บริการแต่ละรายเลือกใช้ (Limited Access Token) ดังนั้นจึงเสนอเทคนิคเพื่อแก้ปัญหานี้ โดยเรียกเทคนิคนี้ว่า “เทคนิคการจำกัดจำนวน” และได้แบ่งเทคนิคการจอบช่องสัญญาณนี้ออกเป็น 2 เทคนิคย่อย ได้แก่

- เทคนิคการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ (Multi-Token Uniform with Limited Access User : MT-UNI+LAU)
- เทคนิคการจำกัดจำนวนโหนดการจอบ (Multi-Token Uniform with Limited Access Token : MT-UNI+LAT)

3.3.1 หลักการทำงานของเทคนิคการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ

เทคนิคนี้กำหนดให้ผู้ใช้บริการแต่ละรายตัดสินใจว่าจะเข้าจอบในช่วงการจอบที่กำลังพิจารณาหรือไม่ด้วยค่าความน่าจะเป็น p ถ้าผู้ใช้บริการตัดสินใจที่จะไม่เข้าจอบจะไม่ทำอะไรและจะคอยจนถึงช่วงการจอบในเฟรมถัดไป แต่ถ้าผู้ใช้ตัดสินใจเข้าจอบผู้ใช้บริการจะดำเนินการต่อไปเหมือนกับวิธี MT-UNI จะเรียกรวี่ที่กล่าวมานี้ว่า “Multi-Token Uniform with Limited Access Users” หรือ “MT-UNI+LAU” กลไกการทำงานของเทคนิคการจอบวิธีการนี้ แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 กลไกการทำงานของเทคนิคการจอบแบบ MT-UNI+LAU

3.3.2 แนวการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิคการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ

กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญต่าง ๆ สำหรับการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ดังนี้

p แทนค่าความน่าจะเป็นในการตัดสินใจเข้าจองของผู้ใช้บริการในช่วงการจองที่กำลังพิจารณา (ณ เฟรมที่กำลังพิจารณา)

$T[M, N, T, p]$ แทนจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จ เมื่อระบบมีผู้ใช้บริการ M คน จำนวนสล๊อตการจอง N สล๊อต จำนวนโทเค็นการจอง T โทเค็น และผู้ใช้บริการแต่ละคนตัดสินใจว่าจะเข้าจอง ณ ช่วงการจองที่กำลังพิจารณาด้วยค่าความน่าจะเป็น p

$T_{MT-UNI+LAU}[M, N, T]$ แทนจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของเทคนิค MT-UNI+LAU เมื่อระบบมีผู้ใช้บริการ M คน จำนวนสล๊อตการจอง N สล๊อต และจำนวนโทเค็นการจอง T โทเค็น

$P_{MT-UNI+LAU}[M, N, T]$ แทนค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนของผู้ใช้บริการด้วยเทคนิค MT-UNI+LAU เมื่อระบบมีผู้ใช้บริการ M คน จำนวนสล๊อตการจอง N สล๊อต และจำนวนโทเค็นการจอง T โทเค็น

เหตุการณ์ที่เกิดเมื่อใช้เทคนิคการจองช่องสัญญาณนี้คือ ผู้ใช้บริการแต่ละคนจะต้องตัดสินใจว่าจะเข้าจองหรือไม่เข้าจองในช่วงการจองที่กำลังพิจารณา ดังนั้นความน่าจะเป็นที่มีผู้ใช้บริการ i คนจากทั้งหมด M คนตัดสินใจเข้าจองคือ

$$b[M, i, p] \quad (3.43)$$

หลังจากนั้นผู้ใช้บริการทั้ง i คนจะสุ่มเข้าจองในสล๊อตการจองจำนวน T สล๊อตใด ๆ จากทั้งหมด N สล๊อต ดังนั้นจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในเหตุการณ์นี้หาได้จากผลคูณความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ ($b[M, i, p]$) กับจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จที่ได้จากเทคนิค MT-UNI ($T_{MT-UNI}[i, N, T]$) คือ

$$b[M, i, p] \cdot T_{MT-UNI}[i, N, T] \quad (3.44)$$

เมื่อรวมจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จตามสมการ (3.44) สำหรับค่า i ในทุกกรณีที่เป็นไปได้ ($i=0,1,2,\dots,M$) จะหาจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จ ($T[M,N,T,p]$) สำหรับระบบที่มีผู้ใช้บริการ M คน จำนวนสล็อตการจอง N สล็อต จำนวนโทเค็นการจอง T โทเค็น และผู้ใช้บริการแต่ละคนตัดสินใจว่าจะเข้าจอง ณ ช่วงการจองที่กำลังพิจารณาด้วยค่าความน่าจะเป็น p ได้คือ

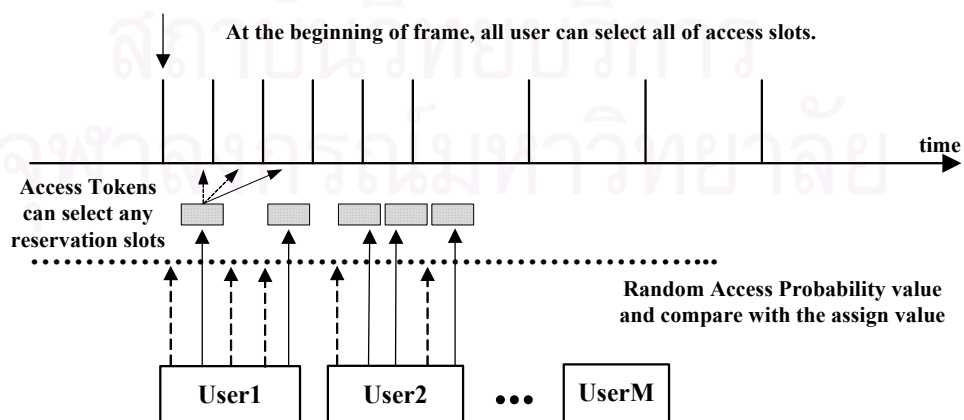
$$T[M,N,T,p] = \sum_{i=0}^M (b[M,i,p] \cdot T_{MT-UNI}[i,N,T]) \quad (3.45)$$

เมื่อ $T_{MT-UNI}[i,N,T]$ หาได้จากสมการ (3.41) และ (3.42)

ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ ($p_{MT-UNI+LAU}[M,N,T]$) ในแต่ละเฟรมคือ ค่า p ที่ทำให้อนุพันธ์ของสมการ (3.45) เทียบกับ p เป็นศูนย์ ซึ่งค่า $p_{MT-UNI+LAU}[M,N,T]$ ที่ได้จะทำให้ได้จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยสูงสุดที่ประสบความสำเร็จ ($T_{MT-UNI+LAU}[M,N,T]$)

3.3.3 หลักการทำงานของเทคนิคการจำกัดจำนวนโทเค็นการจอง

เทคนิคนี้กำหนดให้ผู้ใช้บริการทุกรายสามารถเข้าจองช่องสัญญาณได้ และตัดสินใจว่าจะเข้าจองด้วยจำนวนโทเค็นเท่าใด ด้วยความน่าจะเป็น p โดยจำนวนโทเค็นที่ใช้มีค่ามากที่สุดไม่เกินจำนวนของช่องสัญญาณจองที่ระบบมีอยู่ในระบบ โทเค็นที่เลือกใช้ของผู้ใช้แต่ละรายจะถูกเลือกให้เข้าจองในช่องสัญญาณจองต่าง ๆ อย่างสุ่ม จะเรียกวิธีที่กล่าวมานี้ว่า “Multi-Token Uniform with Limited Access Token” หรือ “MT- UNI+LAT ” กลไกการทำงานของเทคนิคการจองวิธีการนี้ แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 กลไกการทำงานของเทคนิคการจองแบบ MT-UNI+LAT

3.3.4 แนวการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิคการจำกัดจำนวนโทเค็นการจอง

แนวการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิคการจำกัดจำนวนโทเค็นการจอง (MT-UNI+LAT) มีหลักการวิเคราะห์คล้ายกับเทคนิคการเลือกสล๊อตการจองอย่างสุ่ม (MT-UNI) แต่มีส่วนที่แตกต่างกันกล่าวคือ เมื่อพิจารณาเทคนิคการเลือกสล๊อตการจองอย่างสุ่ม ทุกโทเค็นการจองจะถูกสุ่มเข้าไปในสล๊อตการจองใด ๆ ทั้งหมด แต่ในเทคนิคการจำกัดจำนวนโทเค็นการจอง บางโทเค็นจะไม่ถูกใช้งานเนื่องจากการได้มีการจำกัดจำนวนไว้ ทำให้ตั้งข้อสังเกตได้ว่า เมื่อทำการพิจารณาแต่ละกรณีของโทเค็นที่เลือกเข้าจองในสล๊อตการจองต่าง ๆ จำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นของเทคนิคการเลือกสล๊อตการจองอย่างสุ่มมีเพียง 1 เหตุการณ์ คือ ทุกโทเค็นเข้าจองทั้งหมด ซึ่งแน่นอนว่าค่าความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์นี้คือ 1 กล่าวคือ เกิดเหตุการณ์นี้ขึ้นอย่างแน่นอน ทำให้แนวการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สามารถนำแต่ละกรณีที่ผู้ใช้บริการ k คนประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อมีผู้ใช้บริการ M คน สล๊อตการจอง N สล๊อต และโทเค็นในการจอง T อัน ($C[k | M, N, T]$) ไปพิจารณาได้เลย แต่ในเทคนิคการจำกัดจำนวนโทเค็นการจอง จำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละกรณีที่พิจารณา มีจำนวน $2^{M \times T}$ เหตุการณ์ กล่าวคือ เหตุการณ์ที่จะไม่มีโทเค็นใดได้เข้าจองเลย $((1-p)^{M \times T})$ จนกระทั่งเหตุการณ์ที่ทุกโทเค็นได้เข้าจองทั้งหมด $(p^{M \times T})$ ซึ่งมีค่าโอกาสหรือความน่าจะเป็นในการเกิดแตกต่างกัน แต่ผลรวมของค่าความน่าจะเป็นในการเกิดทุกเหตุการณ์จะมีค่าเป็น 1 เพื่อทำให้มองเห็นภาพได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ขอให้กลับไปพิจารณารูปที่ 3.9 ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน สล๊อตการจอง 3 สล๊อต และโทเค็นการจอง 2 อัน พบว่ามีกรณีที่เป็นไปได้ทั้งหมด 36 กรณี ได้แก่ $(1,2,1,2), (1,2,1,3), (1,2,2,1), (1,2,2,3), (1,2,3,1), (1,2,3,1), (1,3,1,2), (1,3,1,3), \dots, (3,2,1,2), (3,2,1,3), (3,2,2,1), (3,2,2,3), (3,2,3,1)$ และ $(3,2,3,2)$ เมื่อหมายเลขภายในวงเล็บคือ หมายเลขสล๊อตการจองที่โทเค็นแต่ละอันเลือกเข้าจอง ซึ่งจะอ้างอิงโดย (โทเค็นที่ 1 ของผู้ใช้บริการคนที่ 1, โทเค็นที่ 2 ของผู้ใช้บริการคนที่ 1, โทเค็นที่ 1 ของผู้ใช้บริการคนที่ 2, โทเค็นที่ 2 ของผู้ใช้บริการคนที่ 2)

ขอยกตัวอย่างประกอบการพิจารณา ในกรณีที่ 2 คือ $(1,2,1,3)$ เมื่อใช้เทคนิคการเลือกสล๊อตการจองอย่างสุ่ม มีเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นเพียง 1 เหตุการณ์ คือเหตุการณ์ที่ทุกโทเค็นการจองได้เข้าจองสล๊อตการจองทั้งหมดซึ่งมีค่าความน่าจะเป็นในการเกิดเท่ากับ 1 และหาค่าจำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจองคือ 2 นำไปสู่การหาจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง โดยการนำค่าจำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจองแต่ละกรณี ($k = 0,1,2, \dots, M$) คูณด้วยกรณีทั้งหมดที่จะได้ค่าผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจองดังกล่าว หรืออาจคูณด้วยค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ที่ทุกโทเค็นเข้าจองทั้งหมดซึ่งมีค่าเท่ากับ 1 ทำให้ทั้งสองวิธีการได้ค่าผลคูณเท่ากัน จากนั้นหาผลรวมของทุกกรณีที่เกิดขึ้น

แล้วหารด้วยกรณีที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด แต่เมื่อใช้เทคนิคการจำกัดจำนวนโทเค็นการจองจะมี เหตุการณ์เกิดขึ้น $2^4 = 16$ เหตุการณ์ แสดงดังแผนภาพในรูปที่ 3.13

เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดในแต่ละกรณี

1	[0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1
2		0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1
1		0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1
3		0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1

เข้า 0 โทเค็น
 $(1-p)^4$

เข้า 1 โทเค็น
 $p(1-p)^3$

เข้า 2 โทเค็น
 $p^2(1-p)^2$

เข้า 3 โทเค็น
 $p^3(1-p)$

เข้า 4 โทเค็น
 p^4

0 แทน โทเค็นซึ่งไม่ได้เข้าจอง $(1-p)$
1 แทน โทเค็นซึ่งได้เข้าจอง (p)

รูปที่ 3.13 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดของกรณี (1,2,1,3) สำหรับเทคนิคการจำกัดจำนวนโทเค็น การจอง ในระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน , สล็อตการจอง 3 สล็อต และโทเค็นการจอง 2 อัน

เมื่อพิจารณาแต่ละเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น สามารถหาค่าโอกาสในการเกิดหรือความน่าจะเป็นของเหตุการณ์แต่ละเหตุการณ์ และจำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจองของแต่ละเหตุการณ์ ได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ความน่าจะเป็นในการเกิดของแต่ละเหตุการณ์ และจำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจอง สำหรับเทคนิคการจำกัดจำนวนโทเค็นการจอง

เหตุการณ์ที่	เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น	ความน่าจะเป็นในการเกิด	จำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จ
1	0 0 0 0	$(1-p)^4$	0
2	1 0 0 0	$p(1-p)^3$	1
3	0 1 0 0	$p(1-p)^3$	1
4	0 0 1 0	$p(1-p)^3$	1
5	0 0 0 1	$p(1-p)^3$	1
6	1 1 0 0	$p^2(1-p)^2$	1
7	1 0 1 0	$p^2(1-p)^2$	0
8	1 0 0 1	$p^2(1-p)^2$	2

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) ความน่าจะเป็นในการเกิดของแต่ละเหตุการณ์ และจำนวนผู้ใช้บริการ
ที่ประสบความสำเร็จในการจอง

เหตุการณ์ที่	เหตุการณ์ที่เกิดขึ้น	ความน่าจะเป็นในการเกิด	จำนวนผู้ใช้บริการ ที่ประสบความสำเร็จ
9	0 1 1 0	$p^2(1-p)^2$	2
10	0 1 0 1	$p^2(1-p)^2$	2
11	0 0 1 1	$p^2(1-p)^2$	1
12	1 1 1 0	$p^3(1-p)$	1
13	1 1 0 1	$p^3(1-p)$	2
14	1 0 1 1	$p^3(1-p)$	1
15	0 1 1 1	$p^3(1-p)$	2
16	1 1 1 1	p^4	2

ตารางที่ 3.1 เป็นเพียงการแสดงตัวอย่างในกรณี (1,2,1,3) เท่านั้น ยังมีอีก 15 กรณีที่เหลือ
ที่ต้องพิจารณาเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกันนี้ พร้อมทั้งหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิด
ของแต่ละเหตุการณ์ และจำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจอง จึงกำหนด
พารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สำหรับเทคนิคการจำกัดจำนวนโทเค็นการจอง ดังนี้

M แทนจำนวนของผู้ใช้บริการที่มีอยู่ในระบบ

N แทนจำนวนสล๊อตการจองที่เหลืออยู่ในระบบ

T แทนจำนวนโทเค็นการจองที่มีอยู่ในระบบ

$T[M, N, T]$ แทนจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อมีผู้ใช้บริการ
 M คน สล๊อตการจอง N สล๊อต และโทเค็นการจอง T อัน

k แทนจำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจอง

$\sum P[k|M, N, T]$

แทนผลรวมของความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์ทั้งหมดที่จะมีผู้ใช้บริการ k
คน ประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อมีผู้ใช้บริการ M คน สล๊อตการจอง N
สล๊อต และโทเค็นในการจอง T อัน

C_{ALL} แทนจำนวนของกรณีทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ (เมื่อ $k = 0, 1, 2, \dots, M$)

สามารถคำนวณหาจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณในรูปแบบทั่วไปสำหรับเทคนิคการจำกัดจำนวนโทเค็นการจอง เมื่อระบบมีผู้ใช้บริการ M คน สล็อตการจอง N สล็อต และโทเค็นการจอง T อัน ดังแสดงในสมการที่ (3.46)

$$T_{MT-UNI+LAT}[M, N, T] = \frac{\sum_{k=0}^M (k \times \sum P[k | M, N, T])}{C_{ALL}}$$

$$T_{MT-UNI+LAT}[M, N, T] = \frac{\sum_{k=0}^M (k \times \sum P[k | M, N, T])}{[N \cdot (N-1) \cdot (N-2) \cdot \dots \cdot (N-(T-1))]^M} \quad (3.46)$$

ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนโทเค็นการจอง ในแต่ละเฟรมคือ ค่า p ที่ทำให้อนุพันธ์ของสมการ (3.46) เทียบกับ p เป็นศูนย์ ซึ่งค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมดังกล่าวจะทำให้ได้จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยสูงสุดที่ประสบความสำเร็จ ($T_{MT-UNI+LAT}[M, N, T]$)

นอกจากนี้ยังพบว่าสมการอาจสามารถปรับเปลี่ยนรูปได้ โดยความน่าจะเป็นที่จะมีผู้ใช้บริการประสบความสำเร็จในการจอง k คน เมื่อระบบมีผู้ใช้บริการ M คน สล็อตการจอง N สล็อต โทเค็นการจอง T อันและเข้าจองด้วยความน่าจะเป็น p ดังสมการที่ 3.47

$$P[k | M, N, T, p] = \frac{\sum_{u=0}^{MT} [p^u \times (1-p)^{MT-u} \times C[k, u | M, N, T]]}{\sum_{k=0}^M \left[\sum_{u=0}^{MT} [p^u \times (1-p)^{MT-u} \times C[k, u | M, N, T]] \right]} \quad (3.47)$$

เมื่อ $C[k, u | M, N, T]$ แทนจำนวนกรณีที่จะมีผู้ใช้ประสบความสำเร็จ k คนและใช้โทเค็น u อัน เมื่อระบบมีผู้ใช้บริการ M คน สล็อตการจอง N สล็อตและโทเค็นการจอง T อัน

ดังนั้น จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อระบบมีผู้ใช้บริการ M คน สล็อตการจอง N สล็อต โทเค็นการจอง T อัน และผู้ใช้บริการตัดสินใจเลือกจำนวนโทเค็นการจองด้วยความน่าจะเป็น p ($T_{MT-UNI+LAT}[M, N, T, p]$) แสดงดังสมการที่ 3.48

$$T_{MT-UNI+LAT}[M, N, T, p] = \sum_{k=0}^M (k \times P[k | M, N, T, p]) \quad (3.48)$$

บทที่ 4

ผลทดสอบและการวิเคราะห์

บทนี้เป็นการแสดงผลทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิคการจ้องช่องสัญญาณแบบต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 รวมถึงการเปรียบเทียบเทคนิคที่นำเสนอกับเทคนิคที่เคยมีผู้นำเสนอไว้ ผลการทดสอบที่นำมาแสดงจะเป็นผลที่ได้มาจากสมการทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Analysis) ที่ได้ทำการวิเคราะห์ในบทที่แล้ว และผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Computer Simulation) ซึ่งผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์จะให้ผลเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์สำหรับทุกกรณี แบ่งการแสดงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ออกตามเทคนิคที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 ได้เป็น 3 เทคนิค คือ เทคนิคการใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมแบบค่าคงที่ (MT-CFP) เทคนิคการเลือกสล็อตการจ้องอย่างสุ่ม (MT-UNI) และเทคนิคการจำกัดจำนวน (MT-UNI+LA)

กำหนดสัญลักษณ์ที่ใช้ในรูปดังนี้

Analysis	แทนการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์
Simulation	แทนการจำลองทางคอมพิวเตอร์
Formulation	แทนการใช้สูตรการประมาณค่า
M	แทนจำนวนผู้ใช้บริการ
N	แทนจำนวนสล็อตการจ้อง
T	แทนจำนวนโทเค็นการจ้อง
p	แทนค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจ้องหรือส่งโทเค็นการจ้อง
Slot No.	แทนหมายเลขลำดับของสล็อตการจ้อง (Slot No. = 1-N)
User No.	แทนหมายเลขลำดับของผู้ใช้บริการ (User No. = 1-M)
ANT	แทนจำนวนของโทเค็นการจ้องที่เหมาะสม (Appropriate Number of Token)
ANSU	แทนจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจ้อง (Average Number of Successful Users)
CFP	แทนเทคนิค Cascade Fixed Probability

MT-CFP	แทนเทคนิค Multi-Token Cascade Fixed Probability
UNI	แทนเทคนิค Uniform
MT-UNI	แทนเทคนิค Multi-Token Uniform
UNI+LA	แทนเทคนิค Uniform with Limited Access
MT-UNI+LA	แทนเทคนิค Multi-Token Uniform with Limited Access
MT-UNI+LAU	แทนเทคนิค Multi-Token Uniform with Limited Access User
MT-UNI+LAT	แทนเทคนิค Multi-Token Uniform with Limited Access Token

4.1 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ MT-CFP

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์จะนำเสนอโดยแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อย่อย โดยแบ่งหัวข้อออกตามระบบที่พิจารณาเป็น 2 ระบบ คือ ระบบที่ใช้โทเค็นการจองเพียง 1 อัน (Single-Token) ได้แก่ เทคนิค CFP และระบบที่ใช้โทเค็นการจองหลายอัน (Multi-Token) ได้แก่ เทคนิค MT-CFP พร้อมทั้งได้แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะและการวิเคราะห์ของทั้งสองเทคนิคดังกล่าว

4.1.1 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิค CFP

เมื่อพิจารณาเทคนิคการจองช่องสัญญาณนี้ พารามิเตอร์ที่ถือได้ว่าจะมีความสำคัญเป็นอย่างมากและส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะซึ่งนิยามโดยจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง คือ ค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอง ในส่วนแรกนี้จะศึกษาว่าค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอง มีผลกระทบต่ออย่างไรต่อสมรรถนะของระบบ

รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง และค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอง เมื่อกำหนดจำนวนสล๊อตการจองเท่ากับ 16 สล๊อต และจำนวนผู้ใช้บริการ 1 2 4 8 และ 16 คน โดยได้แสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ และเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ในการจำลองทางคอมพิวเตอร์ ผู้วิจัยได้ทดสอบโดยเปลี่ยนค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจองจาก 0 ถึง 1 ด้วยความละเอียด (Step Size) เท่ากับ 0.02 และทดสอบในช่วงการจองจำนวน 10,000 ครั้ง จากรูปจะเห็นได้ว่าในจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของทุกระบบจะเพิ่มขึ้นตามค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจองที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการกำหนดค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจองในช่วงแรกมีค่าต่ำ ทำให้จำนวนผู้ใช้บริการที่สามารถเข้าจองได้มีจำนวนน้อย สล๊อตการจองส่วนมากจึงเกิดการว่าง ดังนั้นการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจองจึงช่วยลดโอกาสที่สล๊อตการจองจะเกิดการว่างและส่งผลให้จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบ

ความสำเร็จของระบบเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอบจนถึงค่าหนึ่ง จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของระบบจะเพิ่มจนถึงจุดสูงสุด ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอบที่ทำให้จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของระบบสูงสุดจะมีค่าแตกต่างกันโดยค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอบที่ทำให้จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของระบบที่ประกอบด้วยผู้ใช้บริการจำนวนมากกว่าจะมีค่าต่ำกว่า หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอบขึ้นไปอีกจะทำให้จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของระบบลดลง โดยสาเหตุที่จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของระบบมีค่าลดลงนั้นเป็นผลมาจากการชนกันของผู้ใช้บริการ นอกจากนี้ยังพบว่าการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ให้ผลที่เท่ากันกับการจำลองทางคอมพิวเตอร์ในทุกกรณี จึงเป็นการยืนยันได้ว่าสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ในบทที่ 3 มีค่าถูกต้อง

สามารถสรุปได้ว่าค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอบ มีผลต่อจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จ และมีค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอบที่เหมาะสมอยู่หนึ่งค่าซึ่งทำให้จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จมีค่าสูงสุดในวิทยานิพนธ์นี้จึงเรียกค่านี้ว่า “ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทเค็นการจอบ” ซึ่งค่านี้ขึ้นกับจำนวนผู้ใช้บริการ จำนวนสล็อตการจอบและจำนวนโทเค็นการจอบ

รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสล็อตการจอบและค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอบ ที่ทำให้ค่าสมรรถนะของระบบสูงสุด เมื่อกำหนดจำนวนผู้ใช้บริการ 1 2 4 8 และ 16 คน พบว่ากรณีที่มีผู้ใช้บริการเพียงคนเดียว ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทเค็นการจอบมีค่าเท่ากับหนึ่งเสมอไม่ว่าจะมีจำนวนสล็อตการจอบเท่าไรก็ตาม เพราะกรณีผู้ใช้เพียงคนเดียวผู้ใช้บริการไม่ต้องแข่งขันในการเข้าจอบสล็อตกับผู้ใช้บริการคนอื่น และกรณีที่มีผู้ใช้บริการมากกว่า 1 คน ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทเค็นการจอบจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกแต่หลังจากนั้นจะมีค่าลดลง และเมื่อจำนวนสล็อตการจอบมีค่ามาก ๆ ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทเค็นการจอบจะมีค่าเข้าใกล้ 0 เพราะว่าในช่วงแรก ($N < M$) การลดจำนวนสล็อตการจอบจะทำให้ผู้ใช้บริการมีโอกาสชนกันมากขึ้น ดังนั้นค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทเค็นการจอบมีค่าลดลงเมื่อจำนวนสล็อตการจอบลดลง เพื่อไม่ให้เกิดการชนกันของผู้ใช้บริการ แต่ในช่วงหลัง ($N > M$) ผู้ใช้บริการไม่จำเป็นต้องรีบส่งโทเค็นการจอบตั้งแต่สล็อตการจอบแรก ๆ เนื่องจากผู้ใช้บริการยังมีโอกาสที่จะส่งโทเค็นการจอบในสล็อตท้าย ๆ ดังนั้นค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทเค็นการจอบมีค่าลดลงเมื่อจำนวนสล็อตการจอบเพิ่มขึ้น

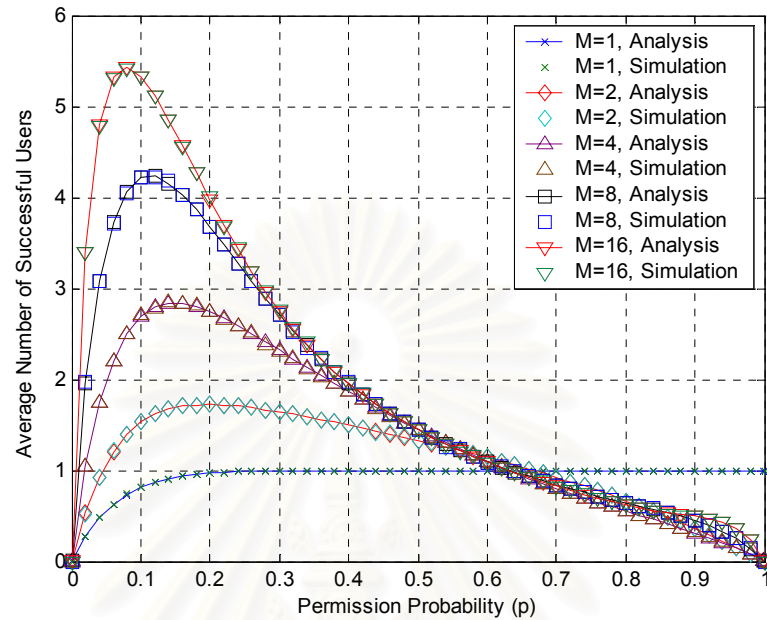
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้บริการและค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอบ ที่ทำให้ค่าสมรรถนะของระบบสูงสุด เมื่อกำหนดจำนวนสล็อตการจอบ 1 2 4 8 และ

16 สล็อต จากรูปจะพบว่าเมื่อจำนวนผู้ใช้บริการมีจำนวน 1 คน ค่าโอกาสในการเข้าของช่องสัญญาณที่ทำให้ควาสัยสามารถของระบบมีค่าสูงสุดจะเท่ากับ 1 ในทุกระบบที่ทำการทดสอบ แต่เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการมีจำนวนเพิ่มขึ้น พบว่าค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจองที่ทำให้สมรรถนะของระบบสูงสุดจะมีค่าลดต่ำลง นอกจากนี้จะพบว่าเมื่อจำนวนผู้ใช้บริการมีจำนวนเท่ากัน ค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจองที่ทำให้สมรรถนะของระบบสูงสุดของระบบที่มีจำนวนสล็อตการจองมากกว่าจะมีค่าต่ำกว่าค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจองของระบบที่มีจำนวนสล็อตการจองน้อยกว่า เนื่องจากการที่จำนวนสล็อตการจองมีจำนวนมาก ทำให้ผู้ใช้บริการไม่ต้องรีบทำการเข้าจองในสล็อตการจองต้นเฟรม เพราะผู้ใช้บริการยังมีโอกาสในการเข้าจองในสล็อตการจองส่วนท้ายของเฟรม นอกจากนี้การที่ผู้ใช้บริการไม่ต้องรีบเข้าจองนั้นจะช่วยหลีกเลี่ยงโอกาสที่ผู้ใช้บริการจะเกิดการชนกันได้อีกด้วย

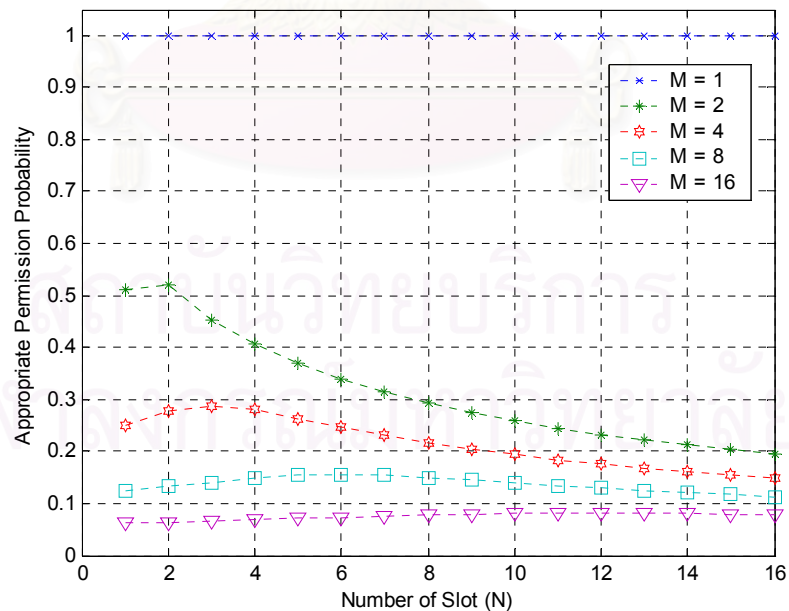
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองของระบบเมื่อกำหนดจำนวนสล็อตการจองเป็น 1 2 4 8 และ 16 สล็อต จากรูปพบว่าในระบบที่มีจำนวนสล็อตการจอง 1 และ 2 สล็อต เมื่อผู้ใช้บริการมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จจะลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะว่าระบบทั้งสองมีจำนวนสล็อตการจองที่น้อยมาก จนเป็นผลให้เกิดการชนกันของผู้ใช้บริการอย่างมาก ส่งผลถึงสมรรถนะของระบบที่ลดลง ในขณะที่ระบบที่มีจำนวนสล็อตการจองตั้งแต่ 4 สล็อตขึ้นไป พบว่าในช่วงแรกเมื่อจำนวนผู้ใช้บริการมีจำนวนเพิ่มขึ้น จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของระบบจะเพิ่มสูงขึ้น แต่จะพบว่าอัตราส่วนของจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลง และถึงแม้จะทำการเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการจนสูงกว่าจำนวนสล็อตการจอง จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของระบบจะยังคงค่อนข้างคงที่ ทั้งนี้เนื่องจากระบบสามารถจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการที่จะเข้าจองได้ผ่านทางกรกำหนดค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอง นอกจากนี้จะสังเกตได้ว่าระบบที่มีจำนวนสล็อตการจองมากกว่า จะมีจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของระบบที่สูงกว่าเพราะระบบที่มีจำนวนสล็อตการจองมากย่อมจะสามารถลดโอกาสที่จะเกิดการชนกันของผู้ใช้บริการได้

จากผลการทดสอบที่ได้จะเห็นได้ว่าเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ CFP นั้นจะทำการกำหนดค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจองโดยคำนึงถึงจำนวนผู้ใช้บริการที่เข้าจองและจำนวนสล็อตการจองที่มีในเฟรม จึงช่วยให้การกำหนดค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจองของระบบมีความเหมาะสมยิ่งขึ้นมากกว่าการพิจารณาเพียงปริมาณไหลที่ระบบรองรับ อย่างไรก็ตามการเข้าจองช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการนั้นยังคงต้องกระทำไปที่ละช่องเริ่มจากสล็อตการจองต้นเฟรมไปยังสล็อตการจองท้ายเฟรม ดังนั้นในสภาวะที่ปริมาณไหลที่ระบบรองรับมีค่ามาก ประสิทธิภาพที่ได้ของเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบนี้จะมีค่าต่ำ กล่าวคือถ้าหากมีผู้ใช้บริการ

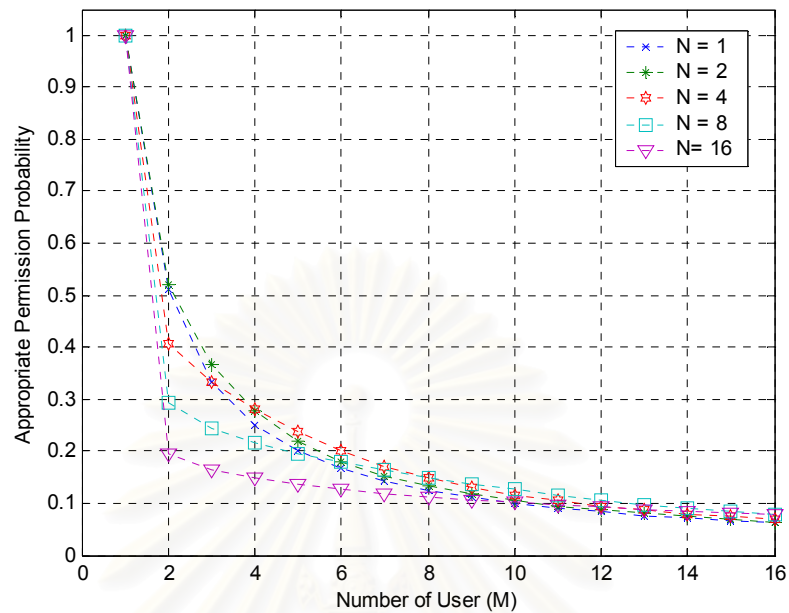
ที่ผ่านเข้าไปของสล็อตการจอบในครั้งหนึ่ง ๆ เกินกว่าหนึ่งราย จะทำให้เกิดการชนและไม่มีผู้ให้บริการที่จองช่องสัญญาณสำเร็จ ซึ่งจะส่งผลให้ค่าวิสัยความสามารถของระบบมีค่าลดลง



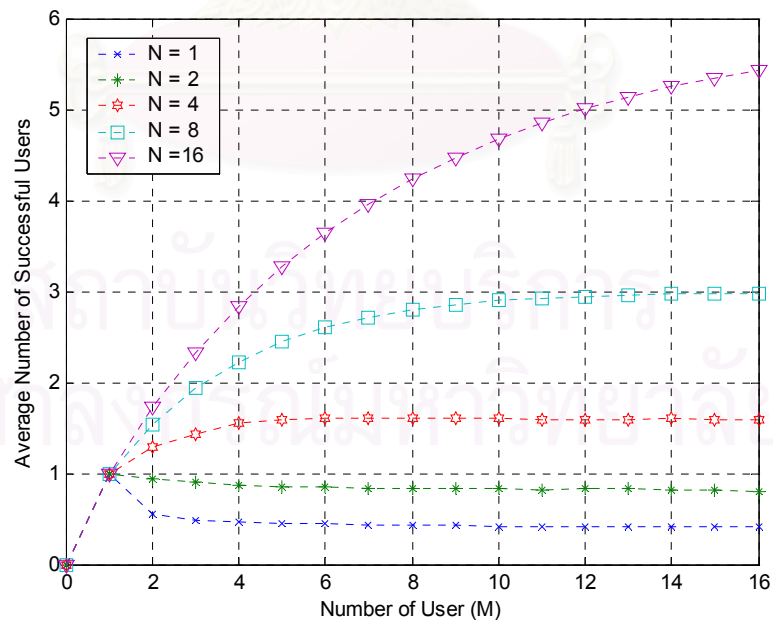
รูปที่ 4.1 จำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง และค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอง เมื่อจำนวนผู้ให้บริการ 1 2 4 8 และ 16 คน



รูปที่ 4.2 จำนวนสล็อตการจองและค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอง ที่ทำให้ค่าสมรรถนะของระบบสูงสุด เมื่อกำหนดจำนวนผู้ให้บริการ 1 2 4 8 และ 16 คน



รูปที่ 4.3 จำนวนผู้ใช้บริการและค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอง ที่ทำให้ค่าสมรรถนะของระบบสูงสุด เมื่อกำหนดจำนวนสล๊อตการจอง 1 2 4 8 และ 16 สล๊อต



รูปที่ 4.4 จำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองของระบบเมื่อกำหนดจำนวนสล๊อตการจองเป็น 1 2 4 8 และ 16 สล๊อต

4.1.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิค MT-CFP

ในส่วนแรกของหัวข้อนี้ จะศึกษาว่าค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจจะมีผลกระทบอย่างไร ต่อสมรรถนะของระบบที่ใช้โทเค็นการจองหลายอัน

รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจอง และความน่าจะเป็นในการเข้าจองเมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 1 2 4 8 และ 16 คน จำนวนสล็อตการจอง 16 สล็อต และโทเค็นการจอง 2 4 8 และ 16 โทเค็น (รูปที่ 4.5 (ก) ถึง 4.5 (ง)) พบว่าไม่ว่าระบบจะใช้จำนวนโทเค็นการจองจำนวนเท่าใด ผลการจำลองแบบที่ได้จะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจองมีค่าน้อย จำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจองมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มของค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจอง ทั้งนี้เพราะว่าภายใต้สถานะของระบบเช่นนี้ ผู้ใช้บริการยังเข้าใช้สล็อตการจองน้อย ทำให้มีสล็อตการจองว่างอยู่มาก ดังนั้นการเพิ่มของค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจองทำให้สมรรถนะของระบบเพิ่มขึ้นด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจองถึงค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง จำนวนของผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจองจะลดลง เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นดังกล่าวทำให้เกิดการชนกันของผู้ใช้บริการมากขึ้น สมรรถนะของระบบจึงมีค่าลดลง ตำแหน่งของค่าความน่าจะเป็นในการจองที่ให้สมรรถนะของระบบดีที่สุด กำหนดให้เป็นค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการเข้าจองหรือส่งโทเค็นการจอง (Appropriate Permission Probability) ซึ่งจะมีค่าที่แตกต่างกัน ภายใต้ระบบที่มีจำนวนสล็อตการจอง จำนวนผู้ใช้บริการ และ/หรือ จำนวนโทเค็นที่แตกต่างกัน

รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการเข้าจองและจำนวนโทเค็นการจองเมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 1 2 4 8 และ 16 คน และจำนวนสล็อตการจอง 16 สล็อต พบว่าภายใต้สถานะที่ระบบรองรับผู้ใช้บริการจำนวนไม่มากนัก ($M = 2\ 4\ 8$) ความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการเข้าจองของสัญญาณจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนโทเค็นการจอง เนื่องจากในสถานะเช่นนี้ ระบบมีจำนวนสล็อตการจองที่ว่างอยู่พอสมควร และมีจำนวนโทเค็นเหลือสำหรับการเข้าจองครั้งใหม่หากว่าเกิดการชนกันขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มจำนวนโทเค็นถึงค่าค่าหนึ่ง จะทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจองมีค่าลดลงและคงที่ในที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากโทเค็นการจองที่มากเกินไป ส่งผลให้การชนกันเกิดขึ้นอย่างมาก ระบบจึงพยายามลดโอกาสในการชนกันด้วยการลดค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการเข้าจอง ส่วนในระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการมาก ($M = 16$) โดยตัวของระบบนั้นเกิดการชนกันของโทเค็นการจองมากอยู่แล้ว การเพิ่มจำนวนโทเค็นการจองยิ่งเท่ากับเป็นการเพิ่มโอกาสการชนกันให้มากยิ่งขึ้น ระบบจึงปรับสภาพให้เกิดการชนน้อยลงด้วยการลดค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการเข้าจอง และมีข้อสังเกตว่าการลดค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการเข้าจองจะลดจนมาคงที่ที่ค่าค่าหนึ่ง ทั้งนี้

เนื่องจากภายใต้สภาวะที่ระบบรองรับผู้ใช้บริการจำนวนมากและมีโหนดการจองจำนวนมากด้วย ผู้ใช้บริการในระบบแทบไม่มีโอกาสในการเข้าจองได้สำเร็จเลย เพราะฉะนั้นการกำหนดค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการเข้าจองค่าดังกล่าว ยังพอทำให้มีผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจองบ้าง

สิ่งที่น่าสนใจอีกประการหนึ่ง ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 4.5 (ข) และ (ค) พบว่ากราฟบางช่วงจะมีการแกว่ง (Fluctuation) โดยเฉพาะอย่างยิ่งภายใต้สภาวะที่มีจำนวนผู้ใช้บริการในระบบมาก (Heavy Load) เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ จะได้ขอยกตัวอย่างประกอบการวิเคราะห์จากรูปที่ 4.5 (ค) ซึ่งเป็นระบบที่ใช้โหนดการจอง 8 อัน และพิจารณากราฟของผู้ใช้บริการจำนวน 16 คน โดยแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่กราฟแกว่งลงและให้ค่าสมรรถนะต่ำสุด ตรงกับความน่าจะเป็นในการเข้าจองคือ $p=0.44$ และช่วงที่กราฟแกว่งขึ้นและให้ค่าสูงสุด ตรงกับความน่าจะเป็นในการเข้าจองคือ $p=0.72$

รูปที่ 4.7 และ รูปที่ 4.8 แสดงจำนวนของการว่าง การสำเร็จ และการชนกันที่สล๊อตการจองต่าง ๆ เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 16 คน จำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต จำนวนโหนดการจอง 8 อัน และค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจองเท่ากับ 0.44 และ 0.72 ตามลำดับ ในการจำลองแบบได้ทดสอบในช่วงการจองจำนวน 100,000 ครั้ง จากกราฟที่แสดงในรูปทั้งสองอธิบายได้ว่าที่ค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจองเท่ากับ 0.44 การชนกันของโหนดการจองจะเกิดขึ้นในทุก ๆ สล๊อตการจองอย่างค่อนข้างสม่ำเสมอ ทำให้โอกาสที่จะมีสล๊อตการจองว่างสำหรับการเข้าจองให้ประสบความสำเร็จมีน้อยมาก ส่งผลให้สมรรถนะของระบบลดลง แต่เมื่อพิจารณาค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจองเท่ากับ 0.72 ซึ่งเป็นค่าความน่าจะเป็นที่ค่อนข้างสูง ทำให้เป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกันของผู้ใช้บริการจำนวนมาก ๆ เช่น การชนกันของผู้ใช้บริการ $M = 10, 12, 14$ และ 16 คน ให้เกิดขึ้นอย่างมากในช่วงสล๊อตการจองอันดับแรก ๆ ส่งผลให้ในช่วงสล๊อตการจองอันดับท้าย ๆ เหลือจำนวนผู้ใช้บริการค่อนข้างน้อย ทำให้ผู้ใช้บริการที่เหลือเหล่านี้ประสบความสำเร็จในการจองในช่วงสล๊อตการจองอันดับท้าย ๆ นี้

จากผลการทดสอบในรูปที่ 4.7 และ 4.8 ทำให้เกิดแนวคิดที่ว่าตำแหน่งค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจองซึ่งให้สมรรถนะของระบบสูงสุด (ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการเข้าจอง) มีลักษณะการทำงาน และการใช้งานสล๊อตการจองอย่างไร เพื่ออธิบายการทำงานในส่วนจึงได้นำเสนอในรูปที่ 4.9

รูปที่ 4.9 แสดงจำนวนของการว่าง การสำเร็จ และการชนกันที่สล๊อตการจองต่าง ๆ เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 16 คน จำนวนโหนด 8 อัน จำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต และใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการเข้าจอง $p=0.06$ พบว่าสล๊อตการจองแต่ละสล๊อตถูกใช้งานหรือถูกเข้า

จงอย่างสม่ำเสมอจะเห็นได้จากจำนวนการว่าง และการชนกันที่เกิดขึ้นในสล็อตการจองแต่ละสล็อต ทำให้สามารถที่จะสรุปได้ว่าการทำให้ระบบมีสมรรถนะหรือจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยประสบความสำเร็จในการจองสูงสุด จะต้องทำให้สล็อตการจองแต่ละสล็อตถูกเข้าจองหรือถูกใช้งานอย่างสม่ำเสมอ หรืออาจกล่าวได้ว่าโอกาสในการเข้าจองสล็อตการจองแต่ละสล็อตมีค่าเท่าเทียมกัน

สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งที่ต้องพิจารณาในเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอคือ ความยุติธรรม (Fairness) ในการเข้าจองช่องสัญญาณและการประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณ หากพิจารณาระบบโดยรวมโดยการมองที่จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองเป็นหลัก อาจไม่สามารถบอกได้ว่าผู้ใช้บริการคนใดบ้างที่ประสบความสำเร็จในการจองและผู้ใช้บริการแต่ละคนมีโอกาสในการประสบความสำเร็จเท่าเทียมกันหรือไม่ จึงได้นำเสนอกาแฟที่สามารถอธิบายประเด็นในส่วนนี้และแสดงในรูปที่ 4.10

รูปที่ 4.10 แสดงจำนวนครั้งที่ประสบความสำเร็จในการจองของผู้ใช้บริการรายต่าง ๆ เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 16 คน จำนวนโทเค็น 8 อัน จำนวนสล็อตการจอง 16 สล็อต และค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจอง $p=0.06$ ซึ่งเป็นค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการเข้าจอง เมื่อใช้การจำลองแบบจำนวน 100,000 ครั้ง สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนว่าผู้ใช้บริการมีโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณและมีโอกาสในการประสบความสำเร็จในการจองอย่างเท่าเทียมกัน เนื่องจากการเข้าจองช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการใช้การสุ่มแบบเอกกรูป (Uniform) จึงสรุปได้ว่าระบบให้ความยุติธรรมแก่ผู้ใช้บริการและการใช้ค่าจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการวัดสมรรถนะของระบบมีความเหมาะสม

พารามิเตอร์ที่ถือได้ว่าเป็นมีความสำคัญโดยตรงต่อสมรรถนะของระบบที่ใช้โทเค็นการจองหลายอัน ได้แก่ ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการเข้าจอง ซึ่งได้แสดงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ในส่วนก่อนหน้านี้อแล้ว แต่ยังมีพารามิเตอร์อีกตัวที่ถือได้ว่าเป็นมีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากันนั่นคือ จำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสม ในส่วนถัดไปนี้จะได้นำเสนอผลการทดสอบและการวิเคราะห์เพื่อนำไปสู่การหาค่าจำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสม

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโทเค็นการจองและเปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้ใช้บริการเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 1 2 4 8 และ 16 คน และจำนวนสล็อตการจอง 16 สล็อต พบว่าภายใต้สภาวะที่ระบบรองรับจำนวนผู้ใช้บริการไม่มากนัก ($M = 2, 4$ และ 8 คน) ในช่วงแรกของกราฟ ค่าของเปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้ใช้บริการเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนโทเค็นการจอง เนื่องจากภายใต้สภาวะดังกล่าวยังมีสล็อตการจองที่ว่างอยู่พอสมควร ดังนั้นการเพิ่มจำนวนโทเค็นการจองเท่ากับ

เป็นการเพิ่มโอกาสในการประสบความสำเร็จในการจอง ทำให้สมรรถนะของระบบเพิ่มสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มจำนวนโทเค็นการจองถึงค่าที่เหมาะสมค่าหนึ่ง เพอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้ใช้บริการเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองจะมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดการชนกันของผู้ใช้บริการ เช่นเดียวกันกับในกรณีที่ผู้ใช้บริการในระบบมีจำนวนมาก ($M = 16$ คน) การเพิ่มจำนวนโทเค็นยิ่งทำให้เกิดการชนกันมากขึ้น ส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองลดลงและคงที่ในที่สุดเมื่อระบบจัดสรรจำนวนโทเค็นการจองให้กับผู้ใช้บริการมากเกินไปจนเกินไป กล่าวคือโทเค็นการจองของผู้ใช้บริการบางโทเค็นไม่ถูกใช้ในการเข้าจองช่องสัญญาณ

จากผลการจำลองแบบที่ได้แสดงในรูปที่ 4.11 สิ่งที่ดีถือว่าเป็นหัวใจสำคัญต่อสมรรถนะของระบบที่ใช้โทเค็นการจองหลายอัน คือ จำนวนของโทเค็นการจอง หากใช้จำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสมจะส่งผลให้ได้ค่าสมรรถนะของระบบที่ดีที่สุด ซึ่งจำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสม (Appropriate Number of Token : ANT) ในกรณีของจำนวนผู้ใช้บริการ 1-16 คน และจำนวนสล็อตการจอง 16 สล็อต แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 จำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสมสำหรับเทคนิคการจองแบบ MT-CFP เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 1-16 คน และจำนวนสล็อตการจอง 16 สล็อต

M	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	≥ 16
ANT	1	8	6	4	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1

จากตารางที่ 4.1 สามารถประมาณจำนวนของโทเค็นการจองที่เหมาะสม ภายใต้ระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนสล็อตการจองที่แตกต่างกันของเทคนิคการจองแบบ MT-CFP โดยประมาณได้จากสูตรในสมการที่ 4.1

$$ANT_{MT-CFP} = \begin{cases} 1 & ; \text{ when } M = 1 \text{ or } M \geq N \\ \left\lceil \frac{N}{M} \right\rceil & ; \text{ when } 1 < M < N \end{cases} \quad (4.1)$$

โดยที่ M คือ จำนวนผู้ใช้บริการในระบบ

N คือ จำนวนสล็อตการจองในระบบ

$\lceil x \rceil$ คือ เลขจำนวนเต็มที่น้อยที่สุดซึ่งมากกว่า x

เพื่อตรวจสอบว่าสูตรการประมาณจำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสมสำหรับเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ MT-CFP สามารถใช้งานได้กับระบบที่มีรองรับปริมาณโหลดที่แตกต่างกัน

จึงได้นำเสนอโดยยกตัวอย่างระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนสล๊อตการจองที่แตกต่างกัน ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.12

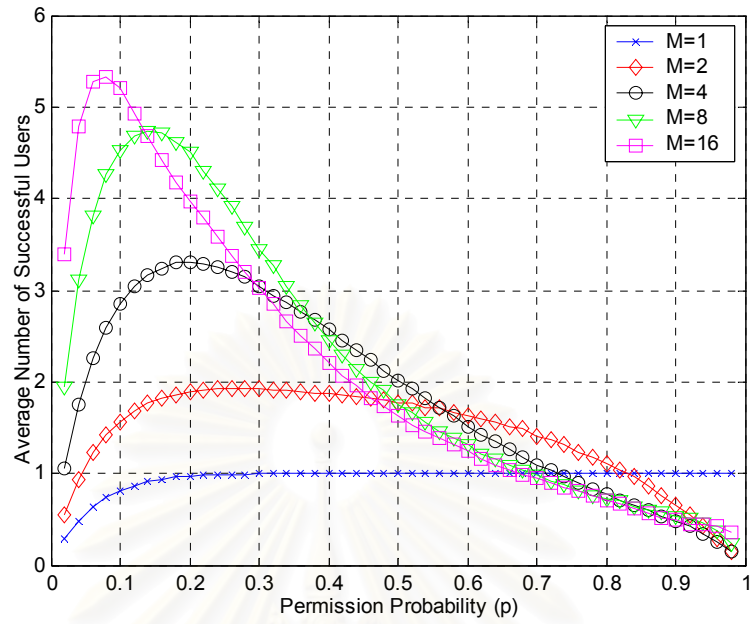
รูปที่ 4.12 แสดงจำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสม โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสูตรการประมาณและค่าที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เมื่อจำนวนสล๊อตการจอง 4 8 11 24 และ 32 สล๊อต พบว่าเมื่อพิจารณาที่จำนวนสล๊อตการจองไม่มากนัก ($N=4$ 8 และ 11 สล๊อต) สูตรการประมาณค่าจำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสมจากสมการที่ (4.1) สามารถใช้ในการประมาณค่าได้เป็นอย่างดี ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบซึ่งเส้นกราฟที่ได้จากสูตรการประมาณค่าทับกันสนิทพอดีกับเส้นกราฟที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ แต่เมื่อจำนวนสล๊อตการจองในระบบมีจำนวนมาก ($N=24$ และ 32 สล๊อต) พบว่าสูตรการประมาณจำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสม ให้ค่าที่คลาดเคลื่อนจากผลการจำลองทางคอมพิวเตอร์ไปบ้าง และได้นำเสนอในรายละเอียดดังรูปที่ 4.12 (ข) และ (ค) ซึ่งเป็นระบบที่มีสล๊อตการจอง 24 และ 32 สล๊อต ตามลำดับ เมื่อพิจารณาปริมาณของผู้ใช้บริการซึ่งสูตรการประมาณค่าให้ค่าที่คลาดเคลื่อนสามารถสรุปเป็นข้อจำกัดในการใช้สูตรการประมาณค่า โดยปริมาณของผู้ใช้บริการที่อาจทำให้การประมาณค่ามีความคลาดเคลื่อน ได้แก่

1. ปริมาณของผู้ใช้บริการ เมื่อนำไปหารกับจำนวนสล๊อตการจองแล้วไม่ลงตัวและเหลือเศษเป็นตัวเลขที่มีค่าไม่มากนัก เช่น เหลือเศษ 1 2 3 เป็นต้น ขออธิบายโดยยกตัวอย่างจากกรณีในระบบมีจำนวนสล๊อตการจอง 24 สล๊อต ดังรูปที่ 4.12 (ข) พบว่าที่จำนวนผู้ใช้บริการ 11 คน สูตรการประมาณค่าให้ค่าที่คลาดเคลื่อน เมื่อลองพิจารณาจากสูตรการประมาณซึ่งเป็นการปัดเศษขึ้น จากการนำจำนวนสล๊อตการจองหารด้วยจำนวนผู้ใช้บริการ $\left(\left\lceil \frac{N}{M} \right\rceil\right)$ ในกรณีนี้ $24/11$ ได้ผลลัพธ์ 2 เหลือเศษ 2 ซึ่งจากสูตรการประมาณค่า ควรจะได้จำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสมคือ 3 โทเค็น แต่จากผลการทดสอบค่าที่เหมาะสมคือ 2 โทเค็น ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า หากลองนำจำนวนผู้ใช้บริการคูณด้วยจำนวนโทเค็นที่เหมาะสม ค่าที่ควรจะเป็นค่าจำนวนโทเค็นที่เหมาะสม น่าจะเป็นค่าที่ทำให้ผลคูณได้ค่าที่ใกล้เคียงกับจำนวนสล๊อตการจอง พบว่าเมื่อนำจำนวนผู้ใช้บริการ (11 คน) คูณจำนวนโทเค็นที่เหมาะสมจากสูตรการประมาณค่า (3 โทเค็น) ได้ค่าเท่ากับ 33 แต่เมื่อนำไปคูณด้วยจำนวนโทเค็น 2 โทเค็น ได้ค่า 22 ซึ่งใกล้เคียงกับ 24 มากกว่าอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับ 33 ทำให้ค่าที่เป็นจำนวนโทเค็นที่เหมาะสมคือ 2 โทเค็น ซึ่งพบว่ากรณีนี้ก็เกิดเช่นเดียวกันที่จำนวนผู้ใช้บริการ 10 และ 15 คนของระบบที่มีจำนวนสล๊อตการจอง 32 สล๊อตดังรูปที่ 4.12 (ค)

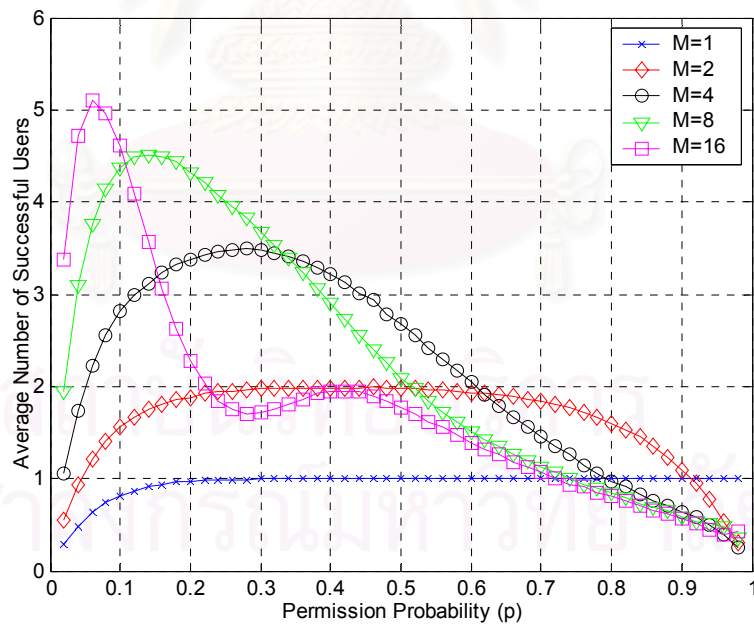
2. ปริมาณของผู้ใช้บริการมีค่าใกล้เคียงกับจำนวนสล๊อตการจอง พบว่าที่จำนวนผู้ให้บริการ 23 คน ในระบบที่มีสล๊อตการจอง 24 สล๊อต ดังรูปที่ 4.12 (ข) และที่จำนวนผู้ให้บริการ 30 และ 31 คน ในระบบที่มีสล๊อตการจอง 32 สล๊อต ดังรูปที่ 4.12 (ค) ให้ค่าการประมาณที่คลาดเคลื่อน

เมื่อพิจารณาจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง (Average Number of Successful Uses : ANSU) ณ ปริมาณของผู้ให้บริการซึ่งสูตรให้ค่าการประมาณที่คลาดเคลื่อน พบว่า ค่า ANSU แทบไม่แตกต่างกัน สังเกตได้ว่าโดยส่วนใหญ่จะมีค่าแตกต่างกันในระดับทศนิยมตำแหน่งที่ 2 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยมาก หากว่าสามารถละเอียดตรงส่วนนี้ได้ จะทำให้สูตรการประมาณค่าจำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสม สามารถใช้งานได้ดีในทุก ๆ สภาพ

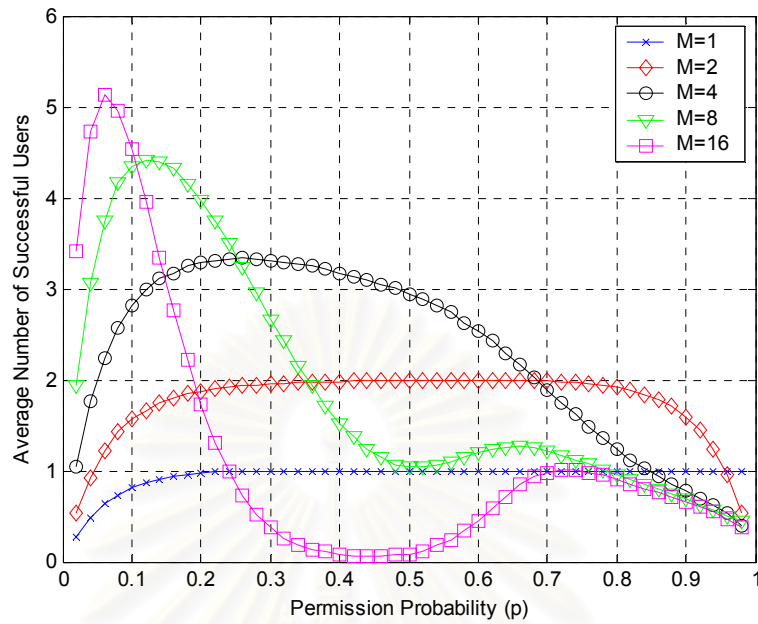
รูปที่ 4.13 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองของเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็น 1 อัน (CFP) และ เทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นหลายอัน (MT-CFP) เมื่อมีจำนวนผู้ให้บริการ 1 ถึง 16 คน และสล๊อตการจอง 16 สล๊อต พร้อมทั้งแสดงช่วงความเชื่อมั่น 99.99% (99.99% Confidence Interval) ของจำนวนผู้ให้บริการเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณ ทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยกลุ่มตัวอย่างจำนวน 25 กลุ่ม แต่ละกลุ่มทดสอบด้วยจำนวนรอบ 1,000 รอบ และแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย (Batch) จำนวน 5 กลุ่มย่อยซึ่งมีขนาดเท่ากับ 5 กลุ่มตัวอย่าง พบว่าการนำเอาแนวคิดของการใช้โทเค็นหลายอันมาประยุกต์ใช้ สามารถปรับปรุงและพัฒนาประสิทธิภาพการใช้งานสล๊อตการจองได้เป็นอย่างดี ดังจะเห็นได้จากจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองของเทคนิค MT-CFP ที่ดีกว่าเทคนิค CFP อย่างเห็นได้ชัด จากกราฟเมื่อพิจารณาที่จำนวนผู้ให้บริการ 5 คน เทคนิค MT-CFP ให้จำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองเท่ากับ 3.9562 เพิ่มขึ้นจากเทคนิค CFP ซึ่งให้ค่า 3.2695 คิดเป็นการเพิ่มขึ้น 0.6867 หรือประมาณ 20 % นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าช่วงความเชื่อมั่นที่ได้จากกราฟมีช่วงค่อนข้างแคบ แม้จะใช้ค่าระดับความเชื่อมั่นสูงถึง 99.99% แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยที่แท้จริงหรือจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองที่แท้จริง จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของเทคนิค CFP และ MT-CFP ให้ค่าที่มีความถูกต้องและแม่นยำสูง



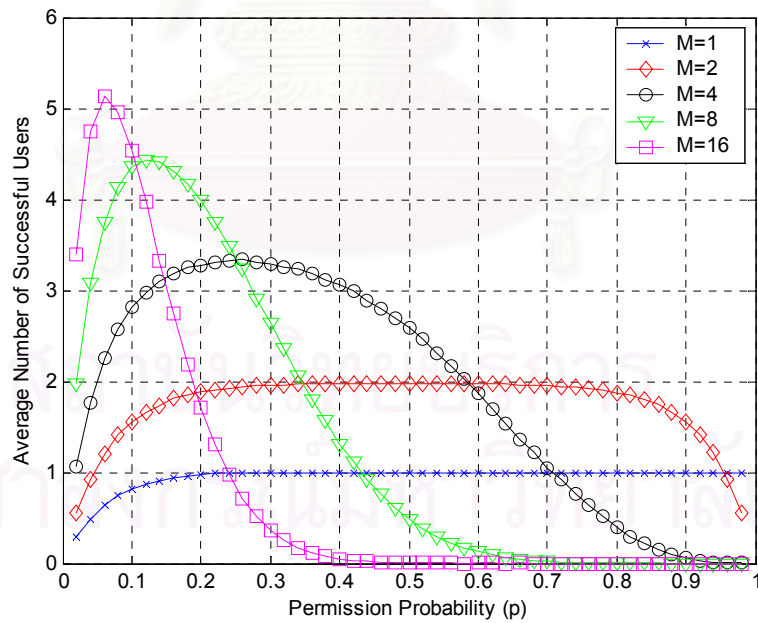
(ก) ระบบมีผู้ใช้โทเค็นการจอง 2 อัน



(ข) ระบบมีผู้ใช้โทเค็นการจอง 4 อัน

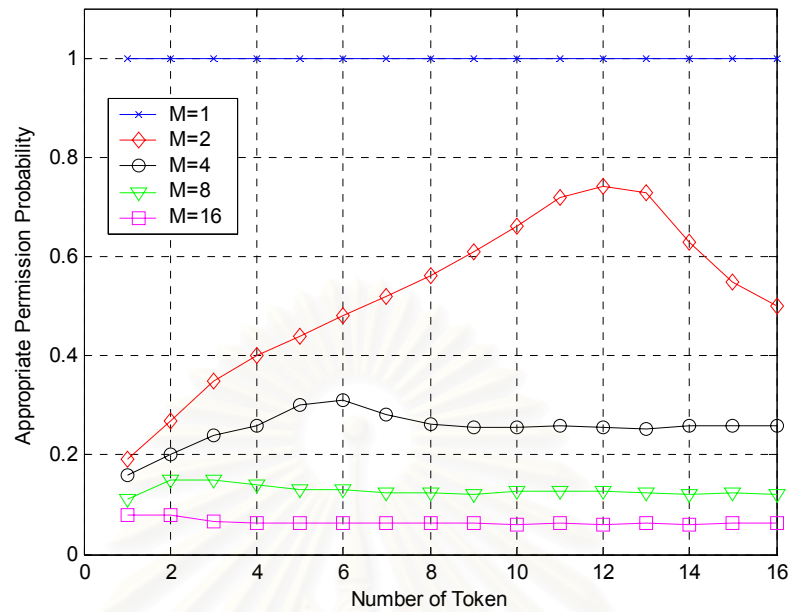


(ค) ระบบมีผู้ใช้โทเค็นการจอง 8 อัน

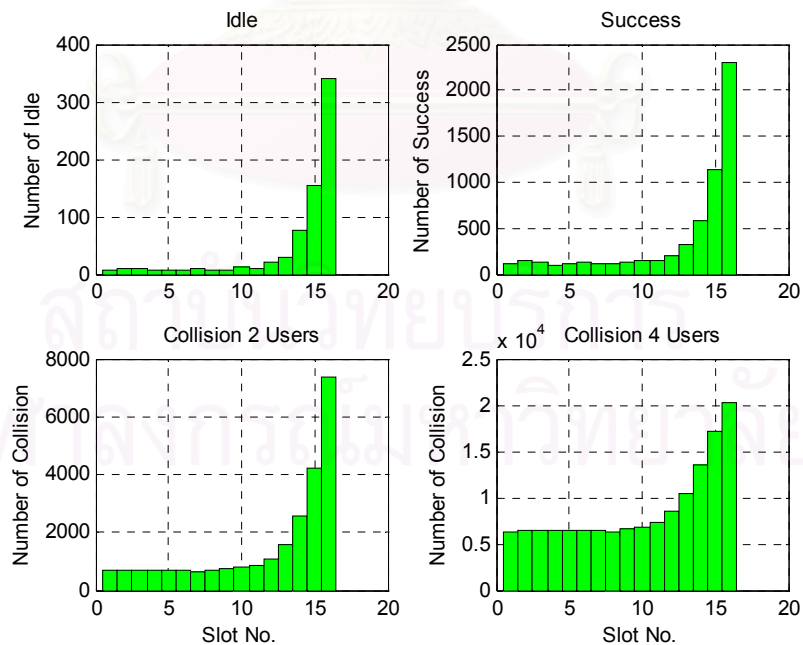


(ง) ระบบมีผู้ใช้โทเค็นการจอง 16 อัน

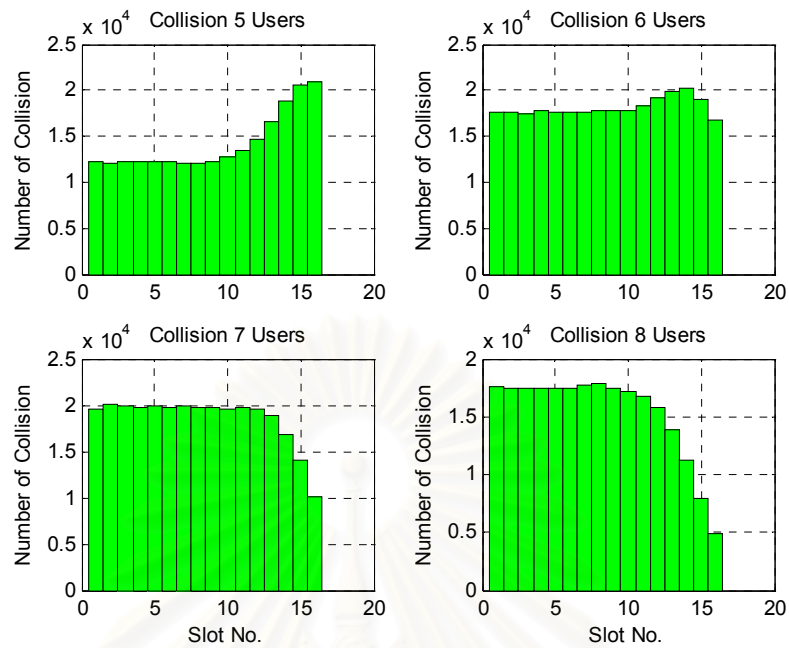
รูปที่ 4.5 จำนวนผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจองและความน่าจะเป็นในการเข้าจอง
เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 1 2 4 8 และ 16 คน และ จำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต



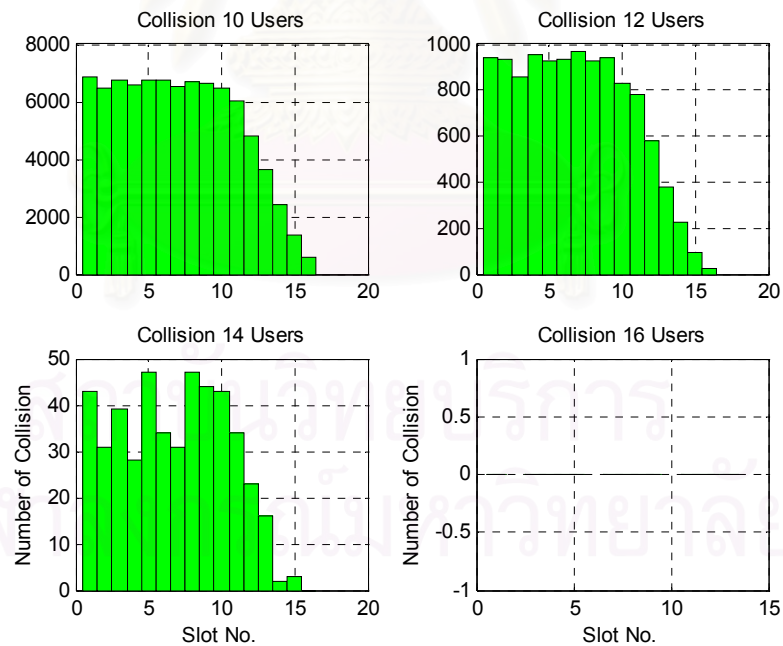
รูปที่ 4.6 ความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการเข้าจองและจำนวนโทเค็นการจอง เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 1 2 4 8 และ 16 คน และจำนวนสล็อตการจอง 16 สล็อต



(ก) จำนวนการว่าง การสำเร็จ และการชนกันของผู้ใช้บริการ 2 4 คน

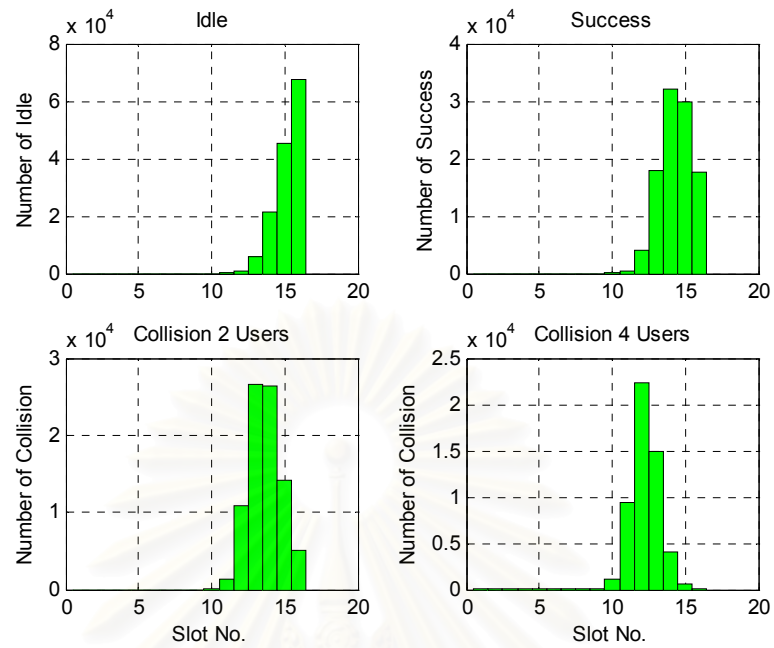


(ข) จำนวนการชนกันของผู้ใช้บริการ 5 6 7 8 คน

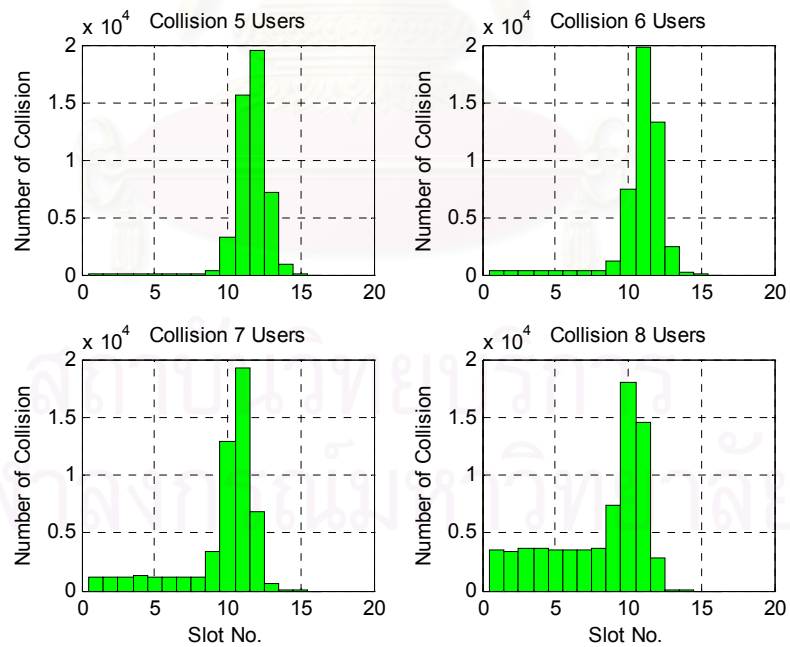


(ค) จำนวนการชนกันของผู้ใช้บริการ 10 12 14 16 คน

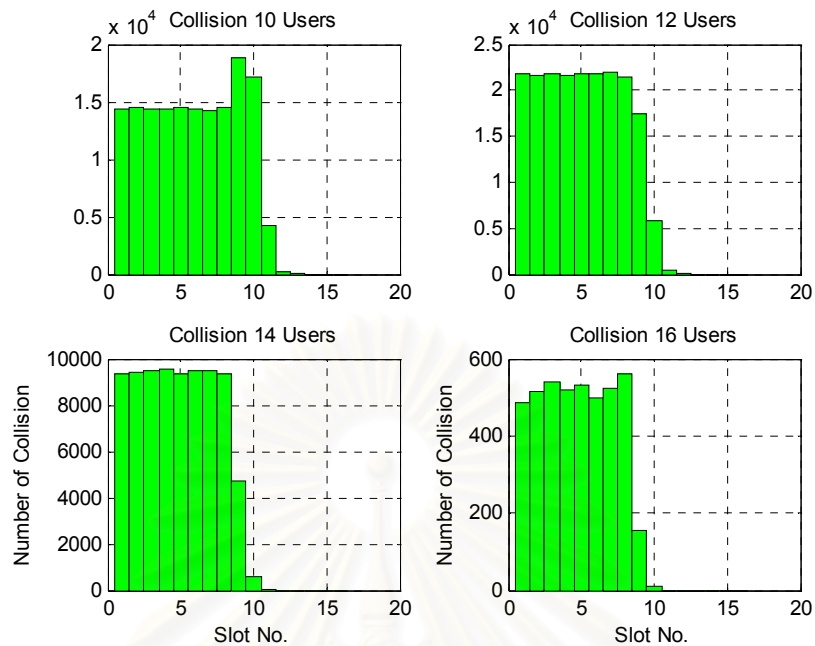
รูปที่ 4.7 จำนวนของการว่าง การสำเร็จ และการชนกันที่สล็อตการจองต่าง ๆ เมื่อจำนวนผู้ให้บริการ 16 คน จำนวนโทเค็น 8 อัน และค่าความน่าจะเป็นในการเข้าของเท่ากับ 0.44



(ก) จำนวนการว่าง การสำเร็จ และการชนกันของผู้ใช้บริการ 2 คน

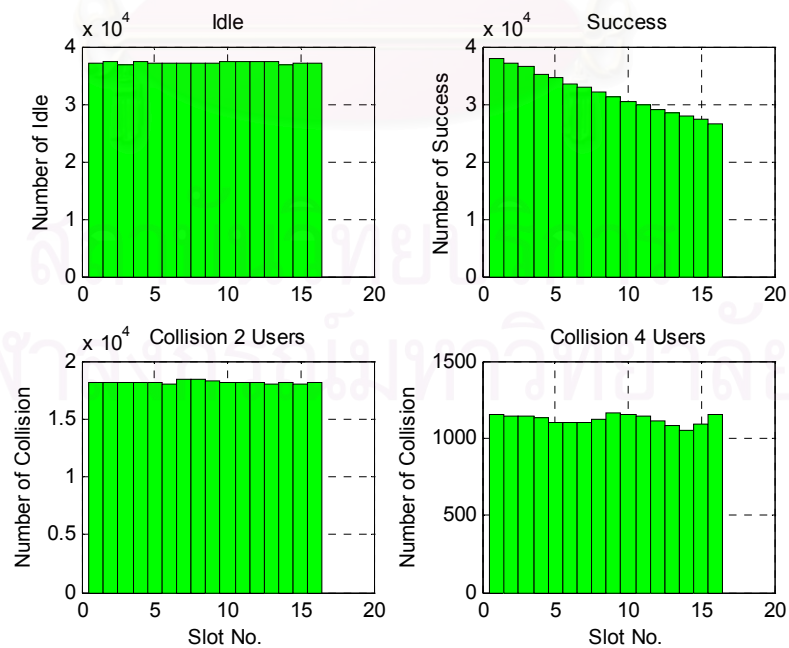


(ข) จำนวนการชนกันของผู้ใช้บริการ 5 6 7 8 คน

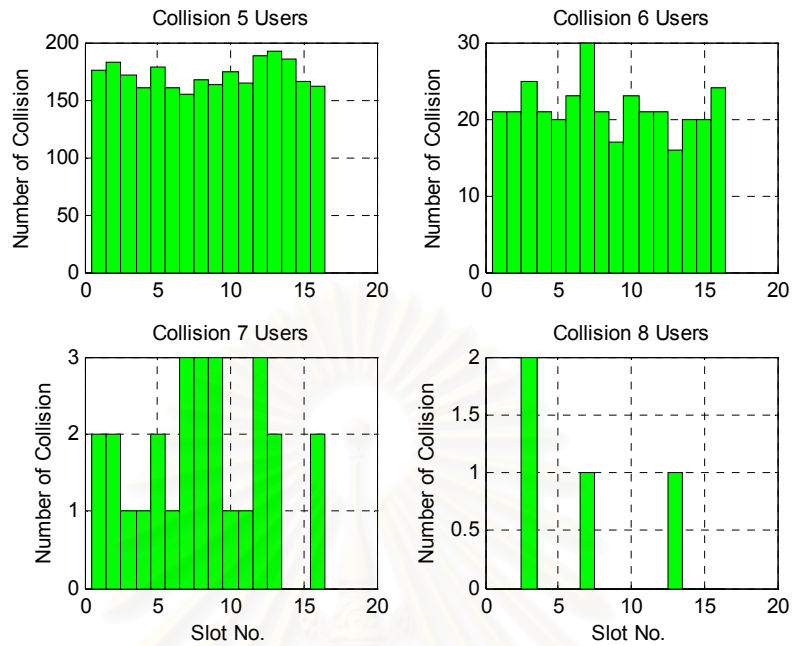


(ค) จำนวนการชนกันของผู้ใช้บริการ 10 12 14 16 คน

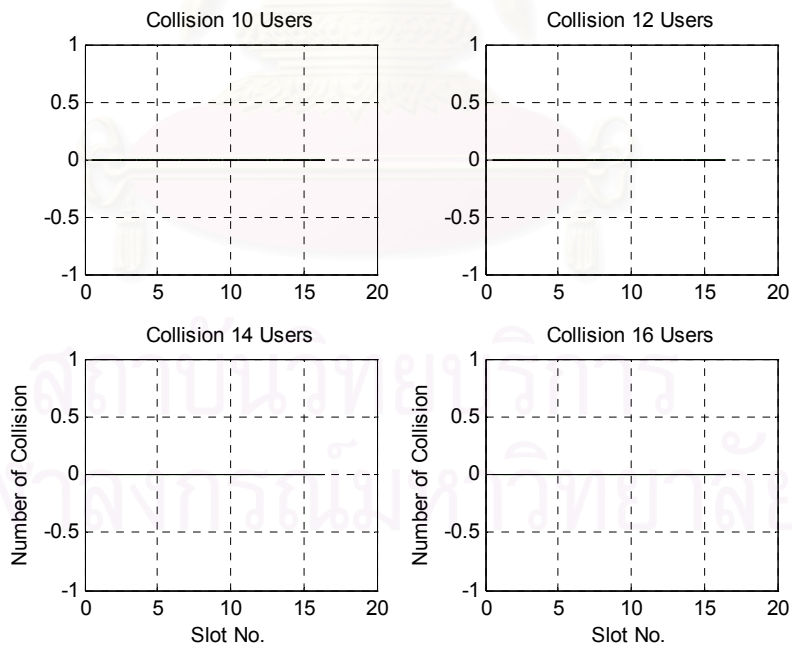
รูปที่ 4.8 จำนวนของการว่าง การสำเร็จ และการชนกันที่สล็อตการจองต่าง ๆ เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 16 คน จำนวนโทเค็น 8 อัน และค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจองเท่ากับ 0.72



(ก) จำนวนการว่าง การสำเร็จ และการชนกันของผู้ใช้บริการ 2 4 คน

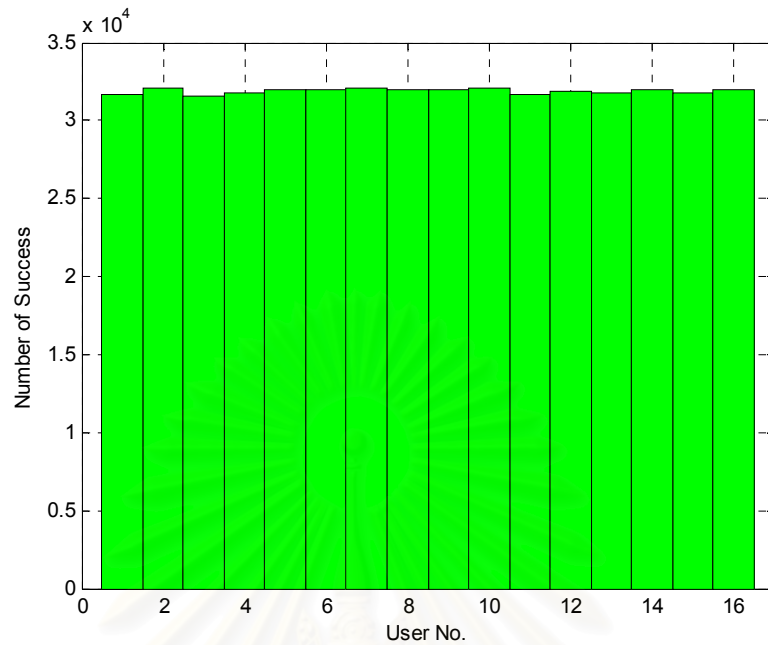


(ข) จำนวนการชนกันของผู้ใช้บริการ 5 6 7 8 คน

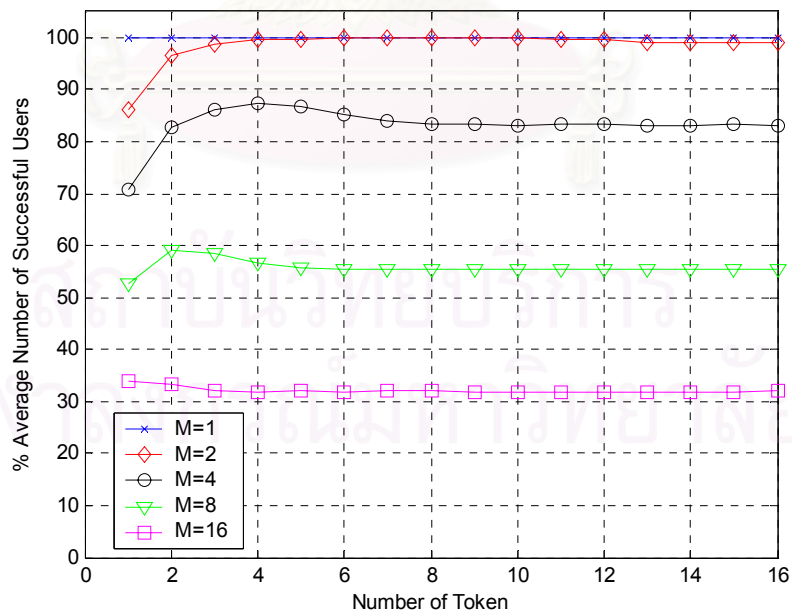


(ค) จำนวนการชนกันของผู้ใช้บริการ 10 12 14 16 คน

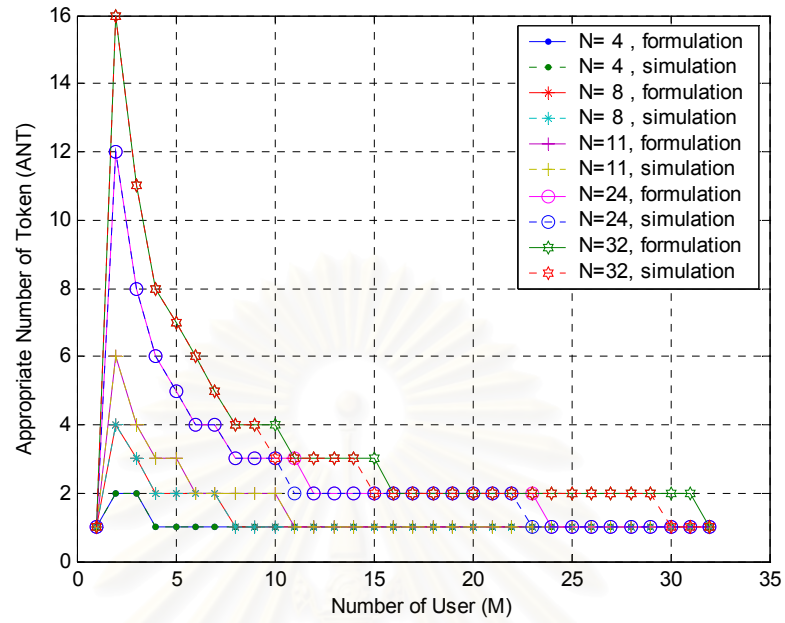
รูปที่ 4.9 จำนวนของการว่าง การสำเร็จ และการชนกันที่สล็อตการจองต่าง ๆ เมื่อจำนวนผู้ให้บริการ 16 คน จำนวนโทเค็น 8 อัน และใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการเข้าจอง $p=0.06$



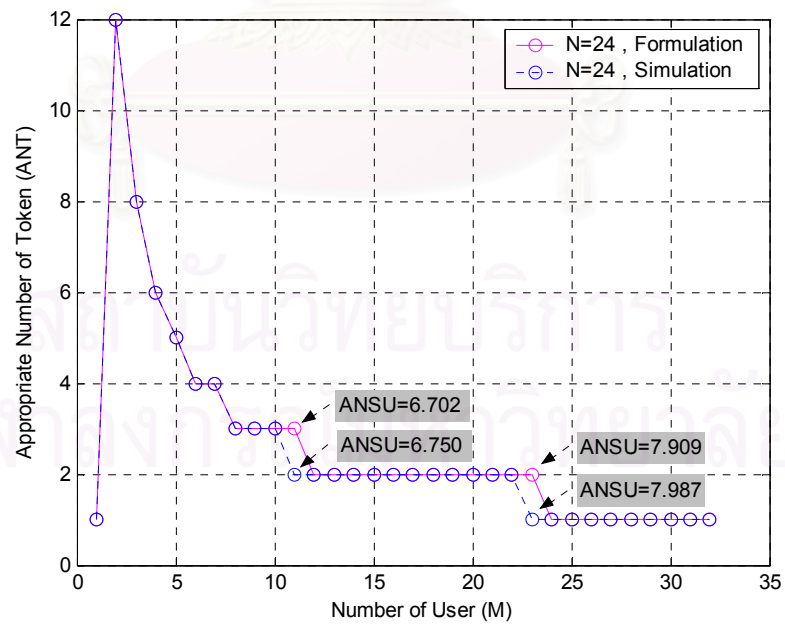
รูปที่ 4.10 จำนวนครั้งที่ประสบความสำเร็จในการจองของผู้ใช้บริการรายต่าง ๆ เมื่อจำนวนผู้ให้บริการ 16 คน จำนวนโทเค็น 8 อัน และค่าความน่าจะเป็นในการเข้าจอง $p=0.06$



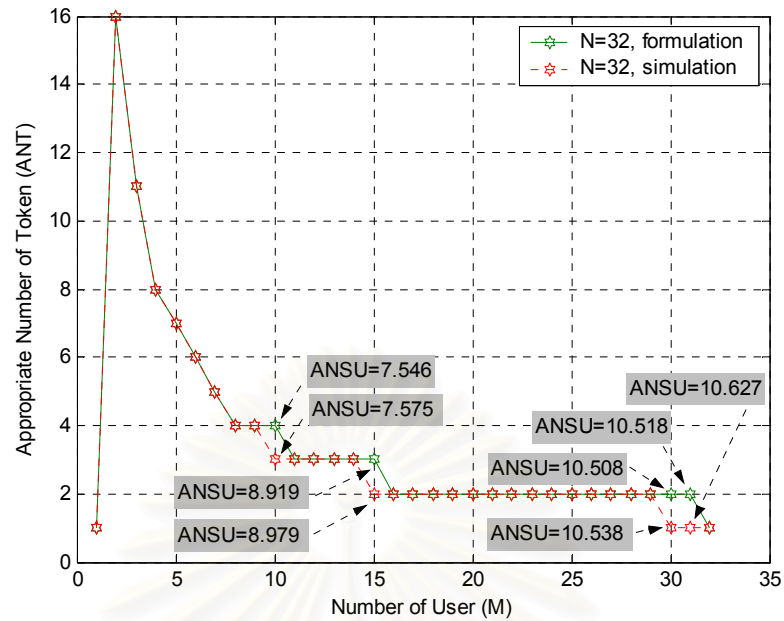
รูปที่ 4.11 จำนวนโทเค็นการจองและเปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้บริการเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อจำนวนผู้ให้บริการ 1 2 4 8 และ 16 คน และจำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต



(ก) ระบบมีจำนวนสลิตตรวจของ 4 8 11 24 และ 32 สลิต

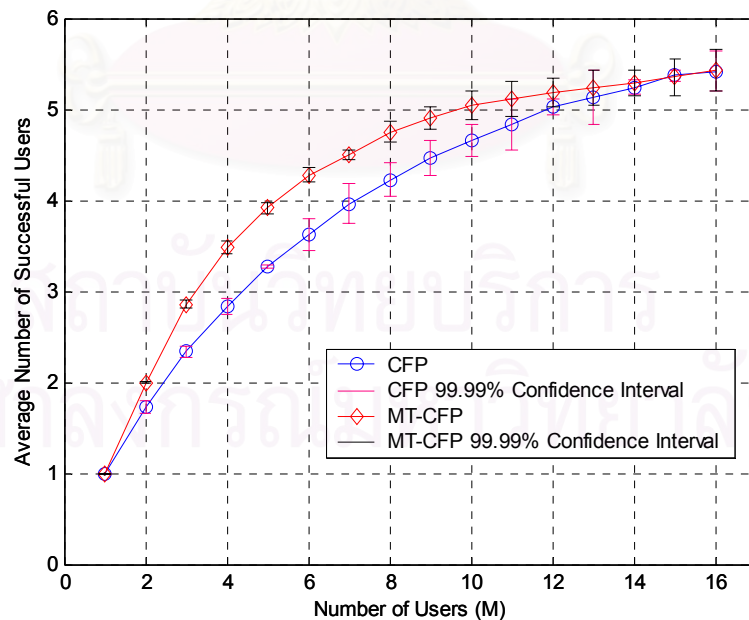


(ข) ระบบมีจำนวนสลิตตรวจของ 24 สลิต



(ค) ระบบมีจำนวนสล๊อตการจอง 32 สล๊อต

รูปที่ 4.12 จำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสม โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสูตรการประมาณ และค่าที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เมื่อจำนวนสล๊อตการจอง 4 8 11 24 และ 32 สล๊อต



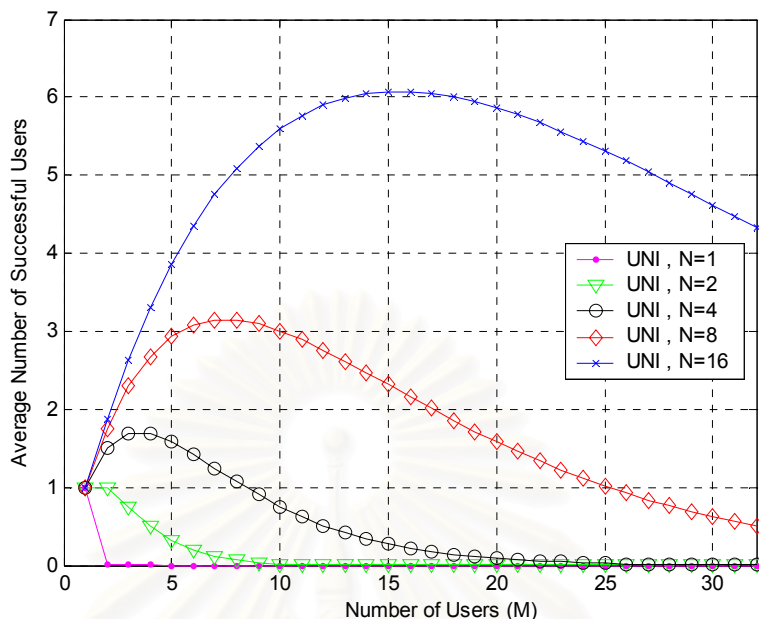
รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองของเทคนิค CFP และ MT-CFP เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 16 คน และสล๊อตการจอง 16 สล๊อต

4.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ MT-UNI

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์จะนำเสนอโดยแบ่งออกเป็น 2 หัวข้อย่อย โดยแบ่งหัวข้อออกตามระบบที่พิจารณาเป็น 2 ระบบ คือ ระบบที่ใช้โทเค็นการจองเพียง 1 อัน ได้แก่ เทคนิค UNI และระบบที่ใช้โทเค็นการจองหลายอัน ได้แก่ เทคนิค MT-UNI พร้อมทั้งได้แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะและการวิเคราะห์ของทั้งสองเทคนิคดังกล่าว

4.2.1 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิค UNI

รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองและจำนวนผู้ใช้บริการเมื่อใช้เทคนิค UNI และจำนวนสล็อตการจอง 1 2 4 8 และ 16 สล็อต จากผลที่ได้พบว่าเมื่อจำนวนผู้ใช้บริการมีจำนวนเท่ากับ 1 คน จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองของทุกระบบจะมีค่าเป็น 1 เนื่องจากผู้ใช้บริการรายนั้นจะประสบความสำเร็จในการจองอย่างแน่นอน แต่เมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการเข้าไปในระบบ ในช่วงแรกจะพบว่าสมรรถนะของระบบจะเพิ่มขึ้น เพราะการเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการที่เข้าไปจองสล็อตการจองจะช่วยลดโอกาสในการว่างของสล็อตการจอง อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าสมรรถนะของระบบจะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งจำนวนผู้ใช้บริการมีจำนวนเท่ากับจำนวนสล็อตการจอง หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการเข้าไปในระบบ สมรรถนะของระบบจะมีแนวโน้มลดลง โดยสาเหตุที่สมรรถนะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งจำนวนผู้ใช้บริการมีจำนวนเท่ากับจำนวนสล็อตการจองเนื่องมาจากการจองสล็อตการจองจะสำเร็จก็ต่อเมื่อมีผู้ใช้บริการที่เข้าจองเพียง 1 รายต่อ 1 สล็อตการจอง ดังนั้นจำนวนผู้ใช้บริการสูงสุดที่ระบบสามารถรองรับได้ในขณะหนึ่งจึงเท่ากับจำนวนสล็อตการจอง แต่หลังจากนั้นเมื่อจำนวนผู้ใช้บริการมีจำนวนสูงกว่าจำนวนสล็อตการจอง จะทำให้ผู้ใช้บริการบางรายสุ่มเลือกสล็อตได้เป็นสล็อตเดียวกัน จึงเกิดการชนกันขึ้นและส่งผลให้สมรรถนะของระบบลดลง นอกจากนี้จะพบว่าสมรรถนะของระบบที่มีจำนวนสล็อตการจองในเฟรมมากกว่าจะมีค่าสูงกว่า เพราะการที่จำนวนสล็อตการจองมากขึ้น จะเพิ่มทางเลือกในการสุ่มเข้าจองของผู้ใช้บริการและช่วยลดโอกาสที่ผู้ใช้บริการจะเกิดการชนกัน



รูปที่ 4.14 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองและจำนวนผู้ใช้บริการเมื่อใช้เทคนิค UNI และจำนวนสล๊อตการจอง 1 2 4 8 และ 16 สล๊อต

4.2.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิค MT-UNI

รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้บริการเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองและจำนวนผู้ใช้บริการของเทคนิค MT-UNI ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้โหนดหลายอัน เมื่อจำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต และจำนวนของโหนด 1 2 4 8 และ 16 อัน พบว่าการเพิ่มจำนวนโหนดการจองมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะของระบบ แต่การเพิ่มจำนวนโหนดการจองจะได้ผลดีเมื่อจำนวนผู้ใช้บริการในระบบไม่สูงมากนัก เพราะในระบบดังกล่าวนี้ การเพิ่มจำนวนโหนดการจองถือเป็นการเพิ่มโอกาสในการประสบความสำเร็จในการจองให้มากขึ้น ในทางตรงกันข้ามระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการมาก การเพิ่มขึ้นของโหนดการจองเท่ากับเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกันให้มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้สมรรถนะของระบบลดลง ดังนั้นการเพิ่มจำนวนโหนดการจองจะได้ผลดีต้องพิจารณาปริมาณผู้ใช้บริการที่มีอยู่ในระบบในขณะนั้นด้วย

หากพิจารณาสมรรถนะของเทคนิคการจองช่องสัญญาณวิธีการนี้ โดยวัดจากจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองเป็นหลัก จึงเกิดมีคำถามขึ้นว่าผู้ใช้บริการที่ประสบความสำเร็จในการจองเป็นคนเดิมหรือไม่ หรือ ผู้ใช้บริการมีโอกาสในการประสบความสำเร็จในการจองเท่าเทียมกันหรือไม่ เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องพิจารณาในจุดนี้ เพราะในโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลาง เรื่องของความยุติธรรม เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากประการหนึ่ง

เพื่ออธิบายประเด็นในส่วนนี้และตอบคำถามว่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการวัดสมรรถนะนี้มีความเหมาะสมเพียงใด จึงได้นำเสนอไว้ในรูปที่ 4.16

รูปที่ 4.16 จำนวนครั้งที่ประสบความสำเร็จในการจองของผู้ใช้บริการรายต่าง ๆ เมื่อจำนวนผู้ให้บริการ 8 คน จำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต และจำนวนโทเค็นการจอง 2 อัน โดยใช้การจำลองแบบจำนวน 10,000 ครั้ง สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนว่าผู้ให้บริการมีโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณและมีโอกาสในการประสบความสำเร็จในการจองอย่างเท่าเทียมกัน เนื่องจากการเข้าจองช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการใช้การสุ่มแบบเอกกรุป (Uniform) จึงสรุปได้ว่าระบบให้ความยุติธรรมแก่ผู้ให้บริการและการใช้ค่าจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการวัดสมรรถนะของระบบมีความเหมาะสม

รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโทเค็นการจองและเปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้ให้บริการเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อจำนวนผู้ให้บริการ 2 4 8 และ 16 คน และจำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต พบว่าภายใต้สภาวะที่จำนวนผู้ให้บริการมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับจำนวนสล๊อตการจอง ($M = 2, 4$ และ 8 คน) เปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้ให้บริการเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองเพิ่มขึ้นตามจำนวนของโทเค็นการจองที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากจำนวนโทเค็นที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดการใช้งานของสล๊อตการจองที่ว่างอยู่ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและส่งผลถึงค่าสมรรถนะของระบบที่ดีขึ้นด้วย แต่การเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้ให้บริการเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง ก็ถูกจำกัดด้วยค่าของจำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสม หากเพิ่มจำนวนโทเค็นการจองมากกว่าค่าค่านี้ จะไม่ส่งผลต่อการปรับปรุงสมรรถนะของระบบ ในทางตรงข้ามกลับจะทำให้สมรรถนะของระบบลดลงและเข้าสู่ศูนย์ในที่สุด กล่าวคือ ไม่มีผู้ใดประสบความสำเร็จในการจอง หากจำนวนโทเค็นการจองมีจำนวนมากเกินไป นอกจากนี้ยังพบว่าจำนวนของผู้ใช้บริการที่มีค่าน้อยมาก ๆ เมื่อเทียบกับจำนวนสล๊อตการจอง เช่น ผู้ใช้บริการ 2 คน ในระบบที่มีสล๊อตการจอง 16 สล๊อต เป็นต้น การเพิ่มจำนวนโทเค็นการจองจะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะของระบบเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้เพราะว่าภายใต้สภาวะเช่นนี้ ระบบที่ใช้โทเค็น 1 อัน ให้สมรรถนะที่ค่อนข้างจะดีมากอยู่แล้ว

จากผลการจำลองแบบที่ได้แสดงในรูปที่ 4.17 จำนวนของโทเค็นการจองถือได้ว่าเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อสมรรถนะของระบบ หากใช้จำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสมจะส่งผลให้ได้ค่าสมรรถนะของระบบที่ดีที่สุด ซึ่งจำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสม (Appropriate Number of Token : ANT) ในกรณีของจำนวนผู้ให้บริการ 1-16 คน และจำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 จำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสมสำหรับเทคนิคการจองแบบ MT-UNI

เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 1-16 คน และจำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต

M	1	2	3	4	5	6	7	8	> 8
ANT	1	8	5	4	3	2	2	2	1

จากตารางที่ 4.2 สามารถประมาณจำนวนของโทเค็นการจองที่เหมาะสม ภายใต้ระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนสล๊อตการจองที่แตกต่างกันของเทคนิคการจองแบบ MT-CFP โดยประมาณได้จากสูตรในสมการที่ 4.2

$$ANT_{MT-UNI} = \begin{cases} 1 & ; \text{ when } M = 1 \text{ or } M > \frac{N}{2} \\ \left\lfloor \frac{N}{M} \right\rfloor & ; \text{ when } 1 < M \leq \frac{N}{2} \end{cases} \quad (4.2)$$

โดยที่ M คือ จำนวนผู้ใช้บริการในระบบ

N คือ จำนวนสล๊อตการจองในระบบ

$\lfloor x \rfloor$ คือ เลขจำนวนเต็มที่ยกที่สุดซึ่งน้อยกว่า x

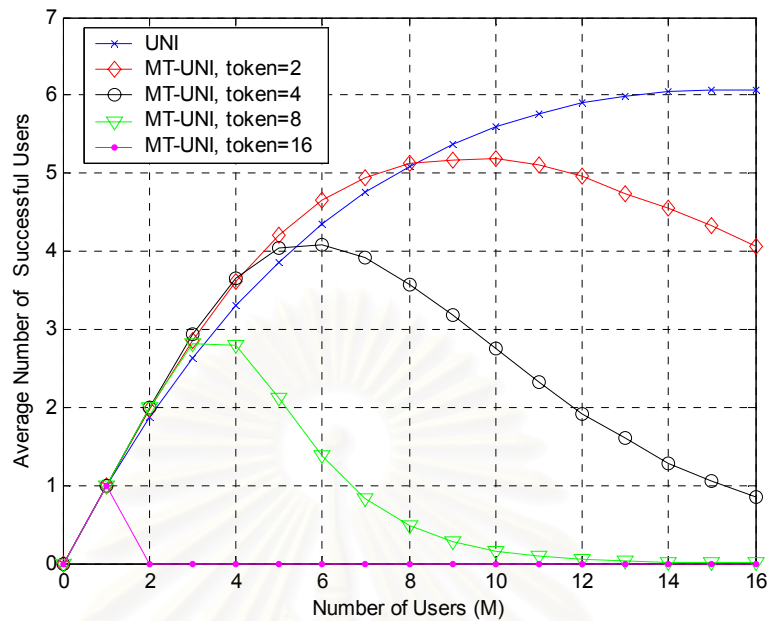
เพื่อตรวจสอบว่าสูตรการประมาณจำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสมสำหรับเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ MT-UNI สามารถใช้งานได้กับระบบที่มีรองรับปริมาณโหลดที่แตกต่างกัน จึงได้นำเสนอโดยยกตัวอย่างระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนสล๊อตการจองที่แตกต่างกัน ดังที่ได้แสดงในรูปที่ 4.18

รูปที่ 4.18 แสดงจำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสม โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสูตรการประมาณและค่าที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เมื่อจำนวนสล๊อตการจอง 4 8 11 24 และ 32 สล๊อต พบว่า สูตรการประมาณค่าจำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสมสำหรับเทคนิคการจองช่องสัญญาณวิธีการ MT-UNI จากสมการที่ (4.2) สามารถใช้ในการประมาณค่าได้เป็นอย่างดี ดังจะเห็นได้จากผลการทดสอบซึ่งเส้นกราฟที่ได้จากสูตรการประมาณค่าทับกันสนิทพอดีกับเส้นกราฟที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ แต่มีบางปริมาณของผู้ใช้บริการซึ่งสูตรการประมาณค่าจำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสมให้ค่าที่คลาดเคลื่อน ซึ่งตั้งข้อสังเกตได้ว่า จะเกิดในระบบที่มีจำนวนสล๊อตการจองค่อนข้างมากและจะเกิดขึ้นเมื่อปริมาณของผู้ใช้บริการมีค่าใกล้เคียงกับครึ่งหนึ่งของจำนวนสล๊อตการจอง ซึ่งในรูปที่ 4.18 นี้ คือ ปริมาณของผู้ใช้บริการจำนวน 16 คนของระบบที่มีจำนวนสล๊อตการจอง 32 สล๊อต แต่เมื่อพิจารณาจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง (Average Number of Successful Uses : ANSU) ณ

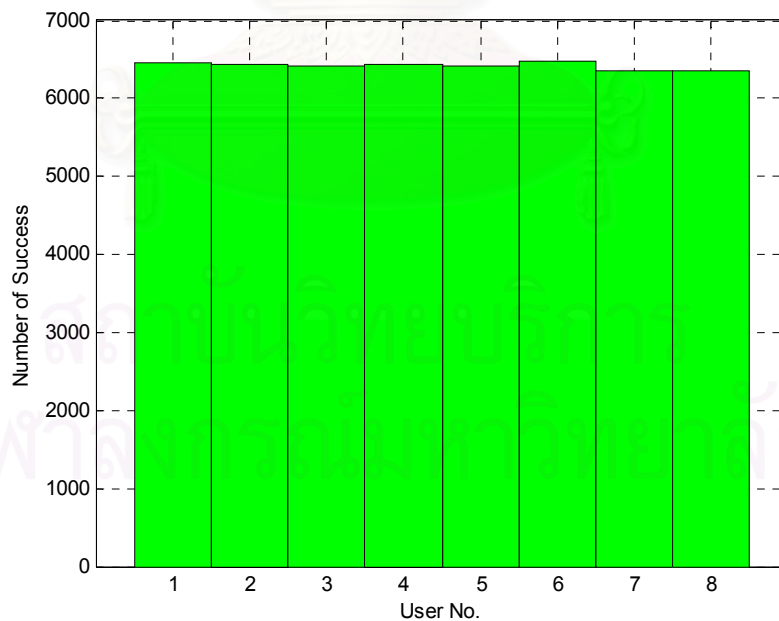
ปริมาณของผู้ใช้บริการซึ่งสูตรให้ค่าการประมาณที่คลาดเคลื่อน พบว่า ค่า ANSU แทบไม่แตกต่างกัน โดยจะมีค่าแตกต่างกันในระดับทศนิยมตำแหน่งที่ 2 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่น้อยมาก หากว่าต้องการความละเอียดในการประมาณไม่สูงมากนัก สูตรการประมาณค่าจำนวนโหนดการจอบที่เหมาะสมนี้ ถือว่าให้ค่าที่ถูกต้องพอสมควรในทุก ๆ สภาวะของจำนวนผู้ให้บริการและจำนวนสล็อตการจอบค่าต่าง ๆ

ในส่วนสุดท้ายนี้จะได้นำเสนอการเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคการเลือกสล็อตการจอบอย่างสุ่มของระบบที่ใช้โหนด 1 อันและระบบที่ใช้โหนดหลายอัน ดังแสดงในรูปที่ 4.19

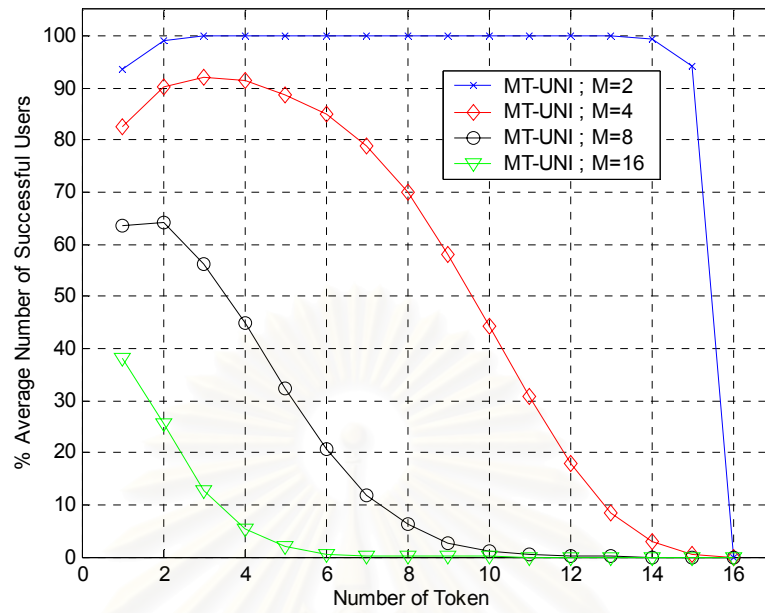
รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอบของเทคนิคการจอบช่องสัญญาณที่ใช้โหนด 1 อัน (UNI) และ เทคนิคการจอบช่องสัญญาณที่ใช้โหนดหลายอัน (MT-UNI) เมื่อมีจำนวนผู้ให้บริการ 1 ถึง 16 คน และสล็อตการจอบ 16 สล็อต พร้อมทั้งแสดงช่วงความเชื่อมั่น 99.99% (99.99% Confidence Interval) ของจำนวนผู้ให้บริการเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอบช่องสัญญาณ ทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยกลุ่มตัวอย่างจำนวน 25 กลุ่ม แต่ละกลุ่มทดสอบด้วยจำนวนรอบ 1,000 รอบ และแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย (Batch) จำนวน 5 กลุ่มย่อยซึ่งมีขนาดเท่ากับ 5 กลุ่มตัวอย่าง พบว่าเทคนิค MT-UNI ให้สมรรถนะของระบบโดยรวมที่ดีกว่าเทคนิค UNI ดังจะเห็นได้จากจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอบของเทคนิค MT-UNI ที่สูงกว่าเทคนิค UNI แต่มีข้อสังเกตว่าการพัฒนาขึ้นของสมรรถนะของระบบจะไม่โดดเด่นนัก เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิค MT-CFP ที่ให้สมรรถนะที่ดีกว่า CFP ค่อนข้างชัดเจน อีกทั้งเทคนิค MT-UNI ยังมีช่วงที่ให้สมรรถนะที่ดีกว่าเทคนิค UNI ค่อนข้างจำกัด ดังจะเห็นได้จากกราฟในรูปที่ 4.19 ที่สมรรถนะจะดีขึ้นในช่วงที่ระบบมีผู้ให้บริการ 2 ถึง 8 คน สาเหตุที่สมรรถนะของระบบมีการปรับปรุงขึ้นเพียงเล็กน้อยและมีช่วงการทำงานที่จำกัดนี้ เนื่องจากเทคนิค UNI เป็นเทคนิคที่ให้สมรรถนะของระบบที่ค่อนข้างดีอยู่แล้ว เนื่องจากมีการใช้งานสล็อตการจอบแต่ละสล็อตอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าช่วงความเชื่อมั่นที่ได้จากกราฟมีช่วงค่อนข้างแคบ แม้จะใช้ค่าระดับความเชื่อมั่นสูงถึง 99.99% แสดงให้เห็นว่าจำนวนของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์มีปริมาณที่มากเพียงพอ จึงทำให้ค่าที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยที่แท้จริงหรือจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอบที่แท้จริง จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของเทคนิค UNI และ MT-UNI ให้ค่าที่มีความถูกต้องและแม่นยำสูง



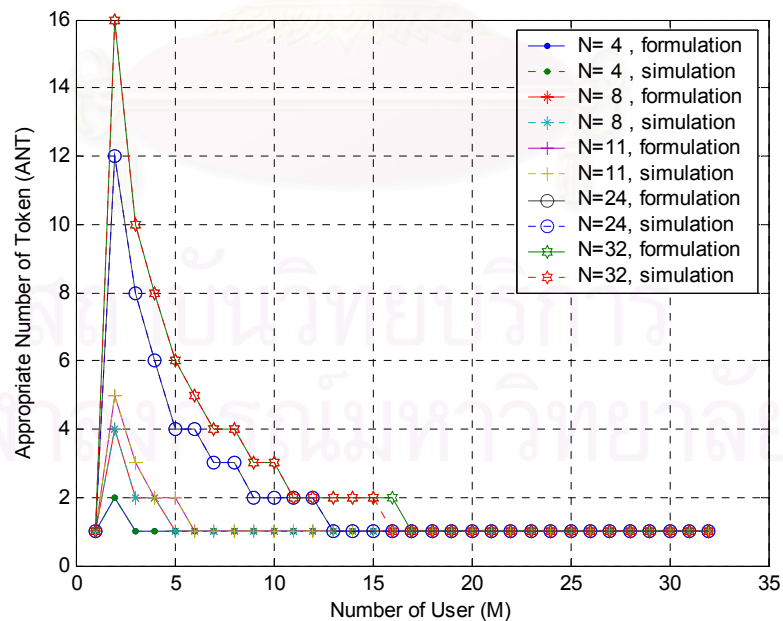
รูปที่ 4.15 จำนวนผู้ใช้บริการเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองและจำนวนผู้ใช้บริการ เมื่อจำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต และจำนวนของโทเค็น 1 2 4 8 และ 16 อัน



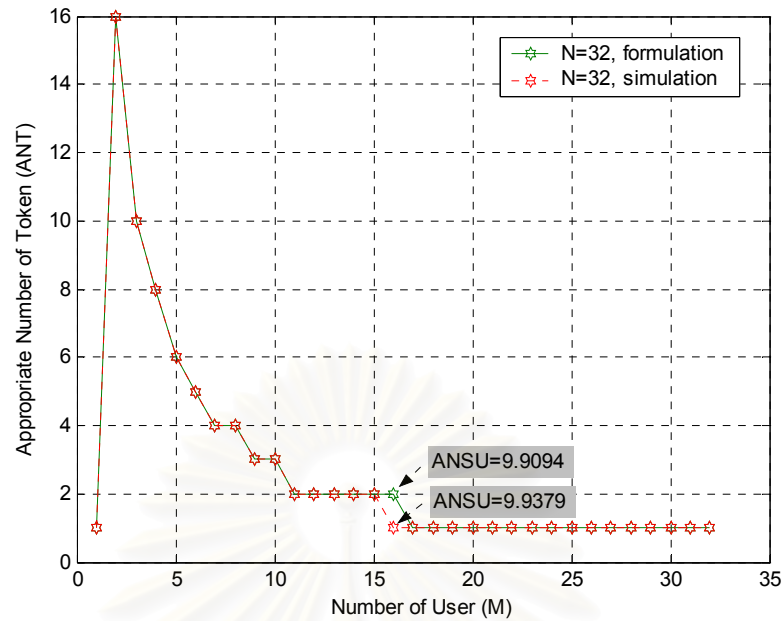
รูปที่ 4.16 จำนวนครั้งที่ประสบความสำเร็จในการจองของผู้ใช้บริการรายต่าง ๆ เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 8 คน จำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต และจำนวนโทเค็นการจอง 2 อัน



รูปที่ 4.17 จำนวนโทเค็นการจองและเปอร์เซ็นต์ของจำนวนผู้ใช้บริการเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจอง เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 2 4 8 และ 16 คน และจำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต

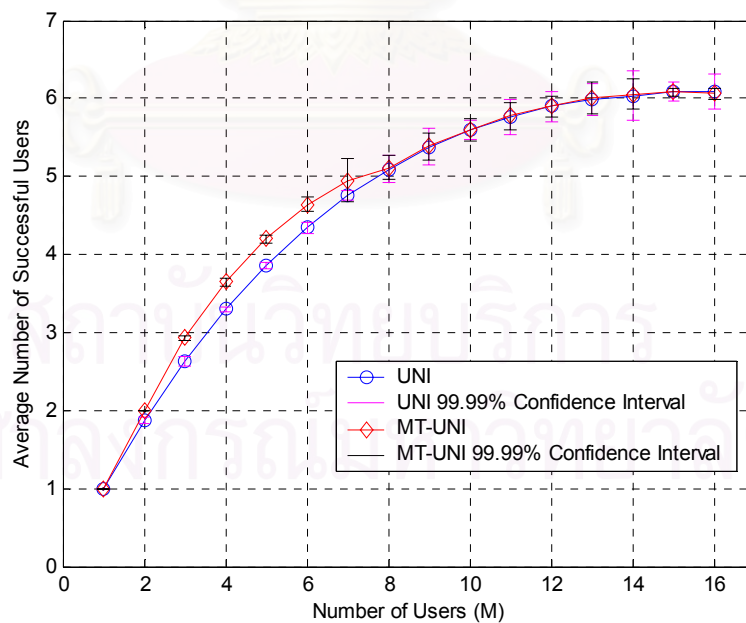


(ก) ระบบที่มีจำนวนสล๊อตการจอง 4 8 11 24 และ 32 สล๊อต



(ข) ระบบที่มีจำนวนสล็ตการจอง 32 สล็ต

รูปที่ 4.18 จำนวนโทเค้นการจองที่เหมาะสม โดยการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากสูตรการประมาณ และค่าที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์ เมื่อจำนวนสล็ตการจอง 4 8 11 24 และ 32 สล็ต



รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองของเทคนิค UNI และ MT-UNI เมื่อมีจำนวนผู้ให้บริการ 1 ถึง 16 คน และสล็ตการจอง 16 สล็ต

4.3 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ MT-UNI+LA

ผลการทดสอบและการวิเคราะห์จะนำเสนอโดยแบ่งออกเป็น 3 หัวข้อย่อย โดยแบ่งหัวข้อออกตามระบบที่พิจารณาเป็น 2 ระบบ คือ ระบบที่ใช้โทเค็นการจอง 1 อันได้แก่ เทคนิค UNI+LA และระบบที่ใช้โทเค็นการจองหลายอัน ซึ่งได้นำเสนอเป็น 2 เทคนิคย่อย ได้แก่ เทคนิค MT-UNI+LAU และ MT-UNI+LAT พร้อมทั้งได้แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะและการวิเคราะห์ของเทคนิคดังกล่าว

4.3.1 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิค UNI+LA

จากเทคนิค UNI จะเห็นได้ว่าสมรรถนะของระบบจะลดลงเมื่อจำนวนผู้ใช้บริการมากกว่าจำนวนสลอตการจอง ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหานี้จึงได้เสนอเทคนิคการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ (UNI+LA) ด้วยค่าความน่าจะเป็นในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ (Limited Access Probability) จะเห็นว่าพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการทำงานของเทคนิคการจองช่องสัญญาณวิธีการนี้คือค่าความน่าจะเป็นในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ ซึ่งได้นำเสนอในรูปที่ 4.20

รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้บริการและค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่ทำให้สมรรถนะของระบบสูงสุด เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 32 คน และสลอตการจอง 2 4 8 และ 16 สลอต พบว่า ในช่วงแรกที่จำนวนผู้ใช้บริการมีจำนวนต่ำกว่าจำนวนสลอตการจอง ค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่เหมาะสมจะมีค่าเท่ากับ 1.0 แต่เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการมีจำนวนเกินกว่าจำนวนสลอตจอง ค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่เหมาะสมในกรณีนี้จะมีค่าไม่เท่ากับ 1.0 โดยค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่เหมาะสมจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการเพิ่มสูงขึ้น และจะลดลงเข้าใกล้ศูนย์เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการเข้าใกล้อนันต์ ทั้งนี้เพื่อเป็นการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการที่จะสามารถผ่านเข้าไปจองช่องสัญญาณได้ในขณะหนึ่ง ๆ ไม่ให้มีจำนวนสูงเกินกว่าจำนวนสลอตการจอง และทำให้ระบบสามารถรักษาระดับของค่าสมรรถนะให้มีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อจำนวนผู้ใช้บริการมีจำนวนสูงเกินกว่าจำนวนสลอตการจอง การกำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่เหมาะสมจะช่วยให้สามารถรักษาระดับของค่าสมรรถนะของระบบได้

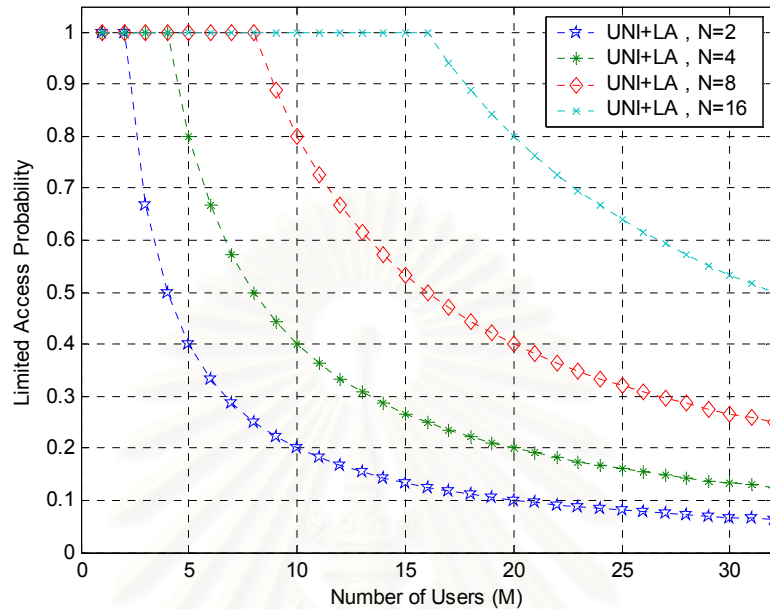
จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่ทำให้ค่าสมรรถนะของระบบสูงสุดนั้นจะขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนสลอตการจอง โดยในกรณีที่จำนวนผู้ใช้บริการมีจำนวนต่ำกว่าจำนวนสลอตการจอง ค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่ทำให้ค่าสมรรถนะของระบบมีค่าสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ 1.0 แต่เมื่อจำนวน

ผู้ใช้บริการมีจำนวนสูงกว่าจำนวนสล๊อตการจอง ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่ทำให้ค่าสมรรถนะของระบบสูงสุดจะมีค่าเท่ากับ $\min(1, (\frac{N}{M}))$

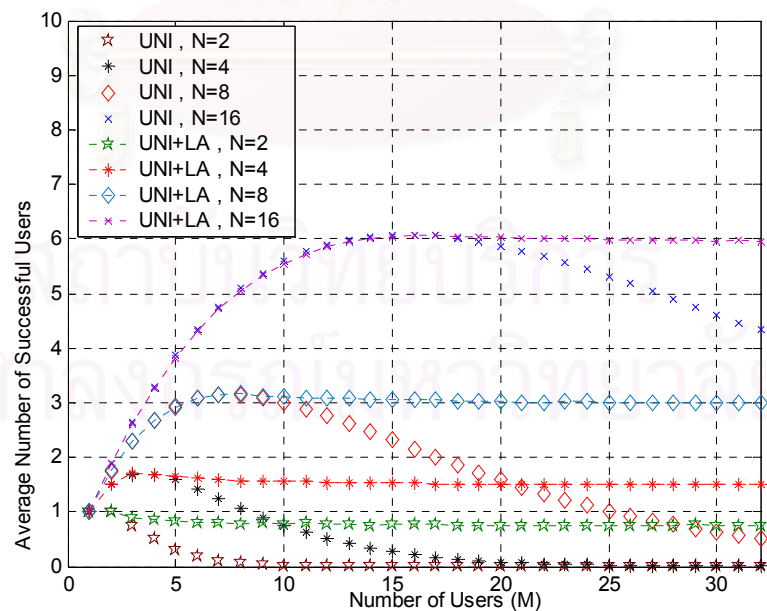
รูปที่ 4.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของเทคนิค UNI+LA เปรียบเทียบกับเทคนิค UNI เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 32 คน และสล๊อตการจอง 2 4 8 และ 16 สล๊อต จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าเมื่อจำนวนผู้ใช้บริการต่ำกว่าจำนวนสล๊อตการจอง ค่าสมรรถนะของระบบจะมีค่าเท่ากับค่าสมรรถนะของระบบเมื่อใช้เทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ UNI ในทางตรงกันข้ามเมื่อจำนวนผู้ใช้บริการมีจำนวนเกินกว่าจำนวนสล๊อตการจอง ค่าสมรรถนะของระบบจะมีค่าคงที่หรือลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผลที่ได้เมื่อใช้เทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ UNI นั่นคือระบบจะยังคงมีเสถียรภาพถึงแม้จะเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการเข้าไปในระบบก็ยังไม่ส่งผลกระทบต่อค่าสมรรถนะของระบบมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากการใช้เทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ UNI+LA จะช่วยให้สามารถกำหนดจำนวนผู้ใช้บริการที่จะผ่านเข้าไปจองช่องสัญญาณได้ผ่านทางกรกำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่เหมาะสม

รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองของเทคนิค UNI+LA เปรียบเทียบกับเทคนิค UNI เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 32 คน และสล๊อตการจอง 16 สล๊อต พร้อมทั้งแสดงช่วงความเชื่อมั่น 99.99% (99.99% Confidence Interval) ของจำนวนผู้ใช้บริการเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณ เพื่อแสดงความถูกต้องตลอดจนค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยกลุ่มตัวอย่างจำนวน 25 กลุ่ม แต่ละกลุ่มทดสอบด้วยจำนวนรอบ 1,000 รอบ และแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อย (Batch) จำนวน 5 กลุ่มย่อยซึ่งมีขนาดเท่ากับ 5 กลุ่มตัวอย่าง พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเช่นเดียวกันกับกราฟในกรณีที่มีจำนวนสล๊อตการจอง 16 สล๊อต ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.21 กล่าวคือเมื่อจำนวนผู้ใช้บริการไม่เกินกว่าจำนวนสล๊อตการจองที่มีอยู่ในระบบ สมรรถนะของเทคนิค UNI และ UNI+LA จะมีค่าเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากภายใต้สภาวะดังกล่าวค่าความน่าจะเป็นในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการมีค่าเท่ากับ 1.0 แต่พบว่าภายใต้สภาวะที่จำนวนผู้ใช้บริการมีปริมาณมากกว่าจำนวนสล๊อตการจอง เทคนิค UNI+LA ยังคงสามารถรักษาสมรรถนะให้คงที่ได้อยู่ได้ เนื่องจากกลไกในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการให้มีปริมาณเหมาะสมกับจำนวนสล๊อตการจองที่มีอยู่ในระบบขณะนั้น นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าช่วงความเชื่อมั่นที่ได้จากกราฟมีช่วงค่อนข้างแคบแม้จะใช้ค่าระดับความเชื่อมั่นสูงถึง 99.99% แสดงให้เห็นว่าค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์มีค่าที่ใกล้เคียงกับจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จในการ

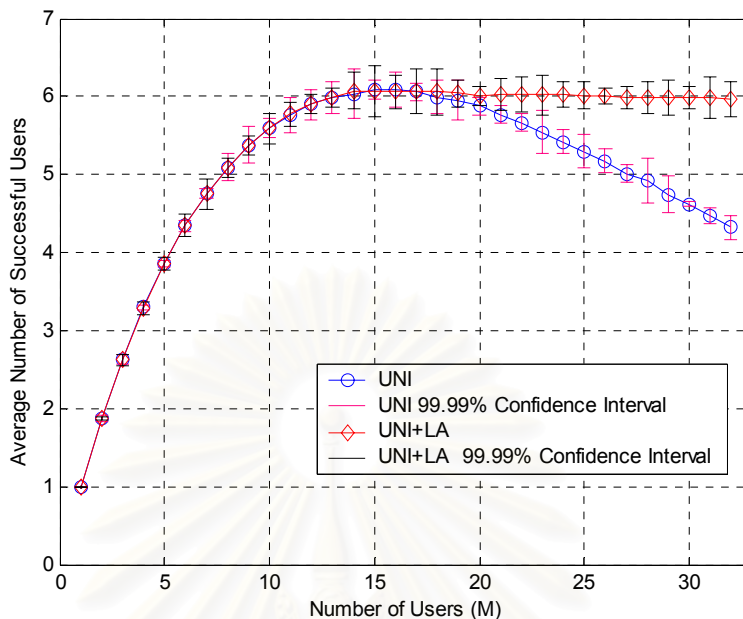
จริงที่แท้จริง จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าที่ได้จากการทดสอบด้วยการจำลองทางคอมพิวเตอร์ของเทคนิค UNI และ UNI+LA ให้ความค่าที่มีความถูกต้องและแม่นยำสูง



รูปที่ 4.20 จำนวนผู้ใช้บริการและค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณที่ทำให้สมรรถนะของระบบสูงสุด เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 32 คน และสล็อดการจอง 2 4 8 และ 16 สล็อด



รูปที่ 4.21 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของเทคนิค UNI+LA เปรียบเทียบกับเทคนิค UNI เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 32 คน และสล็อดการจอง 2 4 8 16 สล็อด



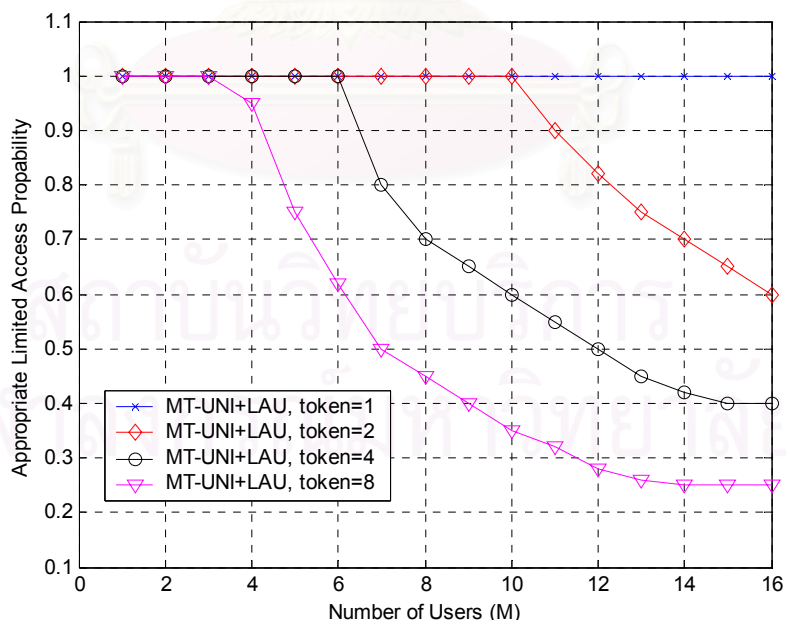
รูปที่ 4.22 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของเทคนิค UNI+LA เปรียบเทียบกับเทคนิค UNI เมื่อมีจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 32 คน และสลัลดการจอง 16 สลัลด

4.3.2 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิค MT-UNI+LAU

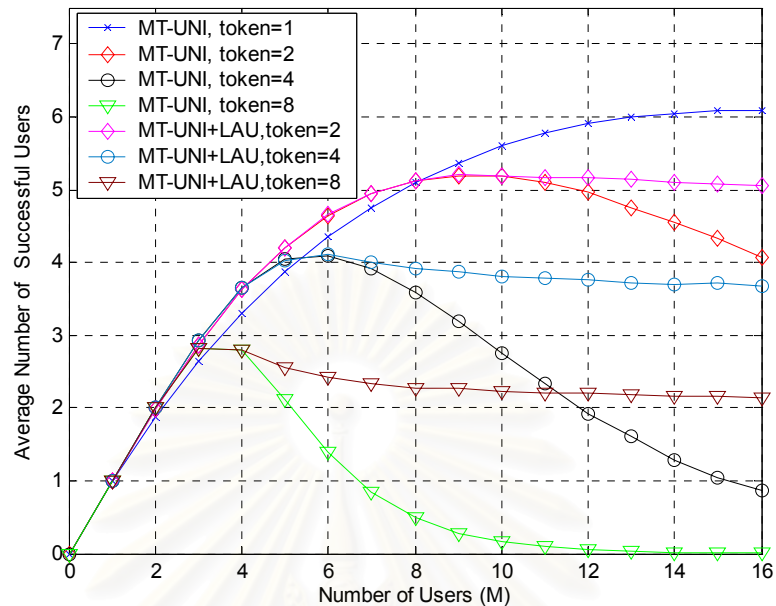
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้บริการและค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ เมื่อจำนวนโหนดการจอง 1 2 4 และ 8 อัน และสลัลดการจอง 16 สลัลด พบว่าเมื่อพิจารณาโหนดการจอง 1 อัน ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการมีค่าเท่ากับ 1.0 เนื่องจากภายใต้สภาวะดังกล่าว ระบบมีการทำงานเช่นเดียวกันกับเทคนิค UNI+LA กล่าวคือ เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการไม่เกินกว่าจำนวนสลัลดการจอง ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการมีค่าเท่ากับ 1.0 หรืออาจกล่าวได้ว่าระบบไม่มีการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ ผู้ใช้บริการทั้งหมดสามารถเข้าทำการจองช่องสัญญาณได้ แต่เมื่อเพิ่มจำนวนโหนดการจองเป็น 2 4 และ 8 อัน พบว่ากราฟแต่ละเส้นให้แนวโน้มในทิศทางเดียวกันคือ ในช่วงแรกซึ่งผู้ใช้บริการในระบบมีจำนวนไม่มากนัก ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการมีค่าเท่ากับ 1.0 แต่เมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการถึงค่าค่าหนึ่งจะทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการมีค่าไม่เท่ากับ 1.0 และมีค่าลดลงเรื่อยๆ ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ใช้บริการ โดยที่ผู้ใช้บริการแต่ละคนสามารถใช้โหนดการจองของตนได้ทั้งหมด เท่ากับเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกันของโหนดการจองให้มากขึ้นด้วย

ระบบจึงพยายามรักษาระดับสมรรถนะในกรณีที่มีผู้ใช้บริการจำนวนมากให้คงที่ ด้วยกลไกการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ โดยการลดค่าความน่าจะเป็นหรือโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณให้น้อยลง

รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของเทคนิค MT-UNI+LAU เปรียบเทียบกับเทคนิค MT-UNI เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 16 คน และสล็อตการจอง 16 สล็อต จากผลการทดสอบที่ได้พบว่า ในช่วงแรกซึ่งผู้ใช้บริการในระบบมีจำนวนน้อย เทคนิค MT-UNI+LAU จะให้สมรรถนะที่เท่ากับกับเทคนิค MT-UNI ทั้งนี้เนื่องจากภายใต้สภาวะของระบบดังกล่าว ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการเท่ากับ 1.0 ทำให้ระบบทำงานเช่นเดียวกันกับเทคนิค MT-UNI แต่เมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการขึ้นถึงจุดซึ่งกราฟของเทคนิค MT-UNI เริ่มมีสมรรถนะที่ลดลง นั่นหมายความว่าเมื่อมีจำนวนโทเค็นการจองในระบบมากเกินไปจนความจำเป็น และ ณ ตำแหน่งเดียวกันนี้กลไกในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการเริ่มทำงานด้วยการลดค่าความน่าจะเป็นหรือโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณให้น้อยลง เพื่อจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการที่จะเข้าสู่ระบบให้มีปริมาณที่เหมาะสม และยังคงสามารถรักษาระดับของสมรรถนะให้คงที่หรือมีการลดลงเพียงเล็กน้อยได้ ทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพที่ดีแม้จะรองรับปริมาณผู้ใช้บริการจำนวนมาก



รูปที่ 4.23 จำนวนผู้ใช้บริการและค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการเมื่อจำนวนโทเค็นการจอง 1 2 4 และ 8 อัน และสล็อตการจอง 16 สล็อต



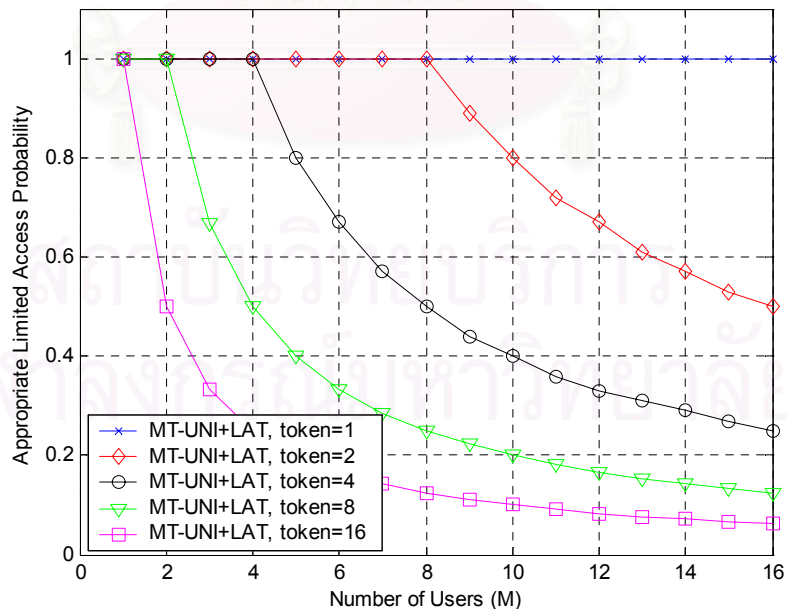
รูปที่ 4.24 จำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของเทคนิค MT-UNI+LAU เปรียบเทียบกับเทคนิค MT-UNI เมื่อจำนวนผู้ให้บริการ 1 ถึง 16 คน และสล็ตการจอง 16 สล็ต

4.3.3 ผลการทดสอบและการวิเคราะห์เทคนิค MT-UNI+LAT

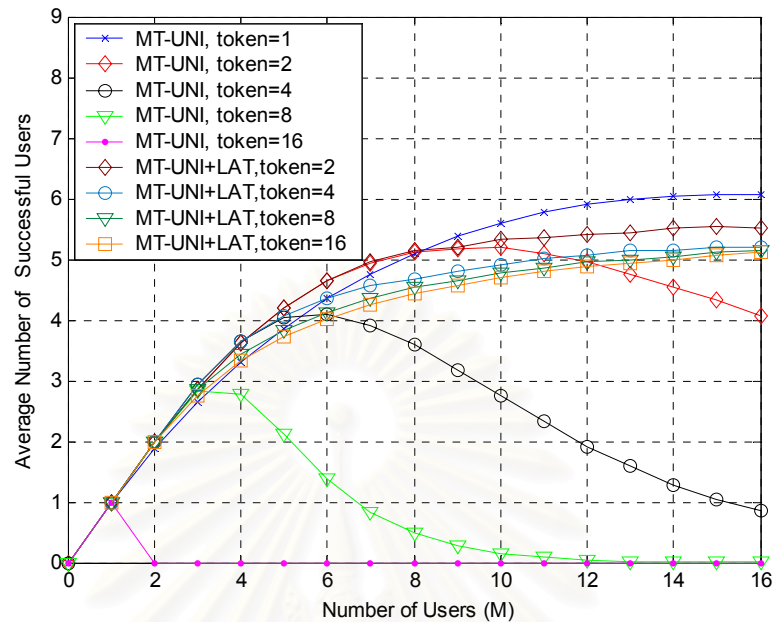
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ให้บริการและค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนโทเค็นการจอง เมื่อจำนวนโทเค็นการจอง 1 2 4 8 และ 16 อัน และจำนวนสล็ตการจอง 16 สล็ต จากผลการทดสอบที่ได้ พบว่าเมื่อพิจารณาโทเค็นการจอง 1 อัน ระบบมีการทำงานเช่นเดียวกันกับเทคนิค UNI+LA กล่าวคือ เมื่อจำนวนผู้ให้บริการไม่เกินกว่าจำนวนสล็ตการจอง ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนโทเค็นการจองมีค่าเท่ากับ 1.0 หรืออาจกล่าวได้ว่าระบบไม่มีการจำกัดจำนวนโทเค็นการจอง โทเค็นการจองของผู้ใช้บริการถูกใช้งานทั้งหมด แต่เมื่อเพิ่มจำนวนโทเค็นการจองเป็น 2 4 8 และ 16 อัน พบว่าในช่วงแรกซึ่งผู้ให้บริการในระบบมีจำนวนไม่มากนัก ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนโทเค็นการจองมีค่าเท่ากับ 1.0 แต่เมื่อเพิ่มจำนวนผู้ให้บริการถึงค่าค่าหนึ่งจะทำให้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนโทเค็นการจองมีค่าไม่เท่ากับ 1.0 และมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ลักษณะเช่นเดียวกันกับที่เกิดขึ้นในกราฟรูปที่ 4.23 ทั้งนี้ค่าความน่าจะเป็นที่ลดลงเป็นกลไกในการจำกัดจำนวนโทเค็นการจองที่ถูกใช้งานของผู้ใช้บริการแต่ละคนให้มีปริมาณที่เหมาะสมกับสถานะของระบบที่พิจารณาในขณะนั้น เพื่อให้ระบบสามารถรักษาระดับสมรรถนะที่ดี แม้ต้องรองรับปริมาณผู้ให้บริการจำนวนมาก จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าค่าความน่าจะเป็นในการจำกัดจำนวน

โทเค็นการจองที่ทำให้ค่าสมรรถนะของระบบสูงสุดนั้นจะขึ้นกับความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ให้บริการ จำนวนสล็อตการจอง และจำนวนโทเค็นการจอง ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $\min(1, (\frac{N}{M \times T}))$

รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนผู้ให้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของเทคนิค MT-UNI+LAT เปรียบเทียบกับเทคนิค MT-UNI เมื่อจำนวนผู้ให้บริการ 1 ถึง 16 คน และสล็อตการจอง 16 สล็อต พบว่าเทคนิค MT-UNI+LAT มีแนวโน้มของกราฟในผลการทดสอบในลักษณะเดียวกันกับกรณีของเทคนิค MT-UNI+LAU กล่าวคือ ในช่วงแรกซึ่งผู้ให้บริการในระบบมีจำนวนน้อย เทคนิค MT-UNI+LAT จะให้สมรรถนะที่เท่ากับกับเทคนิค MT-UNI ทั้งนี้เนื่องจากภายใต้สภาวะของระบบดังกล่าว ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนโทเค็นการจองเท่ากับ 1.0 ทำให้ระบบทำงานเช่นเดียวกันกับเทคนิค MT-UNI แต่เมื่อเพิ่มจำนวนผู้ให้บริการขึ้นถึงจุดซึ่งกราฟของเทคนิค MT-UNI เริ่มมีสมรรถนะที่ลดลง กลไกในการจำกัดจำนวนโทเค็นการจองเริ่มทำงานด้วยการลดค่าความน่าจะเป็นหรือโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณให้น้อยลง เพื่อจำกัดจำนวนโทเค็นการจองที่ผู้ให้บริการแต่ละคนจะเลือกใช้ให้มีปริมาณที่เหมาะสมกับสภาวะของระบบขณะที่ทำการพิจารณา ทำให้ระบบยังคงมีเสถียรภาพที่ดีแม้จะรองรับปริมาณผู้ให้บริการจำนวนมาก นอกจากนี้ยังพบว่า ระบบที่มีโทเค็นการจองจำนวนมาก เช่น โทเค็น 8 และ 16 อัน จะให้ค่าสมรรถนะที่ใกล้เคียงกันมาก



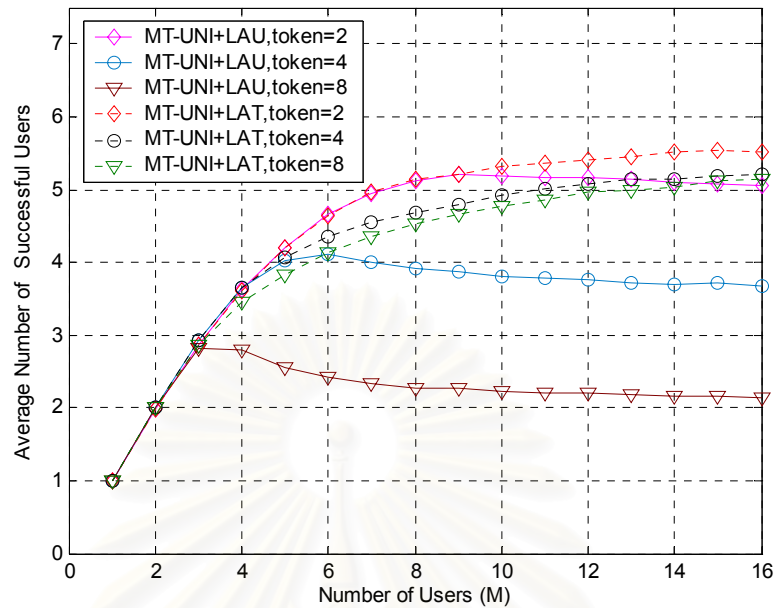
รูปที่ 4.25 จำนวนผู้ให้บริการและค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนโทเค็นการจอง เมื่อจำนวนโทเค็นการจอง 1 2 4 8 และ 16 อัน และสล็อตการจอง 16 สล็อต



รูปที่ 4.26 จำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยที่ประสบความสำเร็จของเทคนิค MT-UNI+LAT เปรียบเทียบกับเทคนิค MT-UNI เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการ 1 ถึง 16 คน และสล็ตการจอง 16 สล็ต

4.3.4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบเทคนิค MT-UNI+LAU และ MT-UNI+LAT

รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบเทคนิค MT-UNI+LAU และเทคนิค MT-UNI+LAT เมื่อพิจารณาที่จำนวนโทเค็นการจองเท่ากัน และจำนวนสล็ตการจอง 16 สล็ต จากผลการทดสอบที่ได้พบว่า เมื่อจำนวนผู้ใช้บริการไม่มากนักเทคนิคทั้งสองให้สมรรถนะที่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนโทเค็นการจองมีค่าเท่ากับ 1.0 ทำให้เทคนิคทั้งสองมีการทำงานเสมือนเป็นเทคนิคเดียวกันและยังเหมือนกับเทคนิค MT-UNI ด้วย แต่เมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้บริการมากขึ้น กลไกในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนโทเค็นการจองเริ่มทำงานในการลดค่าความน่าจะเป็นหรือโอกาสในการเข้าใช้ช่องสล็ตของ ผู้ใช้บริการและโทเค็นการจอง พบว่าเทคนิค MT-UNI+LAT ให้สมรรถนะของระบบที่สูงกว่าเทคนิค MT-UNI+LAU ทั้งเนื่องจากการจำกัดจำนวนโทเค็นการจองให้ค่าความละเอียดมากกว่าการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการ แต่หากพิจารณาเทคนิคทั้งสองโดยเลือกใช้จำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสมพบว่าเทคนิค MT-UNI+LAU และเทคนิค MT-UNI+LAT ให้ค่าสมรรถนะที่เท่ากัน เนื่องจากที่จำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสม ค่าความน่าจะเป็นในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนโทเค็นการจองมีค่าเท่ากับ 1.0 ซึ่งดังที่ได้กล่าวแล้วข้างต้นว่าในสถานะเช่นนี้เทคนิคทั้งสองมีการทำงานเสมอเป็นเทคนิคเดียวกัน ส่งผลให้ค่าสมรรถนะของระบบมีค่าเท่ากันด้วย



รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบเทคนิค MT-UNI+LAU และเทคนิค MT-UNI+LAT

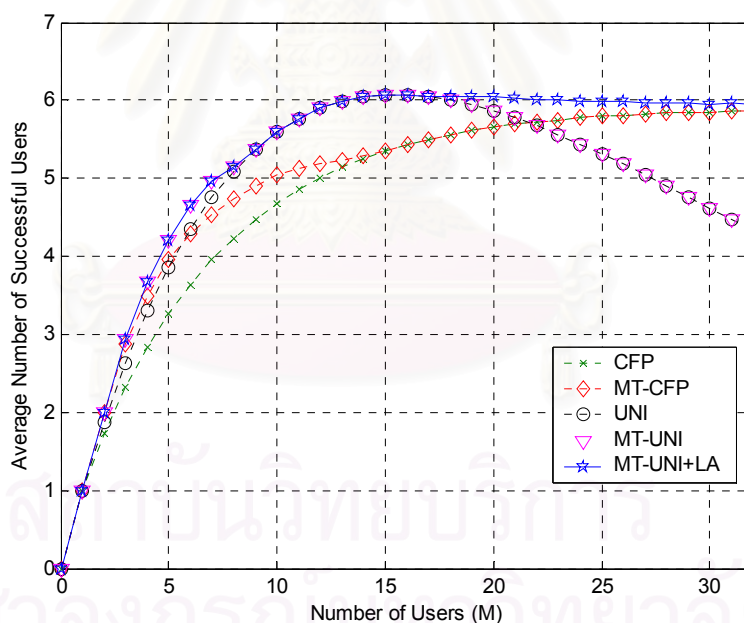
เมื่อพิจารณาที่จำนวนโหนดการจูงเท่ากัน

4.4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบเทคนิคการจูงช่องสัญญาณที่นำเสนอ

หัวข้อที่ 4.1 ถึง 4.3 แสดงผลการทดสอบและการวิเคราะห์ของเทคนิคการจูงช่องสัญญาณวิธีการต่าง ๆ ที่ได้นำเสนอ รวมถึงการเปรียบเทียบแต่ละเทคนิคที่เกี่ยวข้องกันไปบางส่วน ในหัวข้อผู้วิจัยจึงได้เปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคการจูงช่องสัญญาณทั้งหมดที่ได้นำเสนอทั้ง 4 เทคนิค คือ MT-CFP, MT-UNI, MT-UNI+LAU และ MT-UNI+LAT กับเทคนิคที่เคยมีผู้นำเสนอไว้ ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้โหนด 1 อัน ได้แก่ CFP, UNI และ UNI+LA

รูปที่ 4.28 แสดงการเปรียบเทียบเทคนิคการจูงช่องสัญญาณที่นำเสนอและเทคนิคที่เคยมีผู้นำเสนอไว้ เมื่อระบบใช้จำนวนโหนดการจูงที่เหมาะสม พบว่าโดยรวมแล้ว เทคนิคที่นำเสนอให้สมรรถนะที่ดีกว่าเทคนิคที่เคยมีผู้นำเสนอไว้ ดังจะเห็นได้จากสมรรถนะของระบบที่มีการเพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มขึ้นของสมรรถนะ จะมีการเพิ่มเพียงบางช่วง ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้ คือ เมื่อพิจารณาเทคนิค MT-CFP จะมีสมรรถนะเพิ่มขึ้นจากเทคนิค CFP ในช่วงที่จำนวนของผู้ใช้บริการน้อยกว่าจำนวนสลิตการจูง ($M < N$) และเทคนิค MT-UNI จะมีสมรรถนะเพิ่มขึ้นจากเทคนิค UNI ในช่วงที่จำนวนผู้ใช้บริการไม่เกินกว่าครึ่งหนึ่งของจำนวนสลิตการจูง ($M \leq \frac{N}{2}$) ส่วนกรณีของเทคนิค MT-UNI+LAU และ MT-UNI+LAT พบว่าทั้งสองเทคนิคจะให้สมรรถนะที่เท่ากันเมื่อใช้จำนวน

โทเค็นการจองที่เหมาะสม โดยในรูปที่ 4.28 นี้จะใช้สัญลักษณ์ MT-UNI+LA แทนเทคนิคการจองช่องสัญญาณทั้งสอง (MT-UNI+LAU , MT-UNI+LAT) นอกจากนี้ยังพบว่าเทคนิค MT-UNI+LA ที่เท่ากับเทคนิค MT-UNI ในช่วงที่จำนวนของผู้ใช้บริการน้อยกว่าหรือเท่ากับจำนวนสลอตการจอง เทคนิค MT-UNI+LA จะเริ่มให้สมรรถนะของระบบที่ดีกว่าเมื่อจำนวนผู้บริกรมากกว่าจำนวนสลอตการจอง ทั้งนี้เนื่องจากมีกลไกในการจำกัดจำนวนผู้บริกรและจำนวนโทเค็นการจอง ทำให้ยังคงสามารถรักษาเสถียรภาพได้ดีแม้จะรองรับปริมาณของระบบที่สูง กล่าวโดยสรุปเทคนิค MT-UNI+LA เป็นเทคนิคที่ให้สมรรถนะดีในทุกสภาวะและมีความซับซ้อนในการทำงานไม่มากนัก จึงสามารถนำไปใช้งานได้ในทางปฏิบัติ ส่วนเทคนิค MT-UNI เป็นเทคนิคที่มีความซับซ้อนน้อยที่สุดแต่ให้สมรรถนะดีเฉพาะในกรณีที่โหลดน้อยกว่าหนึ่ง ส่วนเทคนิค MT-CFP มีความยุ่งยากและอาจต้องใช้เวลาพอสมควรในการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทเค็นการจอง ทั้งนี้เมื่อใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมแล้ว ยังให้สมรรถนะของระบบไม่ดีเท่ากับเทคนิค MT-UNI และ MT-UNI+LA



รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอ และเทคนิคที่เคยมีผู้นำเสนอไว้

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทนี้กล่าวถึงบทสรุปของเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ และ ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

5.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นหลายอัน สำหรับโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสารไร้สายความเร็วสูง โดยเทคนิคที่เสนอสามารถใช้ได้กับระบบที่เวลาประวิงการแพร่กระจายครบรอบยาวกว่าเวลาประวิงการส่งสัญญาณ เช่น ระบบสื่อสารไร้สายความเร็วสูง ระบบสื่อสารดาวเทียม รวมถึงระบบที่ใช้พื้นฐานการทำงานแบบ Time Division Duplex (TDD) เป็นต้น ภายใต้สภาวะของระบบดังกล่าวผู้ใช้บริการจะทราบผลการจองหลังจากหมดช่วงการจองไปแล้ว ดังนั้นเมื่อพิจารณาระบบที่ใช้โทเค็นการจองเพียง 1 อัน (Single-Token) ผู้ใช้บริการจะมีโอกาสเข้าจองช่องสัญญาณได้เพียงครั้งเดียวต่อเฟรม แต่เมื่อนำมาประยุกต์ในระบบที่ใช้โทเค็นการจองหลายอัน (Multi-Token) ซึ่งได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พบว่าผู้ใช้บริการสามารถเข้าจองช่องสัญญาณได้หลายครั้งตามจำนวนโทเค็นที่มีอยู่โดยอาศัยพื้นฐานที่ว่าผู้ใช้บริการแต่ละรายสามารถประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้นในช่วงการจองของเฟรมหนึ่ง ๆ

การนำเทคนิคการใช้โทเค็นหลายอันมาประยุกต์ใช้ในเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอ เกิดจากแนวความคิดที่ว่า เทคนิคการจองช่องสัญญาณดั้งเดิม ซึ่งใช้โทเค็นการจอง 1 อัน หากเกิดการชนกันขึ้นของโทเค็นการจองของผู้ใช้บริการ ผู้ใช้บริการรายนั้น ๆ ก็ไม่มีโอกาสที่จะประสบความสำเร็จได้เลยในช่วงการจองของเฟรมปัจจุบัน ดังนั้นหากเราเพิ่มจำนวนของโทเค็นการจองให้แก่ผู้ใช้บริการ ก็เท่ากับเป็นการเพิ่มโอกาสในการที่จะประสบความสำเร็จในการจองช่องสัญญาณให้มากขึ้น เพื่อให้มองเห็นภาพได้อย่างชัดเจนขึ้น ขอยกตัวอย่างกรณีของเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นการจอง 1 อัน แบบ UNI และเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นหลายอันแบบ MT-UNI ในระบบที่มีผู้ใช้บริการ 2 คน พบว่าโอกาสหรือความน่าจะเป็นที่โทเค็นการจองของเทคนิค MT-UNI จะชนกันทั้งหมดเป็นไปได้ยากมากกว่าโอกาสในการชนกันของโทเค็นการจองของเทคนิค UNI มีผลให้สมรรถนะของของเทคนิค MT-UNI ดีกว่าเทคนิค UNI แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มจำนวนโทเค็นการจอง ก็เสมือนเป็นการเพิ่มโอกาสในการชนกันให้มากขึ้นด้วย ซึ่งหากเกิดการชนกันของโทเค็นการจองในปริมาณที่มากเกินไป ก็จะมีส่งผลกระทบต่ออัตราการลดลง

ของสมรรถนะของระบบ ดังนั้นจำนวนของโทเค็นการจองที่เหมาะสม ถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญตัวหนึ่งที่มีผลโดยตรงต่อสมรรถนะของระบบ จึงเป็นความน่าสนใจและท้าทายที่จะทำการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นหลายอัน

แนวคิดของเทคนิคที่ได้เสนอแบ่งออกได้เป็น 3 แนวคิดคือ การใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมแบบค่าคงที่ การเลือกสล๊อตการจองอย่างสุ่ม และการจำกัดจำนวน โดยจุดมุ่งหมายหลักของแต่ละเทคนิคเพื่อทำให้การเข้าจองในช่วงการจองมีสมรรถนะเพิ่มขึ้น หรือมีจำนวนผู้ใช้บริการโดยเฉลี่ยประสบความสำเร็จในการจองเพิ่มขึ้น เพราะช่วงการจองเป็นช่วงที่สำคัญมากของโพรโทคอลที่มีการเข้าจอง เนื่องจากผู้ใช้บริการทุกคนจำเป็นต้องเข้าจองก่อนจึงจะมีสิทธิส่งแพ็กเก็ตข่าวสารในสล๊อตข่าวสารที่กำหนด

เทคนิคที่นำเสนอมี 4 เทคนิคคือ MT-CFP, MT-UNI, MT-UNI+LAU และ MT-UNI+LAT การวิเคราะห์หาสมรรถนะของเทคนิคที่นำเสนอทั้งหมดทำการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ ซึ่งพบว่า ในเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ MT-CFP และ MT-UNI ค่าพารามิเตอร์ที่ถือได้ว่ามีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อสมรรถนะของระบบคือ จำนวนโทเค็นการจองและค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการจอง และได้มีการนำเสนอสูตรการประมาณค่าจำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสมในสภาวะของระบบต่าง ๆ ซึ่งแสดงไว้ในส่วนการวิเคราะห์ผลการทดลองในบทที่ 4 โดยมีข้อกำหนดว่าสถานีฐานสามารถทราบจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนสล๊อตการจอง ในส่วนของเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ MT-UNI+LAU และ MT-UNI+LAT เป็นเทคนิคที่อาศัยพื้นฐานของการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนโทเค็นการจอง นำมาใช้ในการแก้ไขปัญหาของเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ MT-UNI ในสภาวะที่โหลดของระบบมีค่ามาก ดังนั้น พารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อเทคนิคการจองทั้งสองเทคนิคคือค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมที่ใช้ในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการหรือจำนวนโทเค็นการจอง

จากผลทดสอบและการวิเคราะห์ในบทที่ 4 สรุปได้ว่าโดยรวมแล้วเทคนิคที่นำเสนอจะให้สมรรถนะที่เหนือกว่าเทคนิคดั้งเดิมซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้โทเค็นการจองเพียง 1 อัน (Single-Token) โดยจะสามารถสังเกตเห็นการเพิ่มขึ้นของสมรรถนะได้อย่างชัดเจนในสภาวะของระบบที่มีโหลดน้อยถึงปานกลาง โดยสามารถสรุปได้ว่า เทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ MT-CFP จะให้สมรรถนะที่ดีกว่าเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ CFP ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้โทเค็นการจองเพียง 1 อันในสภาวะของระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการไม่เกินกว่าจำนวนสล๊อตการจองที่มีอยู่ในระบบ ส่วนเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ MT-UNI จะให้สมรรถนะที่ดีกว่าเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ UNI ในสภาวะของระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการไม่เกินกว่าครึ่งหนึ่งของจำนวนสล๊อตการจอง ถ้าจำนวนผู้ใช้บริการเกินกว่าค่าที่กำหนดเทคนิคการจองที่ใช้โทเค็นหลายอันจะให้สมรรถนะเท่ากับเทคนิคการจองที่ใช้โทเค็นเพียง 1 อัน เพราะว่าภายใต้สภาวะของระบบดังกล่าว (ระบบ

รองรับโหลดที่มีค่ามาก) ค่าของจำนวนโหนดที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 1 โหนด สำหรับเทคนิคการ
 จองที่ใช้การจำกัดจำนวน (MT-UNI+LAU และ MT-UNI+LAT) พบว่าเทคนิค MT-UNI+LAT จะ
 ให้สมรรถนะที่ดีกว่าเทคนิค MT-UNI+LAU เมื่อเปรียบเทียบโดยพิจารณาระบบที่มีจำนวน
 ผู้ใช้บริการ จำนวนสลอตการจอง และจำนวนโหนดการจองเท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากการจำกัด
 จำนวนโหนดการจองจะให้ความละเอียดมากกว่าการจำกัดจำนวนของผู้ใช้บริการ ส่งผลถึง
 สมรรถนะของระบบที่ดีกว่าด้วย แต่หากเปรียบเทียบโดยใช้จำนวนโหนดการจองที่เหมาะสม ทั้ง
 สองเทคนิคจะให้ค่าสมรรถนะที่เท่ากัน เนื่องมาจากเมื่อพิจารณาค่าของจำนวนโหนดการจองที่
 เหมาะสม พบว่าความน่าจะเป็นในการจำกัดจำนวนของเทคนิค MT-UNI+LAU และ MT-
 UNI+LAT มีค่าเท่ากับ 1 ทำให้เทคนิคทั้งสองถูกพิจารณาว่าเป็นระบบเดียวกันได้ ทำให้ค่าวิสัย
 สามารถมีค่าเท่ากันด้วย นอกจากนี้ พบว่าภายใต้สภาวะของระบบที่มีจำนวนผู้บริโภคน้อยกว่า
 จำนวนสลอตการจอง เทคนิคการจำกัดจำนวนแม้ว่าจะมีการทำงานที่ซับซ้อนกว่าเทคนิคการ
 เลือกสลอตการจองอย่างสุ่ม แต่สมรรถนะที่ได้รับจากทั้งสองเทคนิคมีค่าเท่ากัน เทคนิคการจำกัด
 จำนวนจะเริ่มมีสมรรถนะที่เหนือกว่าเทคนิคการเลือกสลอตการจองอย่างสุ่มเมื่อจำนวนผู้บริโภคน้อย
 มีค่ามากกว่าจำนวนสลอตการจองเป็นต้นไป ดังนั้นสรุปได้ว่าเทคนิคที่จะทำให้ช่วงการจองมี
 จำนวนผู้บริโภคน้อยโดยเฉลี่ยประสบความสำเร็จในการจองได้มากที่สุด (สมรรถนะสูงสุด) จะต้องม
 ีคุณสมบัติ 3 ข้อ ดังนี้

1. จำนวนโหนดการจองที่เหมาะสม เนื่องจากถ้าโหนดการจองน้อยเกินไป จะก่อให้เกิด
 ปัญหาการใช้งานช่องสัญญาณอย่างไม่มีประสิทธิภาพ กล่าวคือมีสภาวะการว่างอยู่มาก แต่หาก
 ว่าจำนวนโหนดการจองมากเกินไปก็จะก่อให้เกิดปัญหาการชนกัน ดังนั้นการเลือกจำนวนโหนดที่
 เหมาะสมจะนำมาซึ่งสมรรถนะของระบบที่สูงสุด

2. ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโหนดการจอง ซึ่งกำหนดจากจำนวน
 ผู้ใช้บริการ จำนวนสลอตการจองที่เหลืออยู่ ณ เวลาที่กำลังพิจารณาและจำนวนโหนดการจอง

3. สลอตการจองทุกสลอตควรจะได้รับปริมาณการเข้าจองอย่างเท่าเทียมกัน ไม่ควรให้
 สลอตการจองสลอตใดสลอตหนึ่งต้องรองรับปริมาณการเข้าจองมากกว่าสลอตอื่น

สรุปได้ว่าเทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ MT-UNI เป็นเทคนิคที่มีความ
 ซับซ้อนน้อยที่สุดและให้สมรรถนะดีในกรณีที่โหลดน้อยกว่าหนึ่ง แต่เมื่อพิจารณาการทำงานในช่วง
 ที่มีปริมาณโหลดมากกว่าหนึ่ง ซึ่งเป็นเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นได้ในระบบทั่วไป เทคนิค MT-UNI+LA
 เป็นเทคนิคที่ให้สมรรถนะดีในทุกสภาวะและมีความซับซ้อนในการทำงานไม่มากนักจึงสามารถ
 นำไปใช้งานได้ในทางปฏิบัติ ดังนั้นเทคนิค MT-UNI+LA จึงเป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับระบบที่ทำ
 การพิจารณาในวิทยานิพนธ์ ส่วนเทคนิค MT-CFP มีความยุ่งยากและอาจต้องใช้เวลาพอสมควร

ในการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการส่งโทเค็นการจอง ทั้งนี้เมื่อใช้ค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมแล้ว ยังให้สมรรถนะของระบบไม่ดีเท่ากับเทคนิค MT-UNI และ MT-UNI+LA

โดยภาพรวมแล้วเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นหลายอันให้สมรรถนะที่ดีกว่าหรืออย่างน้อยที่สุดก็ให้สมรรถนะที่เท่ากันกับเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นเพียง 1 อัน แต่ก็มีประเด็นซึ่งถือได้ว่าเป็นข้อด้อยของเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่นำเสนอ กล่าวคือการคำนวณทางคณิตศาสตร์ของเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นหลายอันมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากกว่าเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นเพียง 1 อัน ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อพิจารณาเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นหลายอัน พบว่าระบบที่พิจารณาจะไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) จึงทำให้ไม่สามารถพิจารณาโดยอาศัยรูปแบบของการเวียนเกิด (Recursive Form) ดังเช่นที่ใช้ในเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นเพียง 1 อันได้ ทำให้การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิคการจองที่ใช้โทเค็นการจองหลายอันต้องมีการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ อีกทั้งจำนวนพจน์ที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากจำนวนผู้ใช้บริการ จำนวนสล๊อตการจอง และจำนวนโทเค็นการจอง ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นในลักษณะของฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ทำให้ระบบที่มีจำนวนผู้ใช้บริการ จำนวนสล๊อตการจอง และจำนวนโทเค็นการจองมาก ๆ ต้องใช้เวลาในการประมวลผลนาน แต่การวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ของเทคนิคการจองที่ใช้โทเค็นหลายอันก็ทำให้เราทราบรูปแบบและสมการในรูปทั่วไป ทั้งนี้ถ้าหากแทนค่าจำนวนโทเค็นการจองเป็น 1 อันในสมการในรูปทั่วไปของเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นหลายอัน พบว่าระบบจะถูกรวบรวมเข้าสู่เทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นเพียง 1 อัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากเทคนิคการจองช่องสัญญาณที่ใช้โทเค็นการจองหลายอัน มีการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจอง หรือค่าความน่าจะเป็นที่เหมาะสมในการจำกัดจำนวนผู้ใช้บริการและจำนวนโทเค็นการจอง ตลอดจนจำนวนโทเค็นการจองที่เหมาะสม ซึ่งการคำนวณค่าเหล่านี้ต้องใช้เวลาานพอสมควร จำเป็นที่สถานีฐานจะต้องมีระบบประมวลผลที่มีความเร็วสูงมาก เพื่อสามารถประมวลผลและแจ้งให้ผู้ใช้บริการทราบได้ทันในช่วงการจอง น่าจะเป็นการดีที่สถานีฐานจะคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญเหล่านี้ไว้ก่อน แล้วเก็บค่าเป็นตาราง ซึ่งเมื่อมีผู้ใช้บริการเข้าสู่ระบบ ก็ทำการประมวลผลและนำค่าที่เก็บไว้ในตารางเหล่านี้ใช้ได้ทันที

2. เทคนิคการจองช่องสัญญาณแบบ MT-CFP นั้นการกำหนดค่าโอกาสในการเข้าจองช่องสัญญาณจะมีการกำหนดเพียงครั้งเดียวที่ต้นเฟรม ทำให้ค่าที่ได้อาจไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมในทุกๆ ช่องสัญญาณจองภายในเฟรม เนื่องจากจำนวนผู้ใช้บริการ จำนวนช่องสัญญาณจองและจำนวนโทเค็นการจองจะมีจำนวนลดน้อยลงเรื่อย ๆ และการเข้าจองช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการที่

ต้องกระทำเรียงลำดับจากช่องสัญญาณของต้นเฟรมไปยังช่องสัญญาณของท้ายเฟรม ทำให้ปริมาณการของช่องสัญญาณของผู้ใช้บริการที่ช่องสัญญาณของแต่ละช่องแตกต่างกัน กล่าวคือ ช่องสัญญาณในช่วงต้นเฟรมจะมีปริมาณการใช้งานที่สูงเมื่อเทียบกับบริเวณท้ายเฟรม โอกาสในการชนจึงเกิดขึ้นได้มากในช่วงต้นเฟรมหรือในอีกแง่หนึ่งนั้นจะเป็นการเพิ่มโอกาสที่จะเกิดการว่างในช่วงท้ายเฟรม จึงมีความน่าสนใจที่จะศึกษา วิจัย และคิดหาเทคนิคการของช่องสัญญาณแบบใหม่ เช่น เทคนิคการของช่องสัญญาณที่ค่าความน่าจะเป็นในการส่งโทเค็นการของมีการปรับเปลี่ยนค่าได้ หรืออาจกระจายปริมาณการใช้งานสล็อตการของด้วยเทคนิคการแบ่งกลุ่มย่อย เป็นต้น

3. เนื่องจากเทคนิคการของช่องสัญญาณที่ได้นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้วิเคราะห์หาค่าวิจัยสามารถของทุกเทคนิคที่ได้นำเสนอ แต่ยังไม่ได้อธิบายหาเวลาประวิงในการส่งโทเค็นการของ ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกค่าหนึ่งสำหรับการวัดสมรรถนะทำงาน ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์ของแต่ละเทคนิคเป็นไปอย่างสมบูรณ์จึงควรทำการวิเคราะห์หาเวลาประวิงในการส่งโทเค็นการของเพิ่มเติม

4. ทราฟฟิกประเภทมัลติมีเดีย (Multimedia) กำลังเป็นที่ได้รับความสนใจในเวลานี้ แต่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้ผู้ให้บริการทุกคนมีความสำคัญเท่ากันหรือเป็นระบบที่มีทราฟฟิกประเภทเดียว ดังนั้นเพื่อรองรับระบบที่มีทราฟฟิกหลายประเภท ผู้ให้บริการแต่ละคนจะมีลำดับความสำคัญไม่เท่ากัน จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจสำหรับการวิจัยต่อไป

รายการอ้างอิง

1. Chandra, A. ; Gummalla, V. ; and Limb, J.O. Wireless Medium Access Control Protocols. IEEE Communications Surveys , Second Quarter 2000 : 2-15.
2. Tanenbaum, A. S. Computer Networks . 3rd ed. New Jersey : Prentice Hall, 1996.
3. Bertsekas, D. ; and Gallager, R. Data Network . 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1992.
4. Nguyen, T. ; and Suda, T. Survey and Evaluation of Multiple Access Protocols in Multimedia Satellite Networks. IEEE Proceedings of Southeastcon (1990) : 408-413.
5. Peyravi, H. Medium Access Control Protocols Performance in Satellite Communications. IEEE Communication Magazine Vol. 37, No. 3 (March 1999) : 62-71.
6. Rivest, R.L., Network Control by Bayesian Broadcast. IEEE Transactions on Information Theory Vol. IT-33, No. 3 (May 1987): 323-328.
7. Goodman, D.J.; Valenzuela, R.A.; Gayiardi, K.T.; and Ramamurthi, B. Packet Reservation Multiple Access for Local Wireless Communications. IEEE Transactions on Communications Vol. 37, No. 8 (August 1989): 885-890.
8. Frigon, J.F.; and Leung, V.C.M. A Pseudo-Bayesian Aloha Algorithm with Mixed Priorities for Wireless ATM. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Vol. 1 (1998): 45-49.
9. Sala, D.; Limb, J.O.; and Khaunte, S.U. Adaptive Control Mechanism for Cable Modem MAC Protocols. IEEE Proceedings of Infocom Vol. 3 (1998): 1392-1399.
10. Golmie, N.; Saintillan, Y.; and Su, D.H. A review of Contention Resolution Algorithms for IEEE 802.14 Networks. IEEE Communications Surveys Available from (First Quarter 1999): <http://www.comsoc.org/pubs/surveys>
11. Raychaudhuri, D. Wireless ATM Networks: Technology Status and Future Directions. Proceedings of the IEEE. Vol. 87, No. 10 (October 1999): 1790-1806.
12. Anastasi, G.; and Lenzi, L. HIPERLAN/1 MAC Protocol: Stability and Performance Analysis. IEEE Journal on Selected Area in Communications Vol. 18, No. 9 (September 2000): 1787-1798.

13. Bolcskei, H.; Pauraj, A.J.; Hari, K.V.S.; and Nabar, R.U. Fixed Broadband Wireless Access: State of the Art, Challenges, and Future Directions. IEEE Communications Magazine Vol. 39, Issue. 1 (January 2001): 100-108.
14. Sivamok, N. ; Wuttisittikulij, L. ; and Charoenpanitkit, A. New Channel Reservation Technique for Media Access Control Protocol in High Bit-Rate Wireless Communication Systems. IEEE Proceedings of Globecom (November 2001)
15. Akyildiz, I. F. ; and McNair, J. Medium Access Control Protocols for Multimedia Traffic in Wireless Networks. IEEE Network Vol. 3, No. 4 (July / August 1999) : 39-47.
16. Frigon, J. ; Leung , V.C.M. ; and Chan, H.C.B. Dynamic Reservation TDMA Protocol for Wireless ATM Networks. IEEE Journal on Selected Area in Communications Vol. 19, No. 2 (February 2001) : 370-383.
17. Suzuki, T. ; and Tasaka, S. A Performance Comparison of ALOHA-Reservation and PRMA in Integrated Voice and Data Wireless Local Area Networks. IEEE Proceedings of TENCON Vol. 2, No. 7 (1992) : 754-758.
18. Suwanpakdee, P. ; Sedtheetorn, P.; Thanasorawit, A. ; and Wuttisittikulij, L. On the Design of a Media Access Control Protocol for Integrated Voice and Data Services in Wireless Communications. ISAS2000 (July 2000).
19. Jeong, D.G. ; and Jeon, W.S. Performance of an Exponential Backoff Scheme for Slotted-ALOHA Protocol in Local Wireless Environment. IEEE Transactions on Vehicular Technology Vol. 44, No. 3, (August 1995) : 470-479.
20. ณัฐพล ศิวาโมกษ์. เทคนิคการจองช่องสัญญาณสำหรับโพรโทคอลควบคุมการเข้าถึงตัวกลางในระบบสื่อสารไร้สาย . วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทความทางวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่

1. ได้รับการตอบรับจากงานประชุมทางวิชาการ International Symposium on Communications and Information Technologies 2004 (ISCIT 2004) ซึ่งจัดขึ้นในวันที่ 26-29 ตุลาคม พ.ศ. 2547 ที่ Sapporo Convention Center ณ เมือง Sapporo ประเทศญี่ปุ่น
2. บทความทางวิชาการจากงานประชุมทางวิชาการ The IEEE Vehicular Technology Conference 2002 (VTC Spring 2002) ซึ่งจัดขึ้นในวันที่ 6-9 พฤษภาคม พ.ศ. 2545 ที่ โรงแรม Sheraton Birmingham ณ เมือง Birmingham รัฐ Alabama ประเทศสหรัฐอเมริกา
3. บทความทางวิชาการจากงานประชุมทางวิชาการ The IEEE Vehicular Technology Conference 2002 (VTC Spring 2002) ซึ่งจัดขึ้นในวันที่ 6-9 พฤษภาคม พ.ศ. 2545 ที่ โรงแรม Sheraton Birmingham ณ เมือง Birmingham รัฐ Alabama ประเทศสหรัฐอเมริกา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Design and Performance Evaluation of Multi-Token Channel Reservation Techniques in High Bit-Rate Wireless Communication Systems

Atipong Suriya¹, Warakorn Srichavengsup², and Lunchakorn Wuttisittikulki¹

¹Department of Electrical Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

²Department of Electrical Engineering, Siam University, Bangkok, Thailand

Tel: +66-221-86908 Fax: +66-225-18991 Email: lunch@ee.eng.chula.ac.th

Abstract— This paper introduces two new contention resolution algorithms suitable for broadband wireless communications, namely Multi-token Cascade Fixed Prob (MT-CFP) and Multi-token Uniform (MT-UNI). It is an extension work to our previously proposed algorithms, i.e. CFP and UNI. Multi-token mechanism is proposed to allow more effective access of users. The performance of these new schemes are evaluated through mathematical analysis and compared to the CFP and UNI which are based on a single-token system. Numerical results show that increase in system performance measured in terms of average number of successful users is obtained by the introduction of multi-token mechanism. Performance improvement is particularly significant at systems with light to medium loads.

I. INTRODUCTION

Since the access flexibility and mobility features in wireless communications has resulted in the rapid growth of the demands for wireless communication services and applications. A wireless access system consists of one base station and several wireless terminal users. The base station uses the downward channel to broadcast control traffic and/or information traffic to users, while users use the upward channel to transmit their traffic to the base station. Due to the upward channel is shared among all users, who are usually distributed over the service area. It is not possible for these users to synchronize their transmission with base station. Therefore, some means of media access control (MAC) protocols are needed.

Over the past years a wide range of MAC protocols have been proposed and developed for different operating environment. Conventional MAC protocols have been classified into two categories: contention-free and contention-based [1,2]. More recently developed protocols tend to organize the channel bandwidth into a frame structure that is composed of two parts, reservation part and information part, see Figure 1. A reservation part consists of a number of request slots. All users are given a chance to reserve slots on a contention basis. Qualified users from the reservation process will be assigned slots in the information part for traffic transmission. By using much lower ratio of reservation period and transmission period by several orders of magnitude, these protocols have been shown to improve efficiency. Examples for this type of protocol are ALOHA

Reservation (ALOHA-R) [3], PRMA [4], DR-TDMA [5] and others [6], [7].

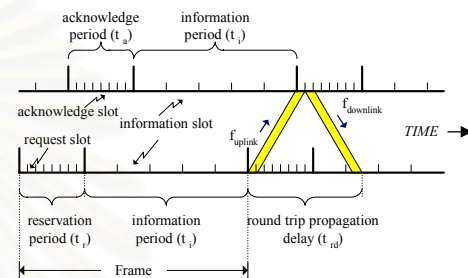


Figure 1. Frame structure and system operation under relatively long propagation delay.

In order to achieve the maximum throughput of the system, there is thus a need to find a new channel reservation scheme that will be specifically adapted to the reservation protocol structure. In addition, if the propagation delay between users and base station are relatively much larger than the request slot length, users may not know the outcome of their requests within the same request slot. Thus, our previous work has been presented two new reservation schemes, namely, Cascade Fixed Prob (CFP) and Uniform (UNI) with the assumption that all users can make their requests only once per frame [8]. In CFP scheme, each user will attempt to make a reservation on each request slot in sequence from the first slot to the last with an appropriate probability. This value of probability is the same for all users and fix throughout all request slot. For another scheme, UNI, unlike CFP scheme where users need not consider each request slot in sequence. They may simply select one slot for reservation out of available slot with equal probability.

The performance of system should probably be improved by increasing the chance for each user to access in reservation slots more than one time per frame. Thus, the multi-token scheme is applied to use in this paper. In addition, we will investigate the appropriate number of token (ANT) for any number of active users and available slots.

The paper is organized as follow. Section 2, the proposed channel reservation schemes and their mathematical analysis are described. Section 3 shows the numerical results and discussions of these two schemes. Finally, conclusions are given in section 4.

II. PROPOSED CHANNEL RESERVATION SCHEMES

In this paper, we extend our previous proposed algorithms, CFP and UNI, to algorithms that are more general than those by using multi-token, namely, MT-CFP and MT-UNI, respectively.

Let us first define the following variables which are to be used correspondingly in the mathematical analysis:

T_i = the number of tokens for user i .

S_i = the successful status bit for user i .

$S_i = "0"$ means user i has not succeeded yet.

$S_i = "1"$ means user i has already succeeded.

M = the number of users.

N = the number of reservation slots.

R = the number of remain users in system

A. Multi-token Cascade Fixed Prob (MT-CFP)

This scheme is modified from the CFP scheme and makes it more general. The concept is the same as CFP scheme that each user will attempt to make a reservation in sequence from the first slot to the last until there is no remain token for making a request.

In terms of the performance analysis, we can calculate $P_{MT-CFP}[k | T_1, T_2, \dots, T_M, S_1, S_2, \dots, S_M, N]$, the probability that k successful users given the number of token T_i , successful status bit S_i and the number of user N by using the following equation:

$$P_{MT-CFP}[k | T_1, T_2, \dots, T_M, S_1, S_2, \dots, S_M, N] = (1-p)^R \times \mathbf{P}_0 + p(1-p)^{R-1} \times \mathbf{P}_1 + \sum_{i=2}^R p^i (1-p)^{R-i} \times \mathbf{P}_i \quad (1)$$

where $R = M - \text{summation of zero bit of } T_1, T_2, \dots, T_M$

$$\mathbf{P}_0 = (P[k | T_1, T_2, \dots, T_M, S_1, S_2, \dots, S_M, N-1])$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_1 &= P[k-x | T_1-1, T_2, \dots, T_M, S_1+x, S_2, S_3, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ &+ P[k-x | T_1, T_2-1, \dots, T_M, S_1, S_2+x, S_3, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ &\vdots \\ &+ P[k-x | T_1, T_2, \dots, T_M-1, S_1, S_2, S_3, \dots, S_{M-1}, S_M+x, N-1] \end{aligned}$$

$$x = \begin{cases} 0 & \text{if repeated success} \\ 1 & \text{if new success} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_2 &= P[k | T_1-1, T_2-1, T_3, \dots, T_M, S_1, S_2, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ &+ P[k | T_1-1, T_2, T_3-1, \dots, T_M, S_1, S_2, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ &\vdots \\ &+ P[k | T_1, \dots, T_{M-2}-1, T_{M-1}, T_M-1, S_1, S_2, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ &+ P[k | T_1, \dots, T_{M-2}, T_{M-1}-1, T_M-1, S_1, S_2, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \\ &\vdots \\ \mathbf{P}_R &= P[k | T_1-1, T_2-1, \dots, T_{M-1}-1, T_M-1, S_1, S_2, \dots, S_{M-1}, S_M, N-1] \end{aligned}$$

The boundary conditions are set according to the following

$$P_{MT-CFP}[k | T_i, S_i, N] = \begin{cases} 0 & \text{if } k < 0, T_i \geq 0, S_i \geq 0, N \geq 0 \\ 1 & \text{if } k = 0, T_i \geq 0, S_i \geq 0, N = 0 \\ 1 & \text{if } k = 0, T_i = 0, S_i \geq 0, N \geq 0 \\ 0 & \text{if } k > N, T_i \geq 0, S_i \geq 0 \end{cases}$$

The average number of successful users defined as throughput is shown in (2)

$$\begin{aligned} T_{MT-CFP}[M, N, T] &= \sum_{j=0}^M j \times P_{MT-CFP}[j | T_1, T_2, \dots, T_M, S_1, S_2, \dots, S_M, N] \quad (2) \end{aligned}$$

The appropriate permission probability (p) can be found by differentiating equation (2) with respect to p , setting it to zero, i.e. $\frac{\partial}{\partial p} T_{MT-CFP}[M, N, T] = 0$ and find p which give the maximum throughput.

B. Multi-Token Uniform (MT-UNI)

This scheme is an alteration of UNI by applying the multi-token algorithm which allows each user randomly chooses any T slots for reservation out of available slots with equal probability. Therefore, we can calculate $P[k | M, N, T]$, the probability that k successful users given the number of users M , the number of reservation slots N and the number of tokens T by using the following equation:

$$P[k | M, N, T] = \frac{C[k | M, N, T]}{\sum_{k=0}^M C[k | M, N, T]} \quad (3)$$

$C[k | M, N, T]$ denotes the number of cases that that k successful users given the number of users M , the number of reservation slots N and the number of tokens T .

$\sum_{k=0}^M C[k|M,N,T]$ represents the number of all cases that can be derived from the summation of each k successful users ($k = 0, 1, 2, \dots, M$) given the number of users M , the number of reservation slots N and the number of tokens T . This can be expressed as

$$\sum_{k=0}^M C[k|M,N,T] = [N \cdot (N-1) \cdot (N-2) \cdot \dots \cdot (N-(T-1))]^M \quad (4)$$

The throughput of MT-UNI that defined in term of the average number of successful users is demonstrated in (5)

$$T_{MT-UNI}[M, N, T] = \sum_{j=0}^M (k \times P[k|M, N, T]) \quad (5)$$

III. NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSIONS

A. Performance of MT-CFP scheme

We shall first illustrate how the permission probability has an effect on the system performance, which is measured in terms of average number of successful users (also referred to as the system throughput here). In Figure 2, the number of slots N is held constant at 8, the total number of users M and the number of token T varied from 1 to 16 and 1 to 8, respectively. As we can see, at the small values of permission probability the average number of successful users increases with the permission probability. This is simply because under this condition users do not access the request slots frequently enough; a lot of time these slots are idle. Therefore, an increase in the permission probability will reduce the number of idle slots and thus improving the system throughput. When increasing the permission probability up to a certain value, the number of successful users begins to decline. This performance degradation is due to an increase in the number of collisions caused by too many accessing attempts. The point of permission probability that gives the maximum throughput, we referred to appropriate permission probability (p).

Considering in term of the number of token and appropriate permission probability, we found that in the light load condition ($M=2,4$), the value of appropriate permission probability increases with the increment of number of token. This due to under this condition, there are many idle reservation slots and many tokens for accessing into the reservation slots if collision has occurred. Therefore, increasing the value of appropriate permission probability has resulted in the increment of throughput. However, after increasing the number of token up to a certain value, the appropriate permission probability will decrease and finally be constant when the number of token is more than necessary as shown in Figure 3.

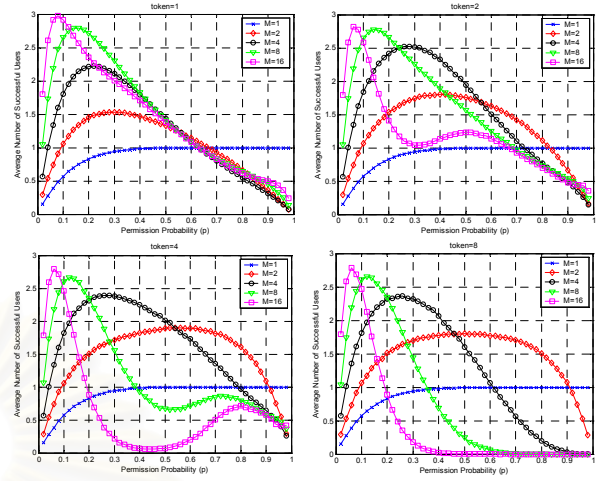


Figure 2. The average number of successful users vs permission probability under any system conditions.

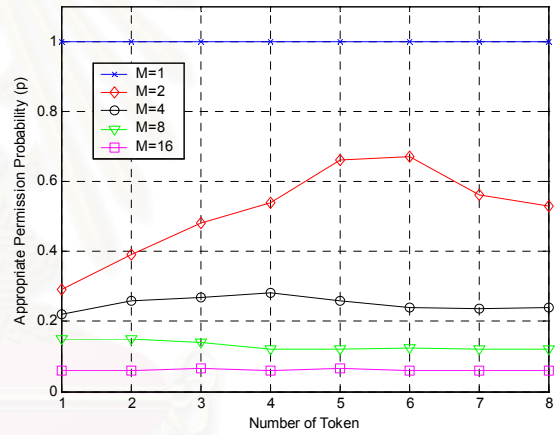


Figure 3. The value of appropriate permission probability vs the number of token with the various number of users.

Another important point from Figure 2, we observe that there are some fluctuations in case of heavy load condition. Let we explain in case of the number of users is 8 and the number of token is equal to 4. It is apparent that at the permission probability of 0.52 the average number of successful users is 0.655 and the average number of successful users rises to 0.866 at the permission probability is equal to 0.72. In common case, the average number of successful users should inversely vary to permission probability. Nevertheless, we can describe about this phenomena that at $p=0.52$, the collision occur in every slot from slot number 1 to 8, this limit the chance to success and consequently result in the performance degradation. On the contrary, at $p=0.72$, this value of permission probability is quite high so the collision of high number of user such as $M=6,7,8$ extremely occur in the beginning of reservation

period. This make at the last period of reservation slot there is small number of remain users and this remain users will succeed in the reservation process. This is clearly illustrated in Figure 4-5.

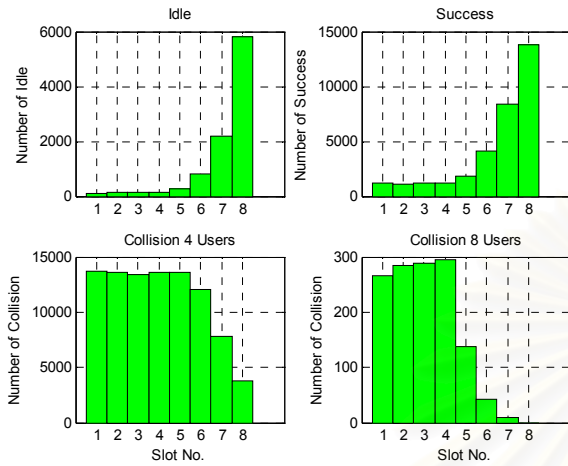


Figure 4. The number of idle, success and collision in each reservation slot at permission probability = 0.52

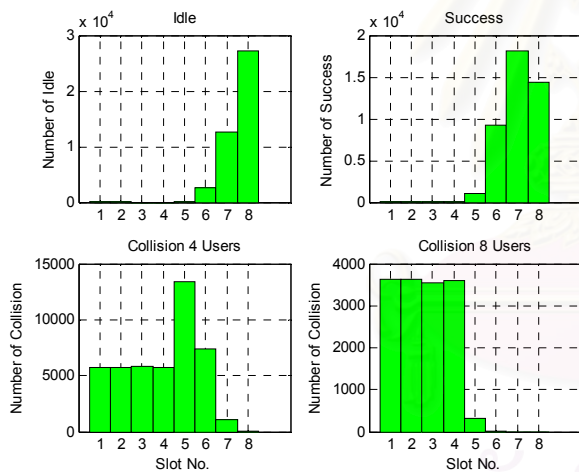


Figure 5. The number of idle, success and collision in each reservation slot at permission probability = 0.72

Figure 6 shows the relation between the number of tokens and percentage of average number of successful users. We found that under the light load condition such as $M = 2, 4$, at the beginning the percentage of average number of successful users increases with the number of tokens. However, after increasing the number of token to the certain value, the percentage of average number of successful users begins to deteriorate and eventually be steady. This is due to the increment of number of tokens gives the higher chance to succeed but it is limited by the suitable value, the excess will

cause larger number of collision and performance degradation the same as it occur in the heavy load condition.

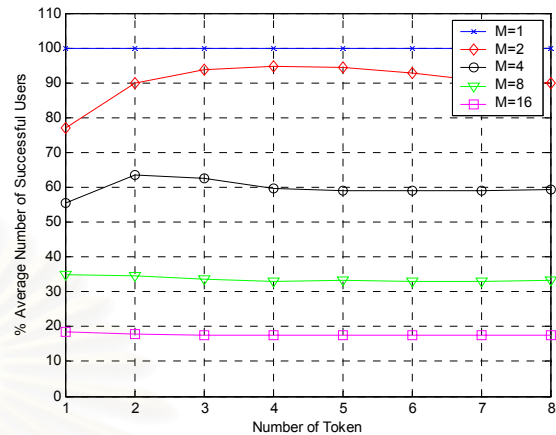


Figure 6. The percentage of average number of successful users vs the number of tokens with the number of request slots fixed at 8.

All the above results indicate that the number of tokens is a key factor to the system performance. Thus, the appropriate number of token (ANT) gives the best point of system throughput. It can be notice that under the light load condition, an increment of the number of tokens will increase the successful opportunity. On the contrary, under the heavy load condition, the users can lower the risk of collision by reducing the number of tokens. We can be summarized the appropriate number of token as shown in table 1.

Table 1
Appropriate number of token (ANT) for MT-CFP with various number of users, number of slots = 8

M	1	2	3	4	5	6	7	≥ 8
ANT	1	4	3	2	2	2	2	1

From table1, it can be approximately expressed the formula in general form for calculating the appropriate number of token under any system conditions by using the equation as follows :

$$ANT_{MT-CFP} = \begin{cases} 1 & ; \text{ when } M = 1 \text{ or } M \geq N \\ \lceil \frac{N}{M} \rceil & ; \text{ when } 1 < M < N \end{cases} \quad (6)$$

where $\lceil x \rceil$ is the smallest integer more than x .

B. Performance of MT-UNI scheme

Consider Figure 7 that shows the relation between the percentage of average number of successful users and the number of tokens. In this Figure, the number of slots is fixed at 16 and the total number of users is equal to 2, 4, 8 and 16. As we can see, when the number of users is equal to 2, 4 and 8, at small values of the tokens the percentage of average number of successful users rises as the number of tokens increases. This is because an increase in the number of tokens will reduce the number of idle slots and thus improving the system throughput. When increasing the tokens to a certain value, the percentage of average number of successful users begins to decline. This performance degradation is due to an increase in the number of collisions caused by too many accessing attempts.

As the number of users becomes equal to the number of slots, the percentage of average number of successful users declines continuously and eventually approaches zero. This is because when too many users accessing a few number of slots the risk of collision increases.

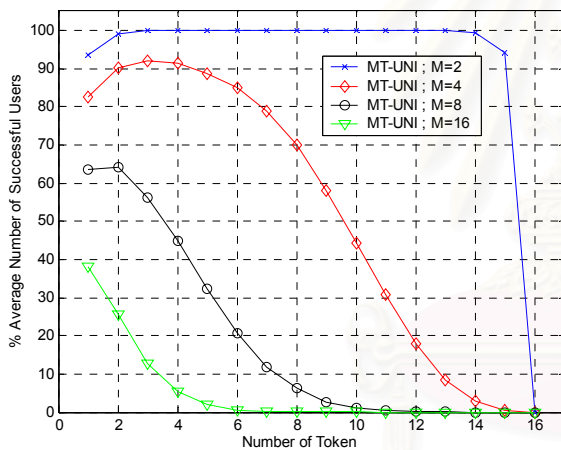


Figure 7. The percentage of average number of successful users vs the number of tokens with the number of request slots fixed at 16

Figure 8. shows the average number of successful users for various values of the number of tokens as the function of the number of users. This figure confirm that the increment of the number of tokens can be improved the system performance. Nevertheless, this improvement is constrained by the number of users in the system. At the large number of users, increasing the number of tokens does not affect to the betterment of system throughput. Moreover, we found that at the small number of users such as $M = 2$, the increment of number of tokens slightly takes effect to system throughput. This is due to under this situation, the no multi-token scheme has the fine system performance.

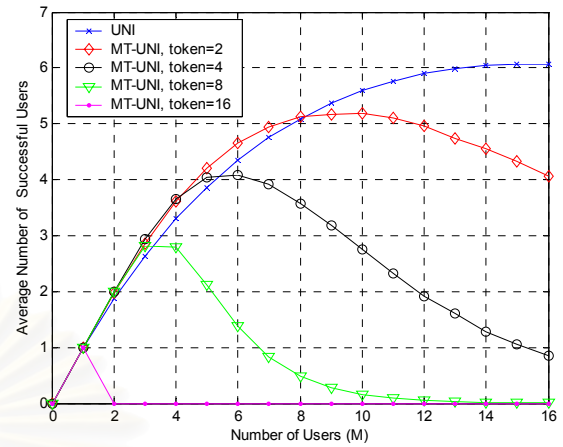


Figure 8. The average number of successful users vs the number of users with the number of request slots fixed at 16

From the above investigations, considering in term of the appropriate number of tokens, we also observe the same result as of MT-CFP. Table 2 concludes an appropriate number of tokens for various values of the number of users with the number of request slots fixed at 16.

Table 2
Appropriate number of token (ANT) for MT-UNI with various number of users, number of slots = 16

M	1	2	3	4	5	6	7	8	>8
ANT	1	8	5	4	3	2	2	2	1

From the results in table 2, it can be approximately formulated the equation in general form for estimating the appropriate number of token under any system conditions by using the equation as follows :

$$(7) \quad ANT_{MT-UNI} = \begin{cases} 1 & ; \text{ when } M = 1 \text{ or } M > \frac{N}{2} \\ \lfloor \frac{N}{M} \rfloor & ; \text{ when } 1 < M \leq \frac{N}{2} \end{cases}$$

where $\lfloor x \rfloor$ is the largest integer less than x .

We shall devote the final part of this section to the performance comparison of all proposed schemes and our previous work schemes, this is depicted in Figure 9. When comparing all the proposed schemes, the multi-token schemes, with their original version that have only one token.

It is clear that our proposed schemes generally perform better performance at small number of users which is not more than the number of slots in case of MT-CFP and not more than the number of slots divided by 2 in case of MT-UNI. However, at the large number of users the performance are equal. This is because at the large number of users, the best value of token is equal to 1. Therefore, the results of our proposed schemes are converged to their primary schemes.

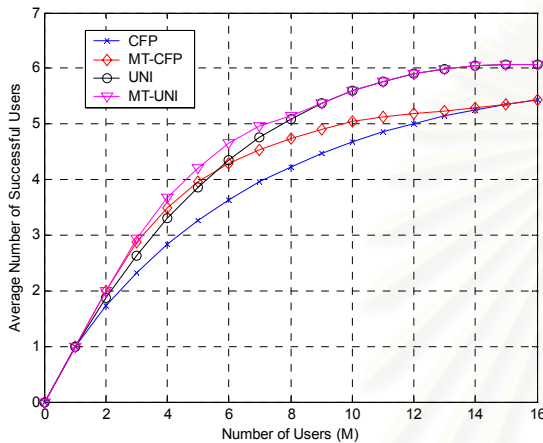


Figure 9. The maximum number of successful users using the appropriate number of tokens

IV. CONCLUSION

In this paper, we have introduced two new channel reservation schemes for medium access control protocols in high bit rate wireless systems, the extension of our previous work in general case by using the multi-token scheme. The mathematical analysis derived in this paper enables us to numerically evaluate the performance of all proposed schemes. Through the numerical results, we found that the MT-CFP and MT-UNI schemes are effective when the number of user is not more than the number of reservation slot. The appropriate number of token (ANT) is the important parameter to justify the performance of the system. In light load condition, the higher value of token leads to the higher chance of success. On the contrary in case of heavy load, the larger number of token gives the greater probability of collision. In addition, the appropriate value of ANT is the parameter which gives the highest slot efficiency. The suitable ANT can be acquired as the offer load is approximately equal to 1. However, the performance is slightly improved under light load condition such as the number of user is equal to 2 and the number of slot is 16. Increasing the number of token insignificantly take effect to the system performance. This is because under this system condition, the original schemes primarily give the satisfiable performance.

REFERENCES

- [1] D. Bertsekas and R. Gallager, Data Network, Second Edition, Prentice Hall, 1992.
- [2] H. Peyravi, "Medium access control protocols performance in satellite communications," *IEEE Communication Magazine*, vol. 37, pp. 62-71, March 1999.
- [3] S. Tasaka, K. Hayashi, and Y. Ishihashi, "Integrated Video and Data Transmission in the TDD ALOHA Reservation Wireless LAN", in *Proc. ICC'95*, Seattle, vol. 3, pp. 1387-1393, 1995.
- [4] D.J. Goodman, R.A. Valenzuela et al., "Packet Reservation Multiple Access for Local Wireless Communications", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, no. 8, pp. 885-890, 1989.
- [5] J. Frigon, V. C. M. Leung, and H. C. B. Chan, "Dynamic Reservation TDMA Protocol for Wireless ATM Networks", *IEEE JOURNAL on Selected Areas in Communications*, vol. 19 No. 2, pp. 370-383, February 2001.
- [6] A. Thanasoravit, P. Sedthetorn, P. Suwanpakdee and L. Wuttisittikulkij, "Designing an efficient MAC protocol for integrated Voice and Data Services in Wireless Networks," in *Proceedings of the 7th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems (ICCS)*, Singapore, November 2000.
- [7] P. D. Roorda and V. C. Leung, "Dynamic control of time slot assignment in multiaccess reservation protocols", in *Proc. IEE*, vol. 143, Issue. 3, pp. 167-175, June 1996.
- [8] N. Sivamok, L. Wuttisittikulkij, and A. Charoenpanitkit, "New Channel Reservation Techniques for Media Access Control Protocol in High Bit-Rate Wireless Communication Systems", *IEEE Proc. of Globecom*, vol. 6, pp. 3558-3562, 2001.

NEW SINGLE-ACCESS CHANNEL RESERVATION SCHEMES FOR QoS CONSTRAINED MULTIMEDIA TRAFFIC

Atipong Suriya, Akkarapat Charoenpanichkit, Akkarapol Thanasoravit,
Supavadee Aramvith, and Lunchakorn Wuttisittikulij
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,
Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand 10330
Tel: (662) 2186908 Fax: (662) 2518991 Email: lunch@ee.eng.chula.ac.th

Abstract-- We consider a single-access system where high bit-rate communication systems constrain the propagation delay between users and the base station. In this scenario, we found that existing channel reservation schemes cannot guarantee the satisfaction to all users regarding different Quality of Service (QoS). Thus in this paper, we propose two new channel reservation schemes which taken into consideration priority service to more delay-sensitive multimedia traffics, namely, *UNI+MLA*, and *Partial UNI+MLA* schemes for multimedia traffics, an extension of our recently proposed *UNI+LA* scheme for single-class traffic. The goal is to achieve the highest system performance and enable each traffic types to meet their QoS requirements. We evaluate the performance of each scheme by mathematical analysis. The numerical results show that our proposed schemes are effective in enabling different traffic users to achieve the best successful rate possible in this kind of environment.

Index terms-- channel reservation, Quality of Service, multi-class traffic, priority, wireless communication.

I. INTRODUCTION

The rapid growing of multimedia communications applications today has resulted in the extensive use of communication technology. Several emerging applications such as wireless and internet multimedia communication services, including streaming video, and video phone, etc., play an increasingly important role in current systems. These systems will support a wider range of applications involving information such as packet data, voice, image, and video. When there are many different classes of end-users in the system, the user's requests are likely to collide with each other. Thus, some means of medium access control (MAC) protocols are needed. This MAC protocols will have a significant impact on the user performance, system capacity, and hardware complexity. A successful MAC protocol should indeed take full advantage of the different kinds of traffic to achieve high multiplexing efficiency.

Several MAC protocols have been developed over the past years. Conventional MAC protocols have been classified into contention-free and contention-based [1,2]. Presently high performance MAC protocols designate a frame structure which consists of a reservation and an information parts, as shown in Fig. 1. A reservation part consists of a number of request slots. All users are given a chance to reserve slots on a contention basis. Qualified users from the reservation process will be assigned slots in the information part for traffic transmission. By using much lower ratio of reservation period and transmission period by several orders of magnitude, these protocols has been shown to improve efficiency. Examples for this type of protocol are ALOHA Reservation [3], HAR [4], DR-

TDMA [5], SND-MAC [6] and others [7,8]. However, these protocols are not suitable for single-access reservation systems where users are limited to make a single request per frame as the protocols become unstable when too many terminals try to communicate at a time.

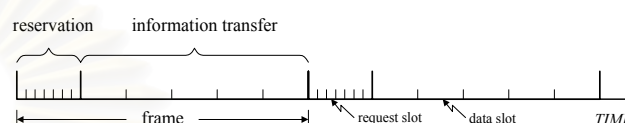


Figure 1 Frame structure under relatively long propagation delay.

We have studied and proposed channel reservation scheme for single-access systems, namely, Uniform and Limited Access (*UNI+LA*) as in [9]. In *UNI+LA* scheme, it uses a limiting probability to limit the user's request in accordance with the number of available slots. After that, each user with granted access will choose to reserve one slot out of all available request slots with equal probability. With this mechanism, we can see that all request slots can now be uniformly assigned.

In this paper, we extend our previous work in [9] to be namely, Uniform and Multiple Limited Access (*UNI+MLA*), and Partial of Uniform and Multiple Limited Access (*Partial UNI+MLA*), to handle multi-class traffic. The objective is to achieve the highest system performance and enable each traffic types to meet their QoS requirements. The effectiveness of the schemes is verified by mathematical analysis in generalized form and numerical results. In the following sections, we discuss two reservation techniques for single-access systems we proposed and show numerical results and discussions.

II. PROPOSED CHANNEL RESERVATION SCHEMES FOR MULTI-CLASS TRAFFIC

In this paper, we extend our previously proposed algorithm, *UNI+LA* scheme, to algorithms that are capable of handling multi-class traffics, namely, *UNI+MLA*, and *Partial UNI+MLA* schemes as shown in Fig. 2. For certain classes of traffic, the contention phase limits part of the scheme while other classes are less sensitive to the introduced delay. The examples of packets sensitive to contention delay are the first packet of a voice talkspurt, a request for new bit-rate in a connection or a handoff request for real time connection. On the other hand, packets that contain data messages or a request to establish a new connection are considered less time sensitive. It is thus necessary to find a contention access mechanism that will give priority to delay sensitive service. Therefore, the new channel reservation schemes, *UNI+MLA* and *Partial UNI+MLA*, which are suitable for the systems with

different classes of users, are developed and their complete analysis is given in this paper. The purpose of these schemes is to prioritize delay sensitive service over the less sensitive ones while maintaining the channel bandwidth utilization.

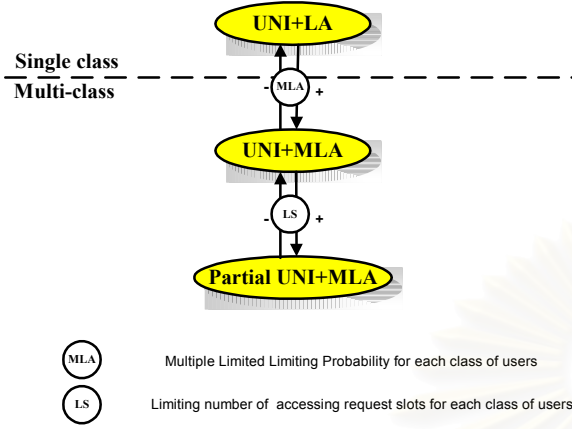


Figure 2 Relations among proposed channel reservation schemes with *UNI+LA* scheme.

Let we first define the following variables which are to be used correspondingly in the mathematical analysis:

C = the number of priority classes in the system.

n_i = the number of request slots for priority class i .

N = total number of request slots in the frame.

m_i = the number of users in priority class i .

k_i = the number of successful users in priority class i .

A. Uniform and Multiple Limited Access Scheme (*UNI+MLA*)

This scheme is modified from the *UNI+LA* scheme to handle multi-class traffics. In *UNI+LA* scheme, a predefined limiting probability value is set equally for all users. Therefore, if the system supports users with different classes of traffics, it is more suitable to set different predefined limiting probability to each priority class, i.e., more delay-sensitive traffics receive higher probability of getting a permission than the lower one. Thus, it is important to identify appropriate set of limiting probability for different classes of users. In addition, this probability should be selected such that the overall system throughput is maximized.

In terms of performance analysis, we can calculate $P_{UNI+MLA}[k_1, k_2, \dots, k_C | m_1, m_2, \dots, m_C, N]$, the probability that k_i successful users of priority class i with number of user m_i and different limiting probability p_i by using the following equation:

$$P_{UNI+MLA}[k_1, k_2, \dots, k_C | m_1, m_2, \dots, m_C, N] \quad (1)$$

$$= \sum_{a_1=0}^{m_1} \sum_{a_2=0}^{m_2} \dots \sum_{a_C=0}^{m_C} \left(\prod_{j=1}^C b[m_j, a_j, p_j] \right) P[k_1, k_2, \dots, k_C | a_1, a_2, \dots, a_C, N]$$

where

$$P[k_1, k_2, \dots, k_C | a_1, a_2, \dots, a_C, N] \quad (2)$$

$$= \sum_{i_1=0}^{a_1} \sum_{i_2=0}^{a_2} \dots \sum_{i_C=0}^{a_C} \left(\prod_{j=1}^C b[a_j, i_j, 1/N] \right) P[k_1, k_2, \dots, k_C | a_1 - i_1, a_2 - i_2, \dots, a_C - i_C, N - 1]$$

except

$$i_1 = 1, i_2 = 0, \dots, i_C = 0 \text{ or}$$

$$i_1 = 0, i_2 = 1, \dots, i_C = 0 \text{ or}$$

\vdots

$$i_1 = 0, i_2 = 0, \dots, i_C = 1$$

+

$$\sum_{i=1}^C b[a_i, 1, 1/N] \left(\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^C b[a_j, 0, 1/N] \right) P[k_1, k_2, \dots, k_{i-1}, \dots, k_C | a_1, a_2, \dots, a_i - 1, \dots, a_C, N - 1]$$

The boundary conditions are set according to the followings:

$$P[k_1, k_2, \dots, k_C | a_1, a_2, \dots, a_C, N]$$

0	if $k_1 < 0$ or $k_2 < 0, \dots, \text{or } k_C < 0, a_1 + a_2 + \dots + a_C \geq 0, N \geq 0$
0	if $k_1 + k_2 + \dots + k_C > N, a_1 + a_2 + \dots + a_C \geq 0, N \geq 0$
0	if $k_1 > a_1$ or $k_2 > a_2, \dots, \text{or } k_C > a_C, a_1 + a_2 + \dots + a_C \geq 0, N \geq 0$
1	if $k_1 + k_2 + \dots + k_C = 0, a_1 + a_2 + \dots + a_C \geq 0, N = 0$
=1	if $k_1 + k_2 + \dots + k_C = 0, a_1 + a_2 + \dots + a_C = 0, N \geq 0$
0	if $k_1 + k_2 + \dots + k_C > 0, a_1 + a_2 + \dots + a_C > 1, N = 1$
1	if $k_1 + k_2 + \dots + k_C = 0, a_1 + a_2 + \dots + a_C > 1, N = 1$
0	if $k_1 + k_2 + \dots + k_C = 0, a_1 + a_2 + \dots + a_C = 1, N \geq 1$
1	if $k_1 + k_2 + \dots + k_C = 1, a_1 + a_2 + \dots + a_C = 1, N \geq 1$

The average number of successful users of the frame, defined as throughput, $(T_{UNI+MLA}[m_1, m_2, \dots, m_C, N])$ is derived as follows:

$$T_{UNI+MLA}[m_1, m_2, \dots, m_C, N] \quad (3)$$

$$= \sum_{i=1}^C \sum_{j_i=0}^{m_i} \left(j_i \times P_{UNI+MLA}[j_i | m_1, m_2, \dots, m_C, N] \right)$$

where

$$P_{UNI+MLA}[j_i | m_1, m_2, \dots, m_C, N] \quad (4)$$

$$= \sum_{k_1=0}^{m_1} \sum_{k_2=0}^{m_2} \dots \sum_{\substack{j_i=j_i \\ k_i \neq j_i}}^{j_i} \dots \sum_{k_C=0}^{m_C} P_{UNI+MLA}[k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_C | m_1, m_2, \dots, m_C, N]$$

The appropriate limiting of probability for users class i , p_i , can be found by differentiating equation (3) with respect to p_i , setting them to zero and find p_i which give the maximum throughput.

B. Partial of Uniform and Multiple Limited Access Scheme (*Partial UNI+MLA*)

This scheme is developed from the *UNI+MLA* scheme by limiting the number of accessing request slots and setting different probability for each class of users. However, the slots are not absolutely divided but still shared between classes. By this mechanism, users from the higher priority class will have higher opportunity to select the available slots than the users from lower priority class.

In terms of performance analysis, we can calculate the probability of k_i successful users of priority class i with

number of user m_i , different limiting probability p_i and the number of accessing request slots n_i , $P_{\text{Partial UNI+MLA}}[k_1, k_2, \dots, k_C | m_1, m_2, \dots, m_C, N, n_2, \dots, n_C]$, by using the following equation:

$$P_{\text{Partial UNI+MLA}}[k_1, k_2, \dots, k_C | m_1, m_2, \dots, m_C, N, n_2, \dots, n_C] \quad (5)$$

$$= \sum_{a_1=0}^{m_1} \sum_{a_2=0}^{m_2} \dots \sum_{a_C=0}^{m_C} \left(\prod_{i=1}^C [m_i, a_i, p_i] \right) P[k_1, k_2, \dots, k_C | m_1, m_2, \dots, m_C, N, n_2, \dots, n_C]$$

where

$$P[k_1, k_2, \dots, k_C | m_1, m_2, \dots, m_C, N, n_2, \dots, n_C] \quad (6)$$

$$\left(\prod_{i=1}^C \sum_{j_{i1}=0}^{m_i} \sum_{j_{i2}=0}^{m_i - j_{i1}} \dots \sum_{j_{iC}=0}^{m_i - j_{i1} - j_{i2} - \dots - j_{i(C-1)}} \right) \left(\prod_{i=1}^C \sum_{j_{i1}=0}^{k_i} \sum_{j_{i2}=0}^{k_i - j_{i1}} \dots \sum_{j_{iC}=0}^{k_i - j_{i1} - j_{i2} - \dots - j_{i(C-1)}} \right) \left(\prod_{i=1}^C \sum_{j_{i1}=0}^{m_i - j_{i1}} \sum_{j_{i2}=0}^{m_i - j_{i1} - j_{i2}} \dots \sum_{j_{iC}=0}^{m_i - j_{i1} - j_{i2} - \dots - j_{i(C-1)}} \right) \left(\prod_{i=1}^C \sum_{j_{i1}=0}^{k_i - j_{i1}} \sum_{j_{i2}=0}^{k_i - j_{i1} - j_{i2}} \dots \sum_{j_{iC}=0}^{k_i - j_{i1} - j_{i2} - \dots - j_{i(C-1)}} \right) \left(\prod_{a=1}^{C-1} b[m_{1a}, i_{1a}, \frac{n_C}{N}] P[j_{11}, \dots, j_{1C} | i_{11}, \dots, i_{1C}, n_C] \right) \times \left(\prod_{a=1}^{C-2} b[m_{2a}, i_{2a}, \frac{(n_{C-1} - n_C)}{N}] P[j_{21}, \dots, j_{2(C-1)} | i_{21}, \dots, i_{2(C-1)}, (n_{C-1} - n_C)] \right) \times P'[j_{C1} | i_{C1}, N - n_2]$$

$P[j_{x1}, \dots, j_{xC} | i_{x1}, \dots, i_{xC}, y]$ can find by using equation (2)

$$P'[j_{C1} | i_{C1}, N - n_2] = b[i_{C1}, 0, 1/(N - n_2)] P'[j_{C1} | i_{C1}, N - n_2 - 1] + b[i_{C1}, 1, 1/(N - n_2)] P'[j_{C1} - 1 | i_{C1} - 1, N - n_2 - 1] + \sum_{a=2}^{i_{C1}} b[i_{C1}, a, 1/(N - n_2)] P'[j_{C1} | i_{C1} - a, N - n_2 - 1]$$

$$\text{and } m_{ya} = m_a - \sum_{x=1}^{y-1} i_{xa}$$

The average number of successful users ($T_{\text{Partial UNI+MLA}}[m_1, m_2, \dots, m_C, N, n_2, \dots, n_C]$) is derived as follows:

$$T_{\text{Partial UNI+MLA}}[m_1, m_2, \dots, m_C, N, n_2, \dots, n_C] \quad (7)$$

$$= \sum_{i=1}^C \sum_{j_i=0}^{m_i} (j_i \times P_{\text{Partial UNI+MLA}}[j_i | m_1, m_2, \dots, m_C, N, n_2, \dots, n_C])$$

where

$$P_{\text{Partial UNI+MLA}}[j_i | m_1, m_2, \dots, m_C, N, n_2, \dots, n_C] \quad (8)$$

$$= \sum_{k_1=0}^{m_1} \dots \sum_{k_i=j_i}^{j_i} \dots \sum_{k_C=0}^{m_C} P_{\text{Partial UNI+MLA}}[k_1, \dots, k_i, \dots, k_C | m_1, \dots, m_i, \dots, m_C, N, \dots, n_i, \dots, n_C]$$

The appropriate number of accessing request slots and the limiting of probability for users class i , n_i and p_i , can be found by differentiating equation (7) with respect to n_i and p_i , setting them to zero and find n_i and p_i which give the maximum throughput.

III. NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSIONS

For conveniences, these notations will be used in the following discussions:

M_1	= Total number of users of service class 1
M_2	= Total number of users of service class 2
N	= Total number of request slots in the frame
N_1	= Number of request slots for service class 1
N_2	= Number of request slots for service class 2
p_1	= Limiting probability of service class 1
p_2	= Limiting probability of service class 2
T_{S1}	= Average number of successful users of service class 1
T_{S2}	= Average number of successful users of service class 2
T_{total}	= Total average number of successful users of 2 service classes = $T_{S1} + T_{S2}$
γ	= QoS Controller = $(T_{S1} / M_1) / (T_{S2} / M_2)$

Note that we define service class 1 to have higher priority than service class 2 and the number of request slots is fixed at 16 for all results.

A. Performance of UNI+MLA scheme

Fig. 1 shows the relationship between γ and MAXIMUM T_{total} for the UNI+MLA scheme when the number of request slots are fixed at 16. As we can see, the UNI+MLA scheme is a flexible method, as it is able to control an arbitrary level of γ . The UNI+MLA scheme satisfies the system requirement using an advantage of the limiting probability mechanism of the UNI+LA algorithm for the single-class traffic by assigning different values of limiting probability for each traffic class. At $\gamma = 1$, no difference between two classes, the scheme works in the same manner as UNI+LA scheme. However, when $\gamma > 1$, it can be observed that the throughput decreases as the γ increases. This is because the system has to limit the number of users from class 2 in order to achieve the desired γ . Thus, MAXIMUM T_{total} is decreased because the throughput of class 2 decreases at a faster rate than the increasing rate of the throughput of class 1. In addition, the maximum T_{total} of the system with lower number of class 1 users also reduces at a faster rate than the system with higher number of class 1 users.

Fig. 2 shows the relationship between the limiting probability of class 1 users and the desired γ . From the results of UNI+LA scheme [9], the way to maximize T_{total} is to set the limiting probability to 1 when the number of users is less than the number of request slots as in our case here. Therefore, at $\gamma = 1$, the p_1 is equal to 1. For the case when $\gamma > 1$, the value of p_1 is still at 1. This is because the highest system throughput can be reached by maximizing the throughput from 2 classes. Therefore, in this case the number of request slots is enough for users, the system can adjust the value of desired γ in order to achieve the

highest T_{total} by first trying to set p_1 to 1 in order to maximize T_{S1} .

For the value of p_2 in Fig. 3, it can be seen that at $\gamma=1$ the value of p_2 is equal to 1. This is due to the sufficient number of request slots and there are no differences between two classes of users. However, when $\gamma>1$, the value of p_2 is less than 1 owing to the definition of γ . Moreover, we can see that the value of p_2 in any combination of the number of users in each class are similar. This is because the γ is defined to be the ratio of throughput per user between class 1 and class 2. Thus, there is no effect from the different number of class 2 users. In addition, there are no restriction of the throughput of user class 1. This make the value of p_2 from all systems are equivalent.

B. Performance of Partial UNI+MLA scheme

Fig. 4 shows the relationship between the number of accessing request slots for user class 2 and the throughput with different combination of the number of users in each service class. The limiting probability of each class is set to 1. At the beginning in the system with $M1:M2 = 4:12$, throughput decreases as the number of accessing request slots for users class 2 increases. This is because the increasing number of request slots are still not enough to reduce the collision. However, after increasing the number of accessing request slots for user class 2 up to a certain value, the throughput will increase because the distribution of the users' request will reduce the number of idle slots. For the system with $M1:M2 = 12:12$, throughput always decreases during the increment of the number of accessing request slots for user class 2. Since the number of request slots are not sufficiently enough for user class 1, the increasing number of accessing request slots for user class 2, the higher chance of collision. Conversely, for the system with $M1:M2 = 2:4$, throughput will always increase as the number of accessing request slots for user class 2 increases. This results from the utilization of the idle request slots in the frame.

Figs. 5-7 show the relationship between γ and the maximum throughput at various number of accessing request slots for user class 2. It can be seen that, in all systems, the maximum throughput is reached when the number of accessing request slots for user class 2 is equal to the number of request slots in the frame. This is because the request slots for each class are not divided separately. Therefore, at low value of γ , the low number of accessing request slots for users class 2 results in the low throughput value of user class 2 because of the restriction of the throughput of user class 1 in order to achieve the desired γ . However, the restriction of throughput between two classes will reduce as the γ increases. In addition, only the adjustment of the limiting of probability for each class is enough to limit the number of accessing users for each class.

IV. CONCLUSIONS

In this paper, we have presented two new channel reservation schemes for supporting multi-class traffic with

guaranteed different QoS requirements. The mathematical analysis derived in this paper enables us to numerically evaluate the performance of all proposed schemes. Through numerical results, we found that the *UNI+MLA* and *Partial UNI+MLA* schemes are effective as they are designed to flexibly control and adjust system parameters to achieve the desire γ . Although the *Partial UNI+MLA* has the higher adjusting parameters in order to achieve the desired γ than *UNI+MLA*, the throughput of this scheme is not better than that of *UNI+MLA*.

ACKNOWLEDGEMENT

This work is supported in part by Chulalongkorn University.

REFERENCES

- [1] A. S. Tanenbaum, "Computer Networks", 3rd Edition, Prentice-Hall International, Inc., 1996.
- [2] D. Bertsekas and R. Gallager, Data Network, Second Edition, Prentice Hall, 1992.
- [3] S. Tasaka, K. Hayashi, and Y. Ishihashi, "Integrated Video and Data Transmission in the TDD ALOHA-Reservation Wireless LAN", in Proc. ICC'95, Seattle, vol. 3, pp. 1387-1393, 1995.
- [4] W. S. Jeon, D. G. Jeong, C. Choi, "An Integrated Services MAC Protocol for Local Wireless Communications", IEEE Trans. On Veh. Tech., vol. 47 No. 1, pp. 352-364, February 1998.
- [5] J. Frigon, V. C. M. Leung, and H. C. B. Chan, "Dynamic Reservation TDMA Protocol for Wireless ATM Networks", IEEE JOURNAL on Selected Areas in Communications, vol. 19 No. 2, pp. 370-383, February 2001.
- [6] Z. Cai and M. Lu, "SND-MAC: An Efficient Media Access Control Method for Integrated Services in High Speed Wireless Networks", in Proc. International Workshop, pp. 541-547, 2000.
- [7] A. Thanasoravit, P. Sedthetom, P. Suwanpakdee and L. Wuttisittikulij, "Designing an efficient MAC protocol for integrated Voice and Data Services in Wireless Networks," in Proceedings of the 7th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems (ICCS), Singapore, November 2000.
- [8] P. D. Roorda and V. C. Leung, "Dynamic control of time slot assignment in multiaccess reservation protocols", in Proc. IEE, vol. 143 Issue: 3, pp. 167-175, June 1996.
- [9] N. Sivamok, L. Wuttisittikulij, and A. Charoentanitkit, "New Channel Reservation Techniques for Media Access Control Protocol in High Bit-Rate Wireless Communication Systems", accepted to GLOBECOM 2001.

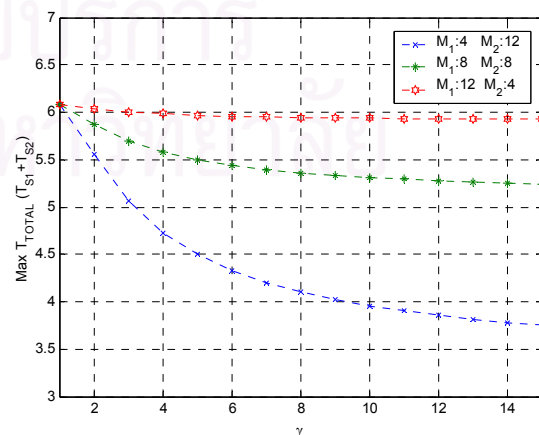


Figure 1 Comparison between different combination of number of users of each service class on the QoS Controller (γ) and the maximum total average number of successful users of 2 service classes (MAXIMUM T_{total}) for *UNI+MLA* scheme.

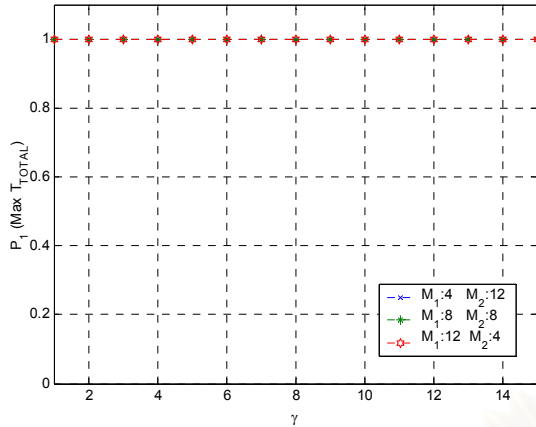


Figure 2 Comparison between different combination of the number of users of each service class on the QoS Controller (γ) and the limiting probability for users of service class 1 (p_1) for *UNI+MLA* scheme.

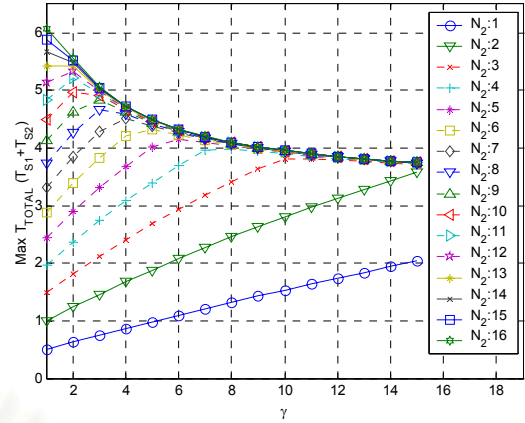


Figure 5 Comparison between different number of accessing request slots for users class 2 on the QoS Controller (γ) and the MAXIMUM T_{total} for the system in the system with $M_1:4$ and $M_2:12$ using *Partial UNI+MLA* scheme.

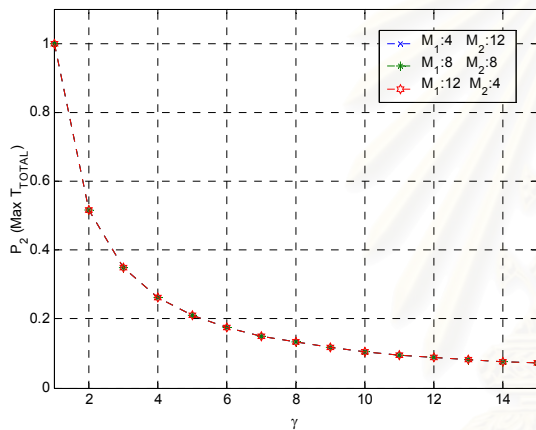


Figure 3 Comparison between different combination of the number of users of each service class on the QoS Controller (γ) and the limiting probability for users of service class 2 (p_2) for *UNI+MLA* scheme.

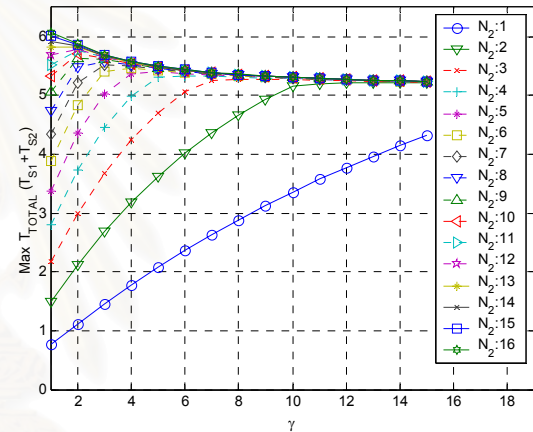


Figure 6 Comparison between different number of accessing request slots for users class 2 on the QoS Controller (γ) and the MAXIMUM T_{total} for the system in the system with $M_1:8$ and $M_2:8$ using *Partial UNI+MLA* scheme.

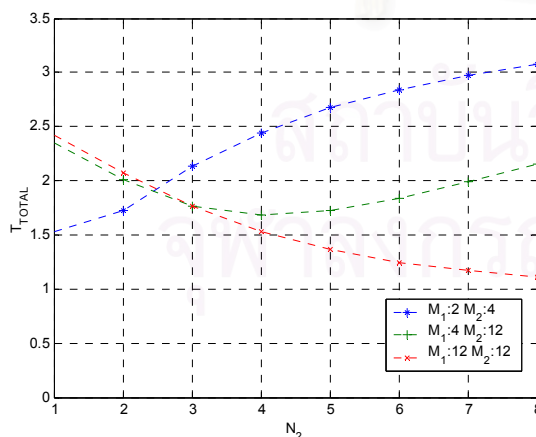


Figure 4 Comparison between different combination of the number of users of each service class on the number of accessing request slots for user class 2 (N_2) and throughput for *Partial UNI+MLA* scheme.

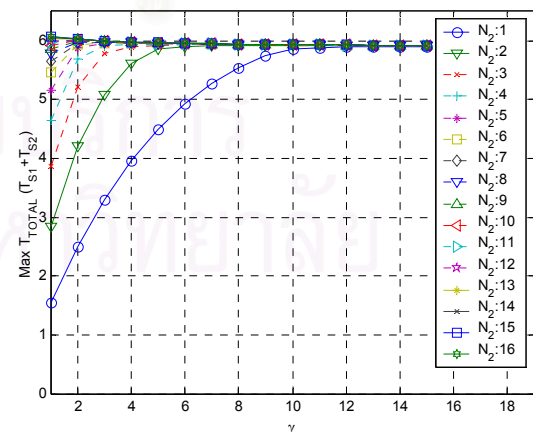


Figure 7 Comparison between different number of accessing request slots for users class 2 on the QoS Controller (γ) and the MAXIMUM T_{total} for the system in the system with $M_1:12$ and $M_2:4$ using *Partial UNI+MLA* scheme.

Delay Performance Analysis of Uniform (UNI) and Uniform with Limited Access Techniques (UNI+LA) in Wireless Communication Systems

Akkarapol Thanasorravit, Akkarapat Charoenpanichkit, Atipong Suriya,
Lunchakorn Wuttisittikulkij and Supavadee Aramvith
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering
Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand 10330
Tel: (662) 2186908 Fax: (662) 2518991 Email: lunch@ee.eng.chula.ac.th

Abstract— This paper presents the delay analysis of two new channel reservation schemes namely *UNI* and *UNI+LA* for the relatively long delay systems. Mathematical models have been formulated for the performance evaluation. We found that the numerical results from the formation derived yield the same output as the simulation results. In addition, the numerical results show that the delay performance of the system depends on the traffic load and the ratio of the number of request slots per frame.

KEYWORDS-- MAC protocols, *UNI*, *UNI+LA*, Throughput, Delay, Wireless communication

1. INTRODUCTION

Due to the mobility and access flexibility features in wireless communications, the demands for wireless communication services are growing at rapid pace. A wireless access system consists of one base station and several wireless users. The base station uses the downward channel to broadcast control traffic and/or information traffic to users, while users use the upward channel to transmit their traffic to the base station. Since the upward channel is shared among all users, who are usually distributed over the service area. It is not possible for these users to synchronize their transmission with base station. Therefore, some means of media access control (MAC) protocols are needed.

A number of distinct MAC protocols have been developed over the past years. For early or conventional MAC protocols, they can be classified into two categories, namely contention-free [1] and contention-based [1]. More recently developed protocols tend to organize the channel bandwidth into a frame structure that is composed of two parts, reservation part and information part, as shown in Fig. 1. The reservation part consists of a number of request slots, which is used by all users on a contention basis for channel reservation. A user that succeeds in the reservation process will be assigned data slot within the information part for its data transmission. These protocols derive their improved efficiency from the fact that reservation periods are shorter than transmission periods by several orders of magnitude. Examples for this type of protocol are ALOHA Reservation [2], DQRUMA [3], PRMA [4].

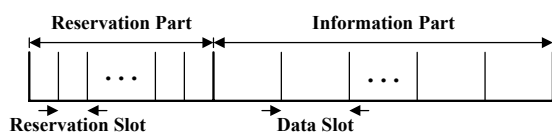


Figure 1 Frame Structure

In order to achieve the maximum throughput of the system, there is thus a need to find a new channel

reservation scheme that will be specifically adapted to the reservation protocol structure. In addition, if the propagation delay between users and base station are relatively much larger than the request slot length, users may not know the outcome of their requests within the same request slot. Thus, this paper presents the analysis of new reservation schemes in terms of delay and throughput performance with the assumption that all users can make their requests only once per frame.

Delay of the system is composed of access delay and queuing delay. Access delay is counted from the start time of packet generation to the time when the user successfully sends the request packet. For queuing delay, it is the duration between the request packet and the data packet have been sent. In this paper, we focus only the access delay performance because it is the random event which is hard to control. In the contrary the queue delay can be completely controlled by the system.

The paper is organized as follow. Section 2 presents the descriptions of *UNI* and *UNI+LA* schemes. In Section 3, the delay and throughput performance analysis are described. Section 4 shows the numerical results of these two schemes. Finally, conclusions are given in section 5

II. DESCRIPTION OF UNI AND UNI+LA SCHEMES

A. Description of UNI Scheme

In practical wireless system environment, most systems have a delay between users and base station therefore users will not receive a chance to repeatedly make reservation attempts on consecutive reservation slots in one frame. Under this system condition, the order of request slots becomes irrelevant. Users need not consider each slot in sequence. They may simply select one slot from the available slot for reservation, as shown in Fig. 2. Therefore this technique is called the *Uniform (UNI)* scheme. More detailed description of *UNI* scheme can be found in [4].

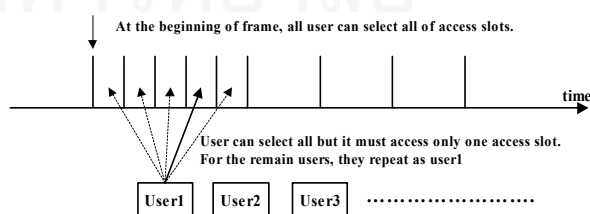


Figure 2 UNI schematic

B. Description of UNI+LA Scheme

One problem associated with the Uniform scheme is that it does not take the number of users into account. Accordingly, its performance can be significantly

deteriorated when the number of users is relatively much higher than the number of available slots. This is because all users will definitely place a reservation in one of the slots, it is very difficult to avoid collisions. For example if only two slots are available for ten active users, it is better for most users not to make a request. Otherwise, collisions will inevitably occur in both slots. As all users will access the slots, the maximum number of successful users is one and this occurs with a very small chance, i.e. nine users access one slot and one of them accesses the other slot. Clearly, the *UNI* scheme is not effective in this situation. To alleviate such shortcomings, it is necessary to find methods to limit the user attempts in accordance with the number of users and available slots. This is achieved by introducing a probability (p) to assist each user for their chance to access the request slots. Users that will not access the request slots in the current reservation periods will wait until the next period; otherwise users will follow exactly the same step as the Uniform scheme. We refer to this scheme as *Uniform+Limited Access (UNI+LA)*. The example of *UNI+LA* scheme is shown in Fig. 3.

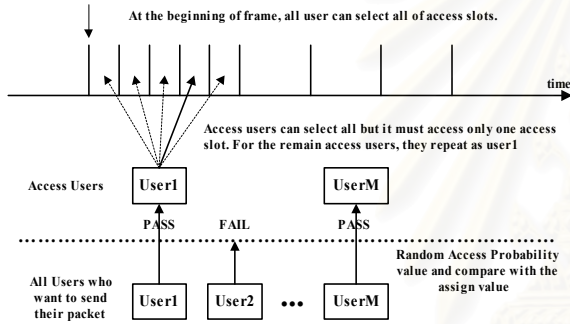


Figure 3 *UNI+LA* schematic

III. PERFORMANCE AND DELAY ANALYSIS

Our performance analysis is based on mathematical analysis. We focus our simulation results in 2 cases, Throughput Performance and Average Delay per packet. We have 2 steps for analyzing the complete system performance, single-frame and multiple-frame performance evaluation. In single-frame, the system throughput and average delay can be derived from the successful access probability of all events to get the complete solution.

Let us first define the following variables which are to be used correspondingly in the mathematical analysis:

$P_{UNI}[k|M,N]$ = the success probability that there are k successful users given that there are M users with N reservation slots per frame, for *UNI* system.

$T_{UNI}[M,N]$ = the throughput of *UNI* system that has M users with N reservation slots per frame.

$P_{UNI+LA}[k|M,N,p]$ = the success probability system that there are k successful users given that there are M users with access probability p and N reservation slots per frame, for *UNI+LA* system.

$T_{UNI+LA}[M,N,p]$ = the throughput of *UNI+LA* system that has M users with N reservation slot per frame.

$P_{method}[k|N,M,f]$ = the success probability of any method system that k successful users of M users with access probability p , N reservation slots and f frames.

$T_{method}[M,N,f]$ = the throughput of any method system that has M users with N reservation slots and f frames.

$D_{method}[M,N,f]$ = the throughput of any method system that has M users with N reservation slot and f frame.

M = Total number of users in the system.

k = The number of successful request users per frame.

N = The number of reservation slots per frame (*RSF*).

p = Access Probability.

A. Evaluation of *UNI* Scheme for single-frame case

Success Probability Function can be derived as in Eq. (1),

$$P_{UNI}[k|M,N] = b[M,0,1/N]P_{UNI}[k|M,N-1] + b[M,1,1/N]P_{UNI}[k-1|M-1,N-1] + \sum_{i=2}^M (b[M,i,1/N]P_{UNI}[k|M-i,N-1]) \quad (1)$$

Where Binomial Probability is defined as follows,

$$b[m,i,x] = \binom{m}{i} x^i (1-x)^{m-i} \quad (2)$$

and with the boundary condition defined as follows:

$$P_{UNI}[k|M,N] = \begin{cases} 1 & \text{if } k < 0, M \geq 0, N \geq 0 \\ 1 & \text{if } k = 0, M \geq 0, N = 0 \\ 0 & \text{if } k > 0, M \geq 0, N = 0 \\ 1 & \text{if } k = 0, M = 0, N = 1 \\ 0 & \text{if } k = 0, M = 1, N = 1 \\ 1 & \text{if } k = 1, M = 1, N = 1 \\ 1 & \text{if } k = 0, M \geq 2, N = 1 \\ 0 & \text{if } k > 0, M \geq 2, N = 1 \\ 1 & \text{if } k = 0, M = 0, N \geq 2 \\ 0 & \text{if } k = 0, M = 1, N \geq 2 \\ 1 & \text{if } k = 1, M = 1, N \geq 2 \end{cases}$$

The throughput of *UNI* is shown in Eq. (3):

$$T_{UNI}[M,N] = \sum_{j=0}^M (j \times P_{UNI}[j|M,N]) \quad (3)$$

Delay of *UNI* is shown in Eq. (4):

$$D_{UNI} = \frac{n+1}{2} \quad (4)$$

B. Evaluation of *UNI+LA* Scheme for single-frame case

Success Probability Function can be derived as in Eq. (5),

$$P_{UNI+LA}[k|M,N,p] = \sum_{j=0}^M (b[M,j,p]P_{UNI}[k|j,N]) \quad (5)$$

The throughput of *UNI* is shown in Eq. (6):

$$T_{UNI+LA}[M,N,p] = \sum_{j=0}^M (j \times P_{UNI+LA}[j|M,N,p]) \quad (6)$$

Delay of *UNI* is shown in Eq. (7):

$$D_{UNI+LA} = \frac{n+1}{2} \quad (7)$$

The value of p certainly plays an important role in the system performance and we will now illustrate how the optimal value of p can be analytically derived.

$$\frac{\partial(T_{UNI+LA}[M,N,p])}{\partial p} = 0 \quad (8)$$

From equation (8) of the *UNI+LA* scheme, we can calculate the optimal probability that gives maximum throughput as shown in Fig. 4.

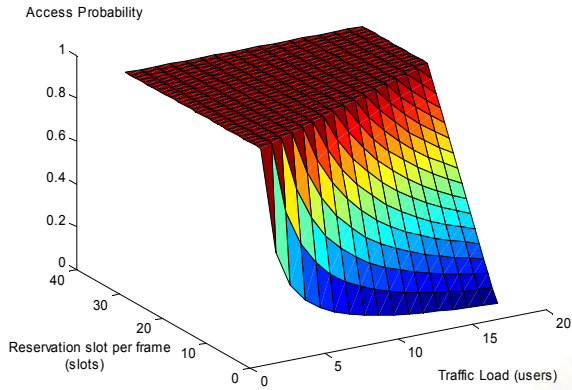


Figure 4 Optimal access probability vs. the *RSF* and the traffic load for *UNI+LA* scheme.

Fig. 4 shows the optimal access probability for various traffic load and *RSF*. We can see that the optimal probability will reach 1 when the number of request slots in the system is not greater than or equal to the number of users. In addition, the probability will lower than one if the traffic load exceeds the number of request slots.

C. Evaluation of *UNI* and *UNI+LA* Schemes for multiple-frame case

Success Probability Function can be derived as in Eq. (9),

$$P[k | m, N, f] = \sum_{k_f} \sum_{k_{f-1}} \dots \sum_{k_2} \sum_{k_1} \prod_{i=1}^f P_{method}[k_i | m_i, N] \quad (9)$$

Where Binomial Probability is defined as follows,

$$\begin{aligned} k_1 &= [0, k] \\ k_2 &= [0, k - k_1] \\ k_3 &= [0, k - k_1 - k_2] \\ &\vdots \\ k_f &= [0, k - k_1 - k_2 - \dots - k_{f-2} - k_{f-1}] \\ m_1 &= m \\ m_2 &= m - k_1 \\ m_3 &= m - k_1 - k_2 \\ &\vdots \\ m_f &= m - k_1 - k_2 - \dots - k_{f-2} - k_{f-1} \end{aligned}$$

The throughput of *frame f* is shown in Eq. (10):

$$T_{method}[M, N, f] = \sum_{k=0}^M (k \times P_{method}[k | M, N, f]) \quad (10)$$

Delay of *frame f* is shown in Eq. (11):

$$D_{method}[m, n, f] = \frac{T_{method}[m, n, f-1] \times D_{method}[m, n, f-1]}{T_{method}[m, n, f]} + \frac{(2f-1)n+1}{2} \times \frac{T_{method}[m, n, f] - T_{method}[m, n, f-1]}{T_{method}[m, n, f]} \quad (11)$$

IV. NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSIONS

The performance of *UNI* and *UNI+LA* scheme has been evaluated through numerical calculation for all of the equations described in section 3. The simulation model is divided into 2 conditions. The first condition focuses on the system performance when the number of frames and reservation slots are varied. For the second condition, the system throughput is constrained to be greater than 99.99% of the traffic load. The parameter that affects the delay performance are discussed in the context.

A. *UNI* Scheme

1) Performance of *UNI* Scheme in condition I

Fig. 5 shows the relationship between the number of available frames and the average delay per packet at different number of slots per frame. It is important to note that the delay is averaged only among successful users. As we can see from this figure, the delay increases with the increment of the number of frames. However, after increasing the number of frames up to a certain value, the delay will be constant. The delay increased is a result from some users that still do not succeed in the reservation in the early frame. In addition, Fig. 6 clearly shows that the delay increases in accordance with the number of successful users. On the contrary, it can be seen that when the number of slot per frame are equal to 2 and 4, the higher number of frames, the higher delay. This is because the lower number of slot per frame reduces the chance of success in the reservation. Therefore, users have to stay for a long time before succeeding in the reservation. In addition, it also can be seen from the Fig. 6 that the increasing rate of the throughput is very low especially when the number of slot per frame is equals to 2. Since, the users have a lower chance to succeed in the reservation

From these results, we can summarize that a suitable value of *RSF* that gives the lowest delay of the system is the tradeoff between 2 events when changing the number of *RSF*, i.e. if we increase the value of *RSF*, it leads to the increment of delay in each frame but the frame number for desired throughput is decreased.

2) Performance of *UNI* Scheme in condition II

Fig. 7 illustrates the relationship between the delay and the frame numbers which guarantee more than 99.99% system throughput of the offered load at various traffic load conditions (4, 8 and 16 users). Firstly, the delay decreases with the increasing of the number of *RSF*. On the contrary, if the value of *RSF* is increased to exceed the suitable value, the delay will be increased. It is important to note that, at each number of users, there will be a suitable value of *RSF* which gives the lowest delay. In addition, the appropriate value of *RSF* tends to increase with the increase of the number of users in the system.

The numerical results in the Fig. 8 confirm that the increase in *RSF* will lower the number of frames to meet the desired throughput. In addition, we observe that the number of frames will be constant at intervals and the best value in each period is the first value of *RSF* that make the number of frame constant. At the same number

of frame, the increment in the RSF will increase the delay in each frame.

B. UNI+LA Scheme

1) Performance of UNI+LA Technique in condition I

Fig. 9 shows the relationship between the average delay per packet and the value of RSF of $UNI+LA$ scheme using fixed and optimal access probabilities. We notice that the delay of the system using the optimal access probability is the lowest one compared to other systems in all values of traffic load. This is because the system can limit the number of accessing users to the appropriate value in each frame. Conversely, the system with fixed access probability can give the good performance only at a specific value of traffic load. For example, the setting of low access probability yields the good performance when the value of RSF is low, since the system has to limit the higher number of accessing users because of less value of RSF . In addition, if the value of RSF increases, the system with low access probability will have the higher delay. This is because users have to wait for a long time before accessing to the channel even though there are a lot of idle slots.

In later discussions, the optimal access probability is used to obtain the numerical results shown in Figs. 10-12. Since it gives the lowest delay in all values of traffic load.

Using the optimal access probability, the delay of $UNI+LA$ scheme is similar to the delay of UNI scheme as previously shown in Fig. 5 and 6. Thus, the results of $UNI+LA$ scheme are not shown. Instead, we discuss the comparison between UNI and $UNI+LA$ using optimal access probability as illustrated in Fig. 10. It is clear that the $UNI+LA$ scheme gives higher performance than that of the UNI in all conditions especially at low value of RSF . The performance of these two schemes will be less differentiated at the higher values of RSF . Finally, there will be no differences when the number of users equal to the RSF value as the results from these two schemes is identical.

2) Performance of UNI+LA Scheme in condition II

The results from Fig.11 and 12 show that the delay of $UNI+LA$ scheme is lower when decreasing the number of RSF . This is due to the same reason shown as described in the previous section. In addition, we can see that the delay and number of frames which are needed in order to satisfy the desired requirement are lower than that of UNI scheme.

V. CONCLUSIONS

This paper proposes the mathematical analysis of the new channel reservation schemes namely UNI and $UNI+LA$. The numerical results show that RSF is the important parameter to justify the performance of the system in terms of delay and throughput. The higher value of RSF leads to the higher chance of idle. On the contrary, the lower value of RSF gives higher probability of collisions. In addition, the appropriate value of RSF is the parameter which gives the highest slot efficiency. Therefore, the best value of RSF suitable for multiple frames depends on the tradeoff between 2 events, the high traffic loads compared to RSF at the early frames and the low traffic loads compared to RSF at the end of frames. This is because the traffic loads changes with the

increment of the number of frame. On the contrary, the suitable RSF for $UNI+LA$ scheme is equal to 1 slot/frame because this scheme is use optimal access probability to avoid the chance of collision at high traffic load. Therefore, the most significant parameter in this system is the number of idle slots in each frame. Finally, the paper also analyzes the performance of the systems in terms of throughput and delay from other parameters such as RSF and access probability.

ACKNOWLEDGEMENT

This work is supported in part by Chulalongkorn university.

REFERENCES

- [1] H.Peyravi, "Medium access control protocols performance in satellite communications," *IEEE Communication Magazine*, vol.373, pp. 62-71.
- [2] Andrew S. Tanenbaum, "Computer Networks", 3rd Edition, Prentice-Hall International, Inc., 1996.
- [3] D. Bertsekas and R. Gallager,"Data Network", Second Edition, Prentice Hall.
- [4] Sivamok, N., "New channel reservation techniques for media access control protocol in high bit-rate wireless communication systems," *IEEE Proc. of Globecom*," vol. 6 , pp. 3558-3562.
- [5] Charoenpanitkit, A., "An analysis of a new access control technique for channel request in wireless communications," *IEEE Proc. of ISCAS*, vol. 2, pp. 333-336.

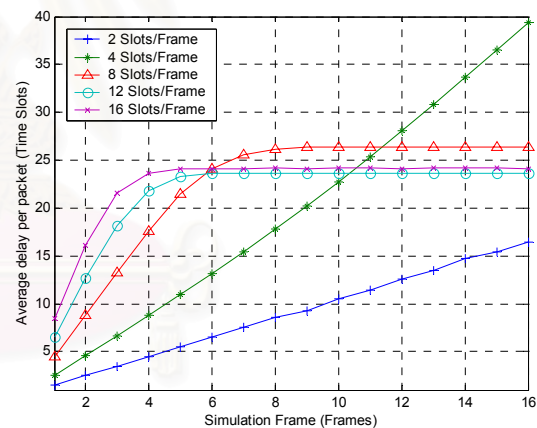


Figure 5 The average delay per packet (Time Slot) vs. the frame number in UNI system at 16 users.

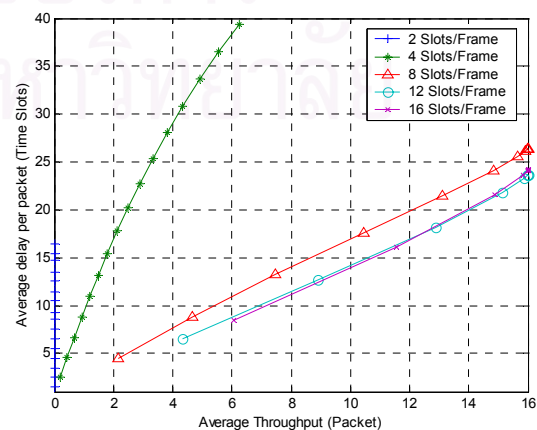


Figure 6 The average delay per packet (Time Slot) vs. the average throughput in UNI system at 16 users

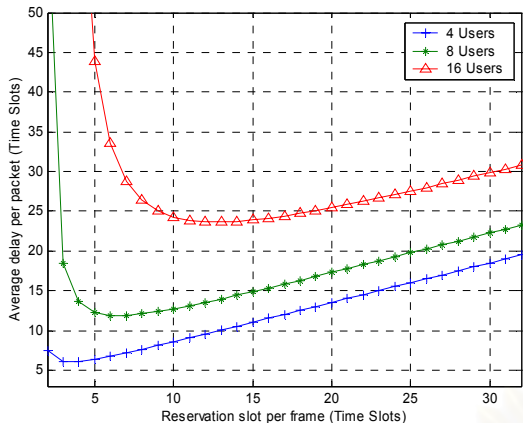


Figure 7 The average delay per packet (Time Slot) vs. the *RSF* in UNI system at the 99.99% successful users.

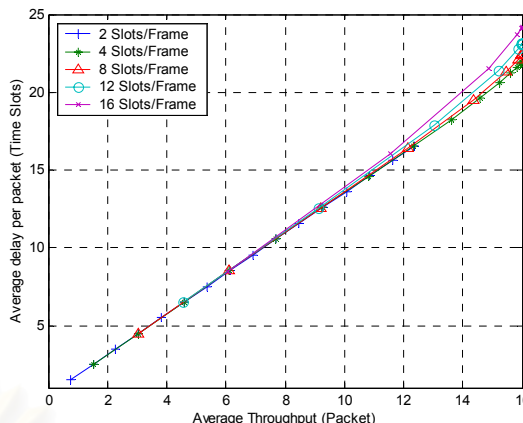


Figure 10 The average delay per packet (Time Slot) vs. the average throughput in UNI+LA system at 16 users

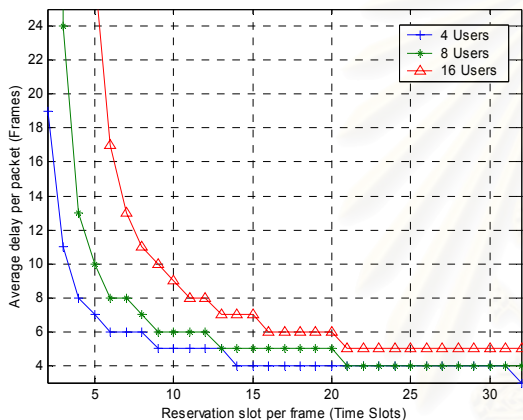


Figure 8 The average delay per packet (Frame) vs. the *RSF* in UNI system at the 99.99% successful users.

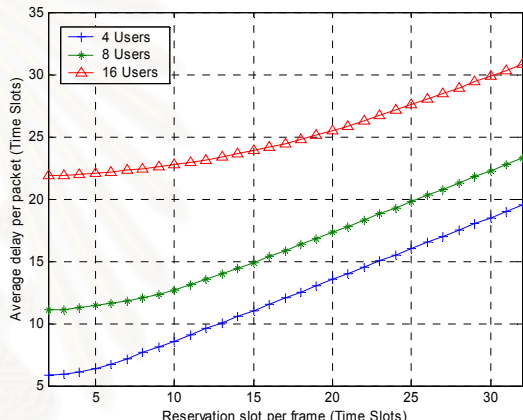


Figure 11 The average delay per packet (Time Slot) vs. the *RSF* in UNI+LA with optimal access probability system at the 99.99% successful users.

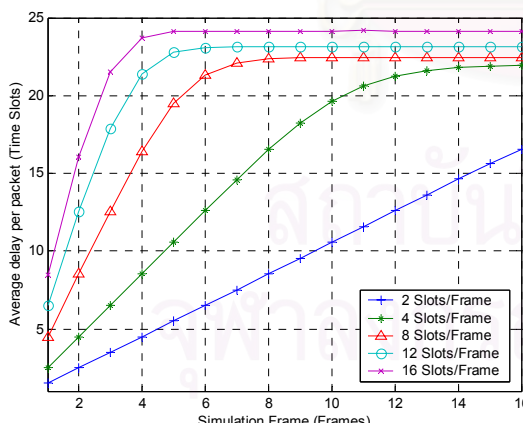


Figure 9 The average delay per packet (Time Slot) vs. the frame number in UNI+LA system at 16 users.

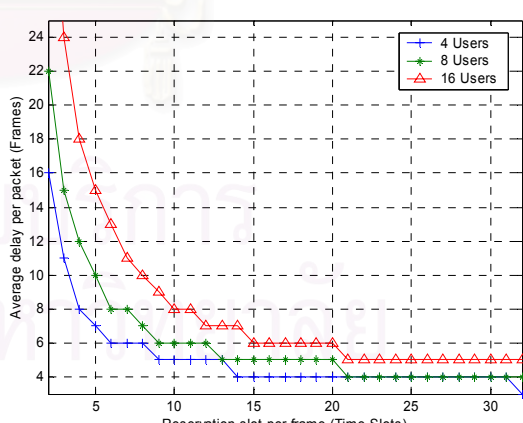


Figure 12 The average delay per packet (Frame) vs. the *RSF* in UNI+LA with optimal access probability system at the 99.99% successful users.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอติพงศ์ สุริยา เกิดเมื่อวันที่ 8 มิถุนายน พ.ศ. 2522 ที่อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2543 จากนั้นได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย