

การจัดสรรแบนด์วิดท์จากปลายถึงปลายอย่างทัดเทียมโดยใช้การควบคุมอัตราอย่างชัดเจนควบคู่  
กับโพรโทคอลสนับรูปร่างใหม่ในโครงข่าย TCP/IP ไร้สาย



นายวัฒนา เกษรวิศมี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2892-8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

END-TO-END FAIR BANDWIDTH ALLOCATION USING EXPLICIT RATE CONTROL WITH  
A NEW SNOOP PROTOCOL IN TCP/IP WIRELESS NETWORK

Mr. Wattana Keyoonratsami

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005


ISBN 974-53-2892-8

481789

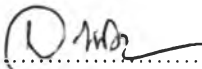
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดสรรแบนด์วิดท์จากปลายถึงปลายอย่างหัดเทียมโดยใช้การควบคุมอัตราอย่างชัดเจนควบคู่กับโพรโทคอลสนูปรูปแบบใหม่ในโครงข่าย TCP/IPไร้สาย
โดย	นายวัฒนา เกยูรศรี
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญจนกร วุฒิสิทธิกุลกิจ

---


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

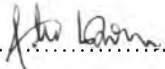
  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัฒน์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วาทิต เบญจพลกุล)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญจนกร วุฒิสิทธิกุลกิจ)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(อาจารย์ ดร. ศักดิ์ เสกขุนทด)

  
..... กรรมการ  
(อาจารย์ สุวิทย์ นาคพิระยุทธ)

วัฒนา เกียรติศักดิ์ : การจัดสรรแบนด์วิดท์จากปลายถึงปลายอย่างทัดเทียมโดยใช้การควบคุมอัตราอย่างชัดเจนควบคู่กับโพรโทคอลสนูปรูปแบบใหม่ในโครงข่าย TCP/IP ไร้สาย (END-TO-END FAIR BANDWIDTH ALLOCATION USING EXPLICIT RATE CONTROL WITH A NEW SNOOP PROTOCOL IN TCP/IP WIRELESS NETWORK) อ.ที่ปรึกษา: รศ.ดร. ลัญฉกร วุฒิสัทธาธิกุลกิจ, 109 หน้า. ISBN 974-53-2892-8.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการควบคุมความแออัดของโครงข่าย TCP/IP โดยอาศัยการร้องขออัตราการส่งจากผู้ใช้งานต้นทางเพื่อให้เราเตอร์ระหว่างทางรับทราบและสามารถจัดสรรอัตราการส่งที่เหมาะสมกับสภาพของความแออัดและจำนวนผู้ใช้ในขณะนั้น เพื่อให้การจัดสรรอัตราการส่งจากปลายถึงปลายของผู้ใช้แต่ละโพล์ทำได้อย่างมีความเท่าเทียมกัน ทั้งในกรณีที่มีช่องสัญญาณแบบใช้สายและแบบไร้สาย วิธีการที่เสนอนี้อาศัยกลไกการบ่อนกสืบข้อมูลเกี่ยวกับขนาดของแบนด์วิดท์และค่าประวิงเวลาจริงในการเข้าถึงข้อมูลผ่านทางแพ็กเก็ตข้อมูลและแพ็กเก็ตตอบรับเพื่อให้แหล่งกำเนิดข้อมูลแต่ละแหล่งสามารถปรับอัตราการส่งของตนให้เหมาะสมและสอดคล้องกับสภาพความแออัดของโครงข่ายในขณะนั้น โดยหลักการแล้ว ถ้าหากปรับอัตราการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลด้วยขนาดที่เหมาะสมแล้วจะสามารถช่วยลดปริมาณแพ็กเก็ตที่สูญหายเนื่องจากความแออัด เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ของลิงก์โดยเฉพาะในบริเวณคอขวด และยังสามารถควบคุมให้แหล่งกำเนิดมีโอกาสส่งแพ็กเก็ตข้อมูลได้อย่างเท่าเทียมกัน ในกรณีที่การเชื่อมต่อช่วงสุดท้ายเป็นการส่งผ่านแพ็กเก็ตข้อมูลบนช่องสัญญาณแบบไร้สายได้นำเสนอวิธีการที่เรียกว่าโพรโทคอลสนูปรูปแบบใหม่สำหรับแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นเนื่องจากคุณลักษณะเฉพาะของการสูญหายในช่องสัญญาณไร้สายที่จำลองด้วยแบบจำลองมาร์คอฟสองสถานะแบบต่อเนื่องทางเวลา

จากผลการทดสอบสมรรถนะของโครงข่ายโดยใช้โพรโทคอลเฉพาะจำนวน 3 รูปแบบที่แตกต่างกันพบว่าวิธีที่เสนอมารถให้ประสิทธิภาพการส่งข้อมูลในบริเวณคอขวดได้สูงถึงเกือบ 100% ซึ่งสูงกว่าค่าที่ได้จากโพรโทคอล TCP/IP ที่ใช้ในปัจจุบันภายใต้การทดสอบทุกสภาวะ ในกรณีที่มีช่องสัญญาณไร้สายพบว่าวิธีที่นำเสนอให้อัตราการส่งที่สูงกว่าโพรโทคอลสนูปอย่างชัดเจน ในบางกรณีให้ผลที่ดีขึ้นกว่า 160% นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากค่าดัชนีของ Jain วิธีที่เสนอยังสามารถจัดสรรอัตราการส่งให้แก่แหล่งกำเนิดแต่ละแหล่งได้เท่าเทียมกันตามสัดส่วนที่พึงจะได้ แต่อย่างไรก็ตามการปรับปรุงประสิทธิภาพช่องสัญญาณไร้สายของโพรโทคอลสนูปรูปแบบใหม่ต้องการขนาดหน่วยความจำมากกว่าโพรโทคอลเดิม เพราะถูกนำไปใช้สำหรับเก็บข้อมูลที่สูญหายในช่วงของช่องสัญญาณไร้สาย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
 ปีการศึกษา.....2548.....

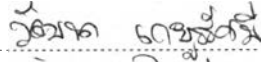
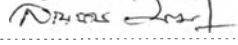
# # 4570528121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: Fairness / Snoop Protocol / TCP/IP/Network Simulator (NS-2)

WATTANA KEYOONRATSAMI : END-TO-END FAIR BANDWIDTH ALLOCATION USING EXPLICIT RATE CONTROL WITH A NEW SNOOP PROTOCOL IN TCP/IP WIRELESS NETWORK: ASSOC. PROF. LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ. Ph.D., 109 pp. ISBN 974-53-2892-8.

This thesis proposes a congestion control of TCP/IP network using information about sending rate from source in order to router allocate knows and provide sending rate suitable depend congestion condition and number of active flow for systems with wired and wireless channels. The proposed technique applies a feedback mechanism via data packets and acknowledgement packets to send explicit information regarding bandwidth and actual propagation delay time so that each information source can adjust its transmission rate in an appropriate manner to suit the present congestion condition. In principle, if packets are transmitted at appropriate rates, the amount of packet loss can be reduced; the efficiency of bandwidth utilization can be improved in particular at the bottleneck parts; fairness among competing sources can also be accomplished. In case where the last hop in the packet transmission path is a wireless link, we propose a new snoop protocol to resolve the problem of packet loss caused by the characteristics of wireless channel which is characterized by a continuous-time two-state Markov error model.

Based on the performance evaluation results using three different network topologies, it is found that the proposed scheme can provide packet transmission across bottleneck link with efficiency at almost 100%, which is higher than the existing TCP/IP protocols for most tested network system configurations. In the case with a wireless link, our proposed technique offers much higher throughput than the snoop protocol. In some cases, the results are improved by 160%. In addition, when applying Jain index for fairness analysis, the proposed technique is capable of allocating bandwidth among sources in a fair and effective fashion. However, to improve the efficiency of wireless channel the new snoop protocol requires larger buffer sizes than the conventional snoop as these buffers are used for caching packets while the wireless channel is severely degraded.

Department.....Electrical Engineering..... Student's signature   
 Field of study.....Electrical Engineering..... Advisor's signature   
 Academic year ..2005..

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะไม่สำเร็จดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร. ศักดิ์ เสกขุนทด ซึ่งทั้งสองท่านได้ให้คำแนะนำ แนวทาง รวมทั้งข้อคิดเห็นต่าง ๆ ในการทำวิจัย ข้าพเจ้าจึงต้องขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ข้าพเจ้าขอขอบคุณสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา นอกจากนี้ขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ รวมทั้งเพื่อน ๆ ทั้งในและนอกห้องปฏิบัติการวิจัยระบบโทรคมนาคม และกรรมวิธีสัญญาณดิจิทัล ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ทั้งในงานวิจัยและนอกรงานวิจัย รวมทั้งความช่วยเหลือและแรงดลใจที่ดีตลอดระยะเวลาการทำวิจัย

ท้ายที่สุดนี้ ข้าพเจ้าต้องขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา และขอบคุณทุก ๆ คนในครอบครัวของข้าพเจ้า ซึ่งคอยให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจเสมอมา ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฅ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	7
1.3 เป้าหมายและขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	7
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	8
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	9
1.6เค้าโครงวิทยานิพนธ์.....	9
2 ความรู้พื้นฐาน.....	10
2.1 ความแออัดในโครงข่าย.....	10
2.2 หลักการทำงานและกรรมวิธีควบคุมความแออัดของ TCP รูปแบบต่าง ๆ.....	12
2.2.1 Additive increase / Multiplicative decrease (AIMD).....	13
2.2.2 การเริ่มต้นอย่างช้าๆ (Slow Start).....	14
2.2.3 ส่งซ้ำอย่างรวดเร็วและการกู้คืนอย่างรวดเร็ว (Fast Retransmit and Fast Recovery).....	16
2.3 รูปแบบของการส่งข้อมูลด้วย TCP ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน.....	19
2.3.1 Tahoe TCP.....	19
2.3.2 Reno TCP.....	20
2.3.3 SACK TCP (Selective Acknowledgment TCP).....	21
2.3.3.1 ออปชัน SACK permitted.....	21
2.3.3.2 ออปชัน SACK.....	21
2.4 การประเมินความเท่าเทียม (Fairness Measure).....	25

## สารบัญ

บทที่	สารบัญ	หน้า
	2.4.1 เทคนิคการประเมินความเท่าเทียมของ Jain (Jain's Fairness)..	25
	2.4.2 เทคนิคการประเมินความเท่าเทียมแบบสูงสุดและต่ำสุด (Max-min Fairness).....	26
2.5	โพรโทคอลสnoop (Snoop Protocol).....	26
	2.5.1 สnoopดาตา (Snoop Data).....	27
	2.5.2 สnoopแอก (Snoop ACK).....	29
3	แบบแผนการควบคุมความแออัดในโครงข่ายที่ได้นำเสนอ.....	32
3.1	หลักการทํางานและวิธีการควบคุม.....	32
	3.1.1 การทํางานในส่วนของเราเตอร์.....	32
	3.1.2 การทํางานในส่วนของผู้ใช้ต้นทางและผู้ใช้ปลายทาง.....	34
3.2	หลักการทํางานของโพรโทคอลสnoopที่เสนอ.....	36
	3.2.1 การทํางานในส่วนของการจัดการแพ็กเก็ตตอบรับเมื่อการสูญหายที่เกิดขึ้นเป็นการสูญหายเนื่องจากช่องสัญญาณไร้สายเท่านั้น.....	36
	3.2.2 การทํางานในส่วนของการจัดการแพ็กเก็ตตอบรับเมื่อการสูญหายที่เกิดขึ้นเป็นการสูญหายเนื่องจากช่องสัญญาณไร้สายรวมกับการสูญหายเนื่องจากความแออัดของโครงข่าย.....	39
4	ผลการจำลองแบบและวิเคราะห์.....	45
4.1	โทโพโลยีที่ใช้จำลองแบบ.....	45
	4.1.1 โทโพโลยีแบบ Dumbell.....	46
	4.1.2 โทโพโลยีแบบ Parking Lot.....	46
	4.1.3 โทโพโลยีแบบ Upstream.....	48
4.2	ผลการจำลองแบบ.....	49
	4.2.1 การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่ใช้โทโพโลยีแบบ Dumbell ในกรณีที่ช่องสัญญาณทั้งหมดเป็นแบบช่องสัญญาณไร้สาย.....	50



## สารบัญ

ณ

บทที่

หน้า

4.2.2	การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่ใช้โทโพโลยีแบบ Parking Lot ในกรณีที่มีช่องสัญญาณทั้งหมดเป็นแบบช่องสัญญาณไร้สาย.....	52
4.2.3	การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่ใช้โทโพโลยีแบบ Upstream ในกรณีที่มีการเริ่มต้นในการส่งข้อมูลพร้อมกันทั้งหมดและช่องสัญญาณทั้งหมดเป็นแบบช่องสัญญาณไร้สาย.....	55
4.2.4	การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่ใช้โทโพโลยีแบบ Dumbbell ในกรณีที่มีช่องสัญญาณสุดท้ายเป็นช่องสัญญาณไร้สายและช่องสัญญาณสถานะเลวมียัตราการสูญหายเท่ากับ 20% และ 40%.....	57
4.2.5	การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่ใช้โทโพโลยีแบบ Parking Lot ในกรณีที่มีช่องสัญญาณสุดท้ายเป็นช่องสัญญาณไร้สายและช่องสัญญาณสถานะเลวมียัตราการสูญหายเท่ากับ 20% และ 40%.....	63
4.2.6	การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่ใช้โทโพโลยีแบบ Upstream ในกรณีที่มีผู้ใช้ทั้งหมดเริ่มต้นในการส่งข้อมูลพร้อมกันและช่องสัญญาณสุดท้ายเป็นช่องสัญญาณไร้สายและช่องสัญญาณสถานะเลวมียัตราการสูญหายเท่ากับ 20% และ 40%.....	69
4.2.7	การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่ใช้โทโพโลยีแบบ Dumbbell ในกรณีที่มีผู้ใช้ทั้งหมดถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มโดยแต่ละกลุ่มมีการเริ่มต้นการส่งข้อมูลในเวลาที่แตกต่างกันและช่องสัญญาณทั้งหมดเป็นแบบช่องสัญญาณไร้สาย.....	77
4.2.8	การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่ใช้โทโพโลยีแบบ Parking Lot ในกรณีที่มีผู้ใช้ทั้งหมดถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มโดยแต่ละกลุ่มมีการเริ่มต้นการส่งข้อมูลในเวลาที่แตกต่างกันและช่องสัญญาณทั้งหมดเป็นแบบช่องสัญญาณไร้สาย.....	79

## สารบัญ

ญ

บทที่		หน้า
4.2.9	การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่ใช้โทโพโลยีแบบ Dumbell ในกรณีที่แหล่งกำเนิดข้อมูลทั้งหมดถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มด้วยเวลาเริ่มต้นในการส่งข้อมูลและมีช่วงเวลาในการส่งข้อมูลแตกต่างกันและช่องสัญญาณสุดท้ายเป็นช่องสัญญาณไร้สาย.....	81
4.2.10	การเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่ใช้โทโพโลยีแบบ Parking Lot ในกรณีที่ใช้ทั้งหมดถูกแบ่งออกเป็นสองกลุ่มด้วยเวลาเริ่มต้นในการส่งข้อมูลและมีช่วงเวลาในการส่งข้อมูลแตกต่างกันและช่องสัญญาณสุดท้ายเป็นช่องสัญญาณไร้สายและช่องสัญญาณสถานะเลื่อมมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20% และ 40%.....	88
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	96
5.1	บทสรุป.....	96
5.2	ข้อเสนอแนะ.....	100
	รายการอ้างอิง.....	101
	ภาคผนวก.....	103
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	109

## สารบัญญัตราสาร

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 2.1	รูปแบบของฟิลด์อปชัน SACK ในกรณีเมื่อเกิดการสูญหายของแพ็กเก็ตลำดับหมายเลขที่ 11.....	23
ตารางที่ 2.2	รูปแบบของฟิลด์อปชัน SACK ในกรณีเมื่อแพ็กเก็ตลำดับหมายเลขที่ 12 14 16 และ 18 สูญหาย.....	24
ตารางที่ 2.3	รูปแบบของฟิลด์อปชัน SACK เมื่อได้รับแพ็กเก็ตตอบรับลำดับหมายเลขที่ 14 โดยที่แพ็กเก็ตลำดับหมายเลขที่ 12 เกิดการสูญหาย.....	24
ตารางที่ 2.4	รูปแบบของฟิลด์อปชัน SACK เมื่อได้รับแพ็กเก็ตตอบรับที่มีลำดับหมายเลขที่ 12 หลังจากที่ได้รับแพ็กเก็ตตอบรับลำดับที่หมายเลข 14 เป็นที่เรียบร้อยแล้ว.....	25
ตารางที่ 4.1	ขนาดทรูพุดของแต่ละโพล์และค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ละรูปแบบด้วยโทโพลีแบบ dumbbell....	51
ตารางที่ 4.2	ขนาดทรูพุดของแต่ละโพล์และค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ละรูปแบบด้วยโทโพลีแบบ Parking Lot..	54
ตารางที่ 4.3	ค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ละรูปแบบด้วยโทโพลีแบบ Dumbell ที่ช่องสัญญาณสถานะเลวมี่อัตราการสูญหายมีค่าเท่า 0.2 และที่อัตราการสูญหายของช่องสัญญาณสถานะดีมีค่าต่าง ๆ.....	56
ตารางที่ 4.4	ค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ละรูปแบบด้วยโทโพลีแบบ Dumbell ที่ช่องสัญญาณสถานะเลวมี่อัตราการสูญหายมีค่าเท่า 0.4 และที่อัตราการสูญหายของช่องสัญญาณสถานะดีมีค่าต่าง ๆ.....	59
ตารางที่ 4.5	ค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ละรูปแบบด้วยโทโพลีแบบ Parking Lot ที่ช่องสัญญาณสถานะเลวมี่อัตราการสูญหายมีค่าเท่า 0.2 และที่อัตราการสูญหายของช่องสัญญาณสถานะดีมีค่าต่าง ๆ.....	61

## สารบัญญัตราสาร

๘

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 4.6	ค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ Parking Lot ที่ช่องสัญญาณสถานะเลวมี่ อัตราการสูญหายมีค่าเท่า 0.2 และที่อัตราการสูญหายของช่องสัญญาณ สถานะดีมีค่าต่าง ๆ.....	65
ตารางที่ 4.7	ขนาดทรูพุดของแต่ละโพล์และค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียม ของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ dumbbell.....	67
ตารางที่ 4.8	ขนาดทรูพุดของแต่ละโพล์และค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียม ของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ Parking Lot..	71
ตารางที่ 4.9	ค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ Dumbell ที่ช่องสัญญาณสถานะเลวมี่อัตรา การสูญหายมีค่าเท่ากับ 20% และที่อัตราการสูญหายของช่องสัญญาณ สถานะดีค่าต่าง ๆ ของผู้ใช้ในกลุ่มที่หนึ่ง.....	71
ตารางที่ 4.10	ค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ Dumbell ที่ช่องสัญญาณสถานะเลวมี่อัตรา การสูญหายมีค่าเท่ากับ 20% และที่อัตราการสูญหายของช่องสัญญาณ สถานะดีค่าต่าง ๆ ของผู้ใช้ในกลุ่มที่สอง.....	74
ตารางที่ 4.11	ค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ Dumbell ที่ช่องสัญญาณสถานะเลวมี่อัตรา การสูญหายมีค่าเท่ากับ 40% และที่อัตราการสูญหายของช่องสัญญาณ สถานะดีค่าต่าง ๆ ของผู้ใช้ในกลุ่มที่หนึ่ง.....	74
ตารางที่ 4.12	ค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ Dumbell ที่ช่องสัญญาณสถานะเลวมี่อัตรา การสูญหายมีค่าเท่ากับ 40% และที่อัตราการสูญหายของช่องสัญญาณ สถานะดีค่าต่าง ๆ ของผู้ใช้ในกลุ่มที่สอง.....	
ตารางที่ 4.13	ค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ Parking Lot ที่ช่องสัญญาณสถานะเลวมี่ อัตราการสูญหายมีค่าเท่ากับ 20% และที่อัตราการสูญหายของ ช่องสัญญาณสถานะดีค่าต่าง ๆ ของผู้ใช้ในกลุ่มที่หนึ่ง.....	80

## สารบัญตาราง

๕

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 4.14	ค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ Parking Lot ที่ช่องสัญญาณสถานะเลวมี อัตราการสูญหายมีค่าเท่ากับ 20% และที่อัตราการสูญหายของ ช่องสัญญาณสถานะดีค่าต่าง ๆ ของผู้ใช้ในกลุ่มที่สอง.....	83
ตารางที่ 4.15	ค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ Parking Lot ที่ช่องสัญญาณสถานะเลวมี อัตราการสูญหายมีค่าเท่ากับ 40% และที่อัตราการสูญหายของ ช่องสัญญาณสถานะดีค่าต่าง ๆ ของผู้ใช้ในกลุ่มที่หนึ่ง.....	83
ตารางที่ 4.16	ค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ Parking Lot ที่ช่องสัญญาณสถานะเลวมี อัตราการสูญหายมีค่าเท่ากับ 40% และที่อัตราการสูญหายของ ช่องสัญญาณสถานะดีค่าต่าง ๆ ของผู้ใช้ในกลุ่มที่สอง.....	85
ตารางที่ 4.17	ขนาดทรูพุดของแต่ละโพล์และค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียม ของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ Upstream....	86
ตารางที่ 4.18	ค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ Upstream ที่ช่องสัญญาณสถานะเลวมี อัตราการสูญหายมีค่าเท่ากับ 20% และที่อัตราการสูญหายของ ช่องสัญญาณสถานะดีค่าต่าง ๆ ของผู้ใช้ในกลุ่มที่หนึ่ง.....	90
ตารางที่ 4.19	ค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ Upstream ที่ช่องสัญญาณสถานะเลวมี อัตราการสูญหายมีค่าเท่ากับ 20% และที่อัตราการสูญหายของ ช่องสัญญาณสถานะดีค่าต่าง ๆ ของผู้ใช้ในกลุ่มที่สอง.....	91
ตารางที่ 4.20	ค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ Upstream ที่ช่องสัญญาณสถานะเลวมี อัตราการสูญหายมีค่าเท่ากับ 40% และที่อัตราการสูญหายของ ช่องสัญญาณสถานะดีค่าต่าง ๆ ของผู้ใช้ในกลุ่มที่หนึ่ง.....	93

## สารบัญตาราง

ท

ตารางที่		หน้า
ตารางที่ 4.21	ค่าดัชนีของ Jain ในการวัดความเท่าเทียมของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ Upstream ที่ช่องสัญญาณสถานะเลวมี อัตราการสูญหายมีค่าเท่ากับ 40% และที่อัตราการสูญหายของ ช่องสัญญาณสถานะดีค่าต่าง ๆ ของผู้ใช้ในกลุ่มที่สอง.....	93

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
รูปที่ 1.1	การทำงานของวิธีการจัดสรรลำดับแบบแถวคอย.....	2
รูปที่ 1.2	แนวความคิดพื้นฐานของ GWA.....	5
รูปที่ 2.1	ความสัมพันธ์ระหว่างทฤษฎีและโหนด (อัตราการส่งข้อมูล).....	11
รูปที่ 2.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประวิงเวลาจริงในการถึงข้อมูลและโหนด.....	12
รูปที่ 2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานและโหนด.....	12
รูปที่ 2.4	รูปแบบการเพิ่มขึ้นและลดลงในการส่งข้อมูลด้วย AIMD.....	14
รูปที่ 2.5	รูปแบบการเพิ่มขึ้นของขนาดหน้าต่างความแออัดด้วยเทคนิคการเริ่มต้นอย่างช้า ๆ.....	15
รูปที่ 2.6	ลักษณะการส่งข้อมูลด้วยเทคนิคการเริ่มต้นอย่างช้า ๆ.....	16
รูปที่ 2.7	การส่งแพ็กเก็ตด้วยเทคนิคการส่งช้าอย่างรวดเร็ว.....	18
รูปที่ 2.8	รูปแบบการส่งข้อมูลด้วย Tahoe TCP.....	19
รูปที่ 2.9	รูปแบบการส่งข้อมูลด้วย Reno TCP.....	20
รูปที่ 2.10	รูปแบบของออปชัน SACK permitted ที่บรรจุอยู่ในฟิลด์ออปชัน.....	21
รูปที่ 2.11	รูปแบบของออปชัน SACK บรรจุอยู่ในฟิลด์ออปชัน.....	22
รูปที่ 2.12	ขั้นตอนการทำงานของสลับตาตา.....	28
รูปที่ 2.13	ขั้นตอนการทำงานของสลับเอด.....	31
รูปที่ 3.1	โครงสร้างการทำงานของ การควบคุมความแออัดและการจัดสรรแบนด์วิดท์จากปลายถึงปลาย.....	32
รูปที่ 3.2	ตัวอย่างลักษณะการทำงานในส่วนของ การจัดการแพ็กเก็ตตอบรับเมื่อการสูญหายที่เกิดขึ้นเป็นการสูญหายเนื่องจากช่องสัญญาณไร้สายเท่านั้น.....	37
รูปที่ 3.3	ออปชัน SACK ของแพ็กเก็ตตอบรับสำเนาฉบับที่ 1.....	38
รูปที่ 3.4	ออปชัน SACK ของแพ็กเก็ตตอบรับสำเนาฉบับที่ 2.....	38
รูปที่ 3.5	ออปชัน SACK ของแพ็กเก็ตตอบรับสำเนาฉบับที่ 3.....	38
รูปที่ 3.6	ตัวอย่างลักษณะการทำงานในส่วนของ การจัดการแพ็กเก็ตตอบรับเมื่อการสูญหายเกิดขึ้นเป็นการสูญหายเนื่องจากช่องสัญญาณไร้สายร่วมกับการสูญหายเนื่องจากความแออัดของโครงข่าย.....	41
รูปที่ 3.7	ออปชัน SACK ของแพ็กเก็ตตอบรับสำเนาฉบับที่ 1.....	41
รูปที่ 3.8	ออปชัน SACK ของแพ็กเก็ตตอบรับสำเนาฉบับที่ 2.....	42

## สารบัญรูป

ณ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 3.9	ออปชัน SACK ของแพ็กเก็ตตอบรับสำเนาฉบับที่ 3.....	42
รูปที่ 3.10	ขั้นตอนการทำงานของสล็อตที่นำเสนอ.....	43
รูปที่ 4.1	โทโพลยีแบบ Dumbell.....	46
รูปที่ 4.2	โทโพลยีแบบ Parking Lot.....	47
รูปที่ 4.3	โทโพลยีแบบ Upstream.....	49
รูปที่ 4.4	ค่าทรูพุทของแต่ละโพล์วของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ละรูปแบบด้วยโทโพลยีแบบ dumbbell ในกรณีที่ช่องสัญญาณทั้งหมดเป็นช่องสัญญาณใช้สาย.....	52
รูปที่ 4.5	ค่าทรูพุทของแต่ละโพล์วของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ละรูปแบบด้วยโทโพลยีแบบ Parking Lot ในกรณีที่ช่องสัญญาณทั้งหมดเป็นช่องสัญญาณแบบใช้สาย.....	54
รูปที่ 4.6	อัตราการส่งข้อมูลโดยรวมเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	57
รูปที่ 4.7	อัตราการส่งข้อมูลของแต่ละโพล์วเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	60
รูปที่ 4.8	ค่าเฉลี่ยขนาดบัฟเฟอร์ของสล็อตในกรณีที่สถานะช่องสัญญาณมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20%.....	60
รูปที่ 4.9	อัตราการส่งข้อมูลโดยรวมเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 40% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	61
รูปที่ 4.10	อัตราการส่งข้อมูลของแต่ละโพล์วเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 40% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	62
รูปที่ 4.11	ค่าเฉลี่ยขนาดบัฟเฟอร์ของสล็อตในกรณีที่สถานะช่องสัญญาณมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 40%.....	62
รูปที่ 4.12	อัตราการส่งข้อมูลโดยรวมเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	63
รูปที่ 4.13	อัตราการส่งข้อมูลของแต่ละโพล์วเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	65



สารบัญรูป

ด

รูปที่	หน้า	
รูปที่ 4.14	ค่าเฉลี่ยขนาดบัฟเฟอร์ของสнопในกรณีที่สถานะช่องสัญญาณมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20%.....	66
รูปที่ 4.15	อัตราการส่งข้อมูลโดยรวมเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 40% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	66
รูปที่ 4.16	อัตราการส่งข้อมูลของแต่ละโพล์เมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 40% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	67
รูปที่ 4.17	ค่าเฉลี่ยขนาดบัฟเฟอร์ของสнопในกรณีที่สถานะช่องสัญญาณมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 40%.....	68
รูปที่ 4.18	ค่าทฤษฎีของแต่ละโพล์ของของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ dumbbell ในกรณีที่ช่องสัญญาณทั้งหมดเป็นช่องสัญญาณใช้สาย.....	68
รูปที่ 4.19	ค่าทฤษฎีของแต่ละโพล์ของของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ dumbbell ในกรณีที่ช่องสัญญาณทั้งหมดเป็นช่องสัญญาณใช้สาย.....	72
รูปที่ 4.20	อัตราการส่งข้อมูลโดยรวมเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	72
รูปที่ 4.21	อัตราการส่งข้อมูลของแต่ละโพล์เมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	73
รูปที่ 4.22	ค่าเฉลี่ยขนาดบัฟเฟอร์ของสнопในกรณีที่สถานะช่องสัญญาณมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20%.....	73
รูปที่ 4.23	อัตราการส่งข้อมูลโดยรวมเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 40% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	75
รูปที่ 4.24	อัตราการส่งข้อมูลของแต่ละโพล์เมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 40% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	75
รูปที่ 4.25	ค่าเฉลี่ยขนาดบัฟเฟอร์ของสнопในกรณีที่สถานะช่องสัญญาณมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 40%.....	76
รูปที่ 4.26	อัตราการส่งข้อมูลโดยรวมเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	76

## สารบัญรูป

ด

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4.27	อัตราการส่งข้อมูลของแต่ละโพล์วเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	78
รูปที่ 4.28	ค่าเฉลี่ยขนาดบัฟเฟอร์ของสнопในกรณีที่สถานะช่องสัญญาณมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20%.....	80
รูปที่ 4.29	อัตราการส่งข้อมูลโดยรวมเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 40% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	84
รูปที่ 4.30	อัตราการส่งข้อมูลของแต่ละโพล์วเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 40% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	84
รูปที่ 4.31	ค่าเฉลี่ยขนาดบัฟเฟอร์ของสнопในกรณีที่สถานะช่องสัญญาณมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 40%.....	85
รูปที่ 4.32	ค่าทฤษฎีของแต่ละโพล์วของการส่งข้อมูลด้วย TCP แต่ละรูปแบบด้วยโทโพโลยีแบบ Upstream ในกรณีที่ช่องสัญญาณทั้งหมดเป็นช่องสัญญาณใช้สาย.....	86
รูปที่ 4.33	อัตราการส่งข้อมูลโดยรวมเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	87
รูปที่ 4.34	อัตราการส่งข้อมูลของแต่ละโพล์วเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	87
รูปที่ 4.35	ค่าเฉลี่ยขนาดบัฟเฟอร์ของสнопในกรณีที่สถานะช่องสัญญาณมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20% ในส่วนของช่องสัญญาณสุดท้ายที่จัดเก็บแพ็กเก็ตข้อมูลของผู้ใช้กลุ่มที่ 1.....	91
รูปที่ 4.36	ค่าเฉลี่ยขนาดบัฟเฟอร์ของสнопในกรณีที่สถานะช่องสัญญาณมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 20% ในส่วนของช่องสัญญาณสุดท้ายที่จัดเก็บแพ็กเก็ตข้อมูลของผู้ใช้กลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3.....	92
รูปที่ 4.37	อัตราการส่งข้อมูลโดยรวมเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 40% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	92
รูปที่ 4.38	อัตราการส่งข้อมูลของแต่ละโพล์วเมื่อสถานะช่องสัญญาณเลวมีอัตราการสูญหายเท่ากับ 40% และที่สถานะช่องสัญญาณดีมีอัตราการสูญหายต่างกัน.....	94

## สารบัญรูป

ถ

รูปที่		หน้า
รูปที่ 4.39	ค่าเฉลี่ยขนาดบัพเฟอร์ของสนูปในกรณีที่สถานะช่องสัญญาณมีอัตราการสูญเสียเท่ากับ 40% ในส่วนของช่องสัญญาณสุดท้ายที่จัดเก็บแพ็กเก็ตข้อมูลของผู้ใช้กลุ่มที่ 1.....	94
รูปที่ 4.40	ค่าเฉลี่ยขนาดบัพเฟอร์ของสนูปในกรณีที่สถานะช่องสัญญาณมีอัตราการสูญเสียเท่ากับ 40% ในส่วนของช่องสัญญาณสุดท้ายที่จัดเก็บแพ็กเก็ตข้อมูลของผู้ใช้กลุ่มที่ 2 และผู้ใช้ในกลุ่มที่ 3.....	95