

การวิเคราะห์วิธีควบคุมความคับคั่งสำหรับโครงข่าย TCP/IP ผ่านดาวเทียม



นายชูพงษ์ ชลพนารักษ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

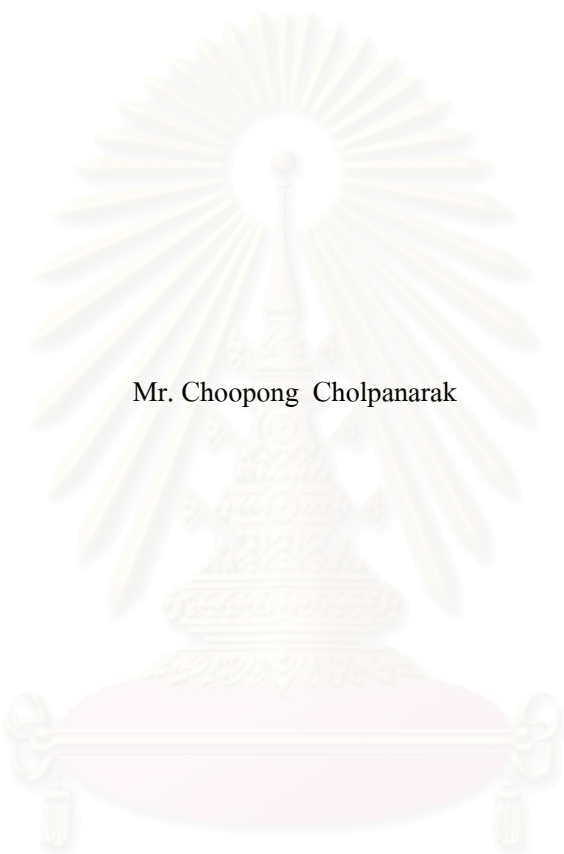
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-3837-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ANALYSIS OF CONGESTION CONTROL SCHEME FOR SATELLITE TCP/IP NETWORKS



Mr. Choopong Cholpanarak

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 2003

ISBN 974-17-3837-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์วิธีควบคุมความคับคั่งสำหรับโครงข่าย TCP/IP ผ่านดาวเทียม
โดย	นายชุงษ์ ชลพนารักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ทิมพุฒิ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ทิมพุฒิ)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ถัยนกร วุฒิสัทธาภิบาลกิจ)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.เชาวน์ดิศ อัสวกุล)

สภามหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ชูพงษ์ ชลพนารักษ์ : การวิเคราะห์วิธีควบคุมความคับคั่งสำหรับโครงข่าย TCP/IP ผ่านดาวเทียม (ANALYSIS OF CONGESTION CONTROL SCHEME FOR SATELLITE TCP/IP NETWORKS) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ประสิทธิ์ ทิฆมพุด, 69 หน้า. ISBN 974-17-3837-4.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์วิธีการควบคุมความคับคั่งโครงข่าย TCP/IP ผ่านดาวเทียม โดยการวิเคราะห์แยกทีละส่วน ในส่วนแรกช่วงเริ่มต้นการเชื่อมโยงระบบจะใช้ Dummy Segments ทำให้เพิ่มขนาดการส่งอย่างรวดเร็ว ส่วนที่สองเป็นช่วงที่หลังจากการเชื่อมโยงระบบแล้ว จะเป็นช่วงหลีกเลี่ยงการเกิดความคับคั่ง จะใช้วิธีการส่งสัญญาณสถานะความคับคั่งของระบบทำให้เครื่องส่งและเครื่องรับรับรู้สถานะความคับคั่งของระบบ เพื่อที่สามารถปรับอัตราและขนาดการส่ง ทำให้ลดความคับคั่ง ความผิดพลาดในการเชื่อมโยงระบบและอัตราข้อมูลสูญหาย ในส่วนที่สามเป็นการแก้ปัญหาเมื่อมีข้อมูลสูญหาย ทำให้มีการส่งข้อมูลเดิมอีกครั้งและใช้ Dummy Segments ทำให้เพิ่มขนาดการส่งอย่างรวดเร็ว ทำให้หลีกเลี่ยงการเชื่อมโยงระบบใหม่อีกครั้ง อัลกอริทึมที่ใช้เรียกว่า TCP-Peach# ประกอบด้วย Sudden Start อัลกอริทึม Congestion Avoidance อัลกอริทึม และ Fast Retransmit & Rapid Recovery อัลกอริทึม โดยจะนำไปใช้กับการจำลองระบบการโดยใช้เครื่องส่งและเครื่องรับอย่างละ 10 เครื่องส่งผ่านดาวเทียม โดยที่มีช่วงเวลาไปกลับแตกต่างกัน

จากแบบจำลองผลการทดลองจะพบว่าในช่วงการเริ่มต้นเชื่อมโยงระบบ เมื่อใช้ Sudden Start อัลกอริทึมจะทำให้เวลาที่ขนาด Congestion Window เพิ่มขึ้นจนถึงค่าสูงสุดใช้เวลาลดลงประมาณ 3-4 เท่า และในช่วง Congestion Avoidance จะสามารถลดเวลาหน่วงประมาณ 2 เท่า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....
ปีการศึกษา.....2546.....

ลายมือชื่อนิสิต.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4370647021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: CONGESTION CONTROL/THROUGHPUT/PROPAGATION DELAY

CHOOPONG CHOLPANARAK : ANALYSIS OF CONGESTION CONTROL SCHEME FOR SATELLITE TCP/IP NETWORKS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. DR.PRASIT TEEKAPUT, Ph.D. 69 pp. ISBN 974-17-3837-4.

This thesis proposes analysis method for congestion control via satellite networks and separate in three parts. Firstly we apply dummy segments to boost sending rate. Secondly we apply multi level explicit congestion notification in order to send signal to the source about congestion situation and adjust traffic rate. Finally we apply dummy segments when packet loss detected by three duplicate acknowledge segments then retransmit. All algorithms called TCP-Peach# contains the following algorithms : Sudden Start, Congestion Avoidance, Fast Retransmit and Rapid Recovery algorithms apply with ten sources and ten receivers simulation configuration model via satellite networks in difference round trip times.

Simulation results show that congestion window in Sudden Start algorithm can reach maximum congestion window faster than TCP-Reno about 3-4 times and Congestion Avoidance phase can reduce twice delay times.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department.....	Electrical Engineering.....	Student's signature.....
Field of study.....	Electrical Engineering.....	Advisor's signature.....
Academic year.....	2003.....	Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ประสิทธิ์ ที่มพุดฉืออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาข้อแนะนำ วิธีการแก้ปัญหาตลอดจนแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยโทรคมนาคม ซึ่งเป็นสถานที่ทำวิจัย รวมถึงเพื่อน รุ่นพี่และรุ่น
น้องทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือในการให้ข้อคิดเห็น และคำแนะนำต่างๆ ในการเรียนรวมถึงการทำ
วิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ โครงการวิจัยร่วมภาครัฐและเอกชนที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เช่น
อุปกรณ์เพื่อทำการวิจัยตลอดจนทุนอุดหนุนการวิจัย ทำให้การดำเนินการวิจัยมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคุณเฉลียว วิฑูรปกรณ์ คุณกัลยรัตน์ วิฑูรปกรณ์ คุณศุภฤกษ์ สุทธวานิช คุณ
สุพรรณ วงศ์เครือศรี และคุณสกล ธนังเจริญลาภ ที่ให้การสนับสนุนในการศึกษาครั้งนี้

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ได้มอบความรัก ความอบอุ่น และกำลังใจ
ตลอดมา ตลอดจนพี่ๆ ของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนเสมอ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 บทนำ

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ระยะเวลาช่วง Slow Start สำหรับดาวเทียมชนิด LEO, MEO และ GEO.....	32
ตารางที่ 2.2 เรเตอร์ตอบสนองความถี่โดยทำสัญลักษณ์ที่บิต CE และ ECT.....	33
ตารางที่ 3.1 การให้สัญลักษณ์ของบิต CE และบิต ECT เพื่อบอกระดับของความถี่.....	45
ตารางที่ 3.2 การทำสัญลักษณ์ที่เครื่องรับที่บิต CWR และบิต ECE.....	46
ตารางที่ 3.4 การตอบสนองโดยเครื่องส่ง.....	47



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แรงที่กระทำต่อดาวเทียมที่โคจรไปพร้อมกับโลก.....	6
รูปที่ 2.2 ความหนาแน่นฟลักซ์จากแหล่งกำเนิดแบบ Isotropic.....	13
รูปที่ 2.3 การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียมกับสถานีภาคพื้นดิน.....	14
รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของสถานีภาคพื้นดิน.....	19
รูปที่ 2.5 แผนผังของ Up Converter.....	22
รูปที่ 2.6 แผนผังของ Down Converter.....	24
รูปที่ 2.7 การส่งข้อมูลในระบบ FDMA.....	27
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของ TDMA Frame.....	28
รูปที่ 2.9 ขนาด congestion window ($cwnd$) ในตอนเริ่มเชื่อมโยงระบบ.....	31
รูปที่ 2.10 Random Early Detection อัลกอริทึม.....	34
รูปที่ 2.11 โครงสร้างของโพรโทคอล IP (Ipv4).....	35
รูปที่ 2.12 โครงสร้างของฟิลด์ Type of Service.....	36
รูปที่ 2.13 โครงสร้างของแพ็กเก็ตของโพรโทคอล TCP.....	38
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของ Reserved Field.....	39
รูปที่ 2.15 การจำลองการสูญหายของข้อมูล.....	41
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมของ TCP-Peach# อัลกอริทึม.....	42
รูปที่ 3.2 แสดงการส่งแพ็กเก็ตในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมต่อระบบ.....	44
รูปที่ 3.3 การทำสัญลักษณ์ที่เรเตอร์.....	46
รูปที่ 3.4 การจำลองการทดลองระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม.....	48
รูปที่ 3.5 การทำงานของ Fast Retransmit และ Rapid Recovery อัลกอริทึม.....	50
รูปที่ 4.1 TCP-Peach# กับ TCP-Reno ในช่วงเริ่มต้น ของการเชื่อมโยงระหว่าง Congestion Window กับ RTT.....	51
รูปที่ 4.2 Acknowledge Data ของ TCP-Peach# กับ TCP-Reno..... ในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมโยงระบบ	52
รูปที่ 4.3 TCP-Peach# กับ TCP-Reno เมื่อข้อมูลสูญหายเนื่องจากการเชื่อมโยงผิดพลาด ระหว่าง Congestion Window กับ RTT.....	53
รูปที่ 4.4 TCP-Peach# กับ TCP-Reno เมื่อข้อมูลสูญหายเนื่องจากการเชื่อมโยงผิดพลาด ระหว่าง Acknowledge กับ RTT.....	54
รูปที่ 4.5 วิสัยสามารถของระบบระหว่าง TCP-Peach# กับ TCP-Reno เปรียบเทียบกับเวลาในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมโยงระบบ	55

รูปที่ 4.6 คิวสำหรับ ECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.001$,	56
$\max_p = 0.1, \min_th = 10, \max_th = 20$	
รูปที่ 4.7 คิวสำหรับ ECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.002$,	56
$\max_p = 0.1, \min_th = 10, \max_th = 20$	
รูปที่ 4.8 คิวสำหรับ ECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.004$,	57
$\max_p = 0.1, \min_th = 10, \max_th = 20$	
รูปที่ 4.9 คิวสำหรับ ECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.008$,	57
$\max_p = 0.1, \min_th = 10, \max_th = 20$	
รูปที่ 4.10 คิวสำหรับ ECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.016$,	58
$\max_p = 0.1, \min_th = 10, \max_th = 20$	
รูปที่ 4.11 คิวสำหรับ ECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.024$,	58
$\max_p = 0.1, \min_th = 10, \max_th = 20$	
รูปที่ 4.12 คิวสำหรับ ECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.002$,	59
$\max_p = 0.1, \min_th = 10, \max_th = 30$	
รูปที่ 4.13 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.002$,	59
$\max_p = 0.1, \min_th = 10, \text{mid_th} = 20, \max_th = 40,$	
$\alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = 0.3, \alpha_3 = 0.5$	
รูปที่ 4.14 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.002$,	60
$\max_p = 0.1, \min_th = 5, \text{mid_th} = 10, \max_th = 20,$	
$\alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = 0.3, \alpha_3 = 0.5$	
รูปที่ 4.15 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.002$,	60
$\max_p = 0.1, \min_th = 5, \text{mid_th} = 10, \max_th = 20,$	
$\alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = 0.4, \alpha_3 = 0.5$	
รูปที่ 4.16 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.002$,	61
$\max_p = 0.1, \min_th = 10, \text{mid_th} = 20, \max_th = 40,$	
$\alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = 0.4, \alpha_3 = 0.5$	
รูปที่ 4.17 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.004$,	61
$\max_p = 0.1, \min_th = 10, \text{mid_th} = 20, \max_th = 40,$	
$\alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = 0.3, \alpha_3 = 0.5$	
รูปที่ 4.18 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.004$,	62
$\max_p = 0.1, \min_th = 10, \text{mid_th} = 20, \max_th = 40,$	
$\alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = 0.4, \alpha_3 = 0.5$	

- รูปที่ 4.19 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.004$,62
 $\max_p = 0.1$, $\min_th = 5$, $mid_th = 10$, $\max_th = 20$,
 $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.3$, $\alpha_3 = 0.5$
- รูปที่ 4.20 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.004$,63
 $\max_p = 0.1$, $\min_th = 5$, $mid_th = 10$, $\max_th = 20$,
 $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.4$, $\alpha_3 = 0.5$
- รูปที่ 4.21 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.004$,63
 $\max_p = 0.1$, $\min_th = 10$, $mid_th = 20$, $\max_th = 40$,
 $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.3$, $\alpha_3 = 0.5$
- รูปที่ 4.22 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.008$,64
 $\max_p = 0.1$, $\min_th = 5$, $mid_th = 10$, $\max_th = 20$,
 $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.3$, $\alpha_3 = 0.5$
- รูปที่ 4.23 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.008$,64
 $\max_p = 0.1$, $\min_th = 10$, $mid_th = 20$, $\max_th = 40$,
 $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.4$, $\alpha_3 = 0.5$
- รูปที่ 4.24 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.008$,65
 $\max_p = 0.1$, $\min_th = 5$, $mid_th = 10$, $\max_th = 20$,
 $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.4$, $\alpha_3 = 0.5$

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การสื่อสารทางดาวเทียม ซึ่งมีข้อดีหลายประการ เช่น

1. ในพื้นที่ที่ไม่สามารถวางระบบของการสื่อสารแบบบนพื้นโลกได้ เช่น ในมหาสมุทรหรือในพื้นที่ที่มีภูเขาล้อมรอบ หรือพื้นที่ที่อาจสามารถวางระบบแบบบนพื้นโลกได้แต่จะไม่คุ้มกับต้นทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ ในส่วนนี้การสื่อสารผ่านดาวเทียมจะสามารถทำให้สามารถสร้างระบบติดต่อสื่อสารได้ เช่นกรณีการติดต่อสื่อสารในพื้นที่ที่เป็นมหาสมุทรหรือในพื้นที่ทะเลทราย

2. ในระบบเชื่อมโยงขาขึ้น (Uplink) และระบบเชื่อมโยงขาลง (Downlink) สามารถส่งข้อมูลไปยังกลุ่มของผู้ใช้ขนาดใหญ่ได้

3. มีแบนด์วิดท์ขนาดใหญ่ (Bandwidth on Demand) มีผลทำให้สามารถส่งข้อมูลขนาดใหญ่ได้ครั้งละมากๆ ซึ่งในปัจจุบันการสื่อสารดาวเทียมมีช่วงความถี่ต่างๆ เช่นในช่วง C-Band จะใช้ความถี่ในระบบเชื่อมโยงขาขึ้น 4 GHz ในระบบเชื่อมโยงขาลง 6 GHz, Ku-Band จะใช้ความถี่ในระบบเชื่อมโยงขาขึ้น 10 GHz ในระบบเชื่อมโยงขาลง 12 GHz และ Ka-Band จะใช้ระบบเชื่อมโยงขาขึ้น 20 GHz ในระบบเชื่อมโยงขาลง 30 GHz โดยจะมีขนาดแบนด์วิดท์ประมาณ 500 MHz

4. การครอบคลุมพื้นที่มีมากสามารถครอบคลุมในทุกๆ ส่วนบนพื้นโลกได้

5. สามารถใช้ประโยชน์ได้หลากหลายรูปแบบเช่น การสำรวจทรัพยากรเหมืองแร่ใต้พื้นดิน การพยากรณ์อากาศ

ด้วยข้อดีดังกล่าวแต่มีข้อจำกัดของระบบที่มีอัตราความผิดพลาดในการเชื่อมโยงสูงเนื่องจากต้องส่งข้อมูลผ่านตัวกลางที่เป็นบรรยากาศซึ่งมีระยะทางสูงจากพื้นโลกทำให้ข้อมูลถูกคลื่นรบกวน การหน่วงเวลาของการแพร่กระจายคลื่นมีค่ามากและการเกิดความคับคั่ง (Congestion) มีผลทำให้วิสัยสามารถ (Throughput) มีค่าลดลง ซึ่งเป็นลักษณะพื้นฐานของการสื่อสารผ่านดาวเทียมที่ไม่

สามารถหลีกเลี่ยงได้เพราะตัวดาวเทียมต้องลอยอยู่ในอวกาศ ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่มุ่งเน้นเพื่อลดการเกิดความคับคั่งในช่องสัญญาณสื่อสารดาวเทียมและลดความผิดพลาดของการเชื่อมโยงในระบบอย่างมากมาย งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำอัลกอริทึมต่างๆ เพื่อเพิ่มวิสัยความสามารถของระบบและลดการเกิดความคับคั่ง ทำให้ลดโอกาสในการเชื่อมโยงระบบใหม่ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมเนื่องจากการหน่วงเวลาของการแพร่กระจายคลื่นมีค่ามาก งานวิจัยชิ้นนี้จะแยกการวิเคราะห์แบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วง Sudden Start, Congestion Avoidance และช่วง Fast Retransmit & Rapid Recovery โดยทำการวิเคราะห์ในตัวแปรที่มีความเกี่ยวข้องกันและเกี่ยวข้องกับระบบซึ่งในทางปฏิบัติจริงหากใช้ตัวแปรที่เหมาะสมจะทำให้สามารถเพิ่มวิสัยความสามารถของระบบขึ้นได้เนื่องจากมีการตรวจสอบ ส่งกลับของสถานะความคับคั่งและมีการลดอัตราการส่งเพื่อให้สอดคล้องกับสถานการณ์ของความคับคั่งในขณะเวลานั้น ๆ

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การควบคุมความคับคั่งของช่องสัญญาณสื่อสารดาวเทียม
2. เพื่อหาวิธีปรับปรุงลดความคับคั่งของช่องสัญญาณสื่อสารดาวเทียมซึ่งจะมีผลทำให้วิสัยความสามารถของระบบดีขึ้น

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาและวิเคราะห์รูปแบบปัจจุบันของการสื่อสารผ่านดาวเทียมที่มีการนำเสนอ
2. ศึกษาปัญหาที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมในปัจจุบัน
3. ออกแบบเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองการทำงานของระบบ
4. ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการจำลองผลที่ได้จากโปรแกรม

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ทำการศึกษาระบบสื่อสารดาวเทียม และปัญหาที่พบในปัจจุบัน
2. ศึกษาวิธีการและอัลกอริทึมในการควบคุมความคับคั่งของระบบ
3. ใช้อัลกอริทึมต่างๆ และปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้
4. ทำการเขียนโปรแกรมเพื่อทำการทดลองจำลองผล
5. วิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้
6. เปรียบเทียบและสรุปผลการจำลองผลที่ได้
7. สรุปรวบรวมและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบถึงปัญหาเอกสารทางด้านวิชาการและวิธีวิเคราะห์ในการแก้ปัญหาในระบบสื่อสารดาวเทียม
2. ได้ทราบถึงวิธีการจำลองรูปแบบการทดลองการสื่อสารผ่านดาวเทียมและการเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองการทดลอง
3. ได้ทราบถึงระบบของการสื่อสารผ่านดาวเทียม การควบคุมวงโคจรตลอดจนหลักการพื้นฐานในการสื่อสารผ่านดาวเทียม
4. ได้ทราบถึงระบบโครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม
5. ได้อัลกอริทึมและแนวคิดเพื่อแก้ปัญหาของความคับคั่งของระบบ TCP/IP ผ่านดาวเทียม และสามารถทำการพัฒนาต่อไป

6. เสริมสร้างประสบการณ์ในการวิจัย ขั้นตอนการทำวิจัยตลอดจนการวิเคราะห์ปัญหา การหาวิธีแก้ปัญหาโดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านวิเคราะห์ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยการวิเคราะห์ในแต่ละส่วน

1.6 ภาพรวมของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งออกเป็น 5 บท บทที่ 1 จะเป็นบทนำ บทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม ดาวเทียม ปัญหาการเชื่อมโยงระบบที่เกิดขึ้น วิธีแก้ปัญหาที่ใช้อยู่ในปัจจุบันและการเสนอแนะวิธีแก้ปัญหา โครงสร้างกลุ่มข้อมูล TCP/IP การส่งและการรับข้อมูลและการตรวจสอบการสูญหายของข้อมูล

บทที่ 3 จะกล่าวถึงแนวคิดในการดำเนินการวิจัย เสนอวิธีแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น การสร้างแบบจำลองเพื่อทดลองระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมและแนวความคิดที่จะใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ส่วนในบทที่ 4 จะเป็นส่วนของผลการทดลองที่ได้จากการปรับค่าตัวพารามิเตอร์ที่มีผลต่อความคับคั่งของระบบโดยทำการทดลองจากแนวความคิดในการจำลองระบบจากบทที่ 3 และในบทที่ 5 จะเป็นส่วนสรุปและอภิปรายข้อเสนอแนะข้อคิดเห็นตลอดจนแนวทางในการพัฒนาวิธีการและอัลกอริทึมต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างของระบบการสื่อสารดาวเทียม

โครงสร้างของระบบการสื่อสารดาวเทียม ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.1.1 ดาวเทียม

มีอายุการใช้งานประมาณ 7 – 15 ปี ขึ้นอยู่กับพลังงานสำรอง ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังนี้

2.1.1.1 ระบบควบคุมตำแหน่งและวงโคจร

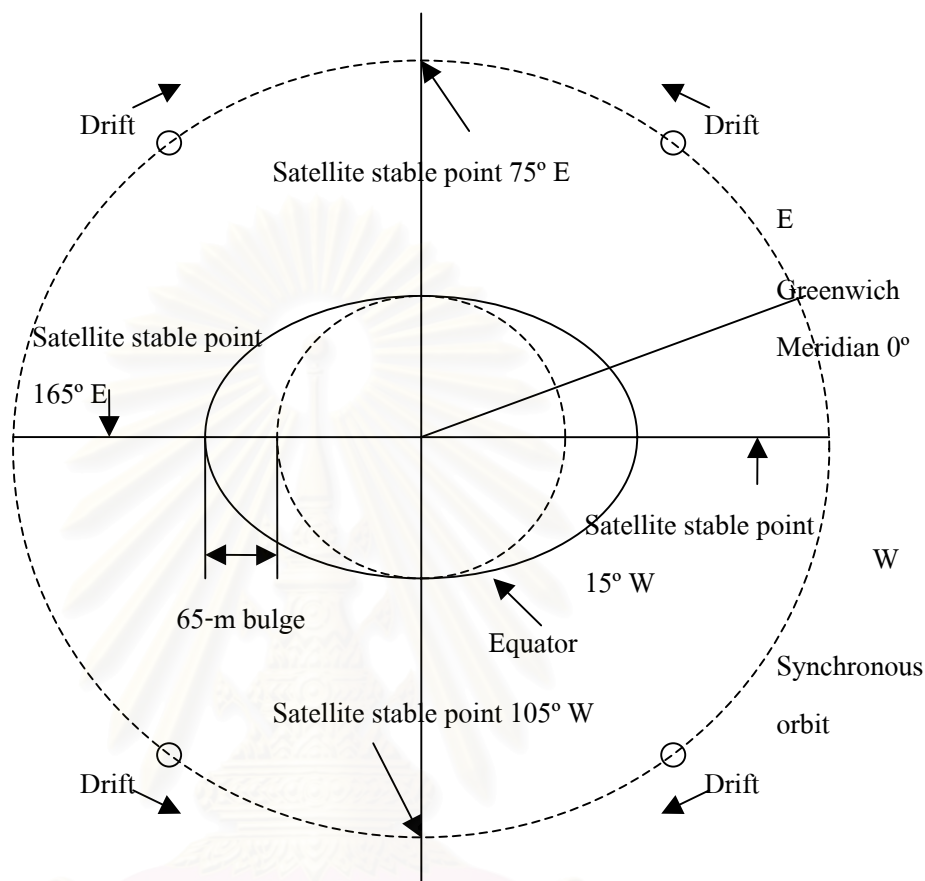
ในส่วนนี้จะประกอบด้วย มอเตอร์จรวดที่คอยทำการปรับเปลี่ยนวงโคจรของดาวเทียมให้อยู่ในวงโคจรที่ถูกต้อง เมื่อเกิดความคลาดเคลื่อนของวงโคจรเนื่องจากมีแรงภายนอกมากระทำ

การควบคุมตำแหน่งของดาวเทียมเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อที่จะให้จานสายอากาศของดาวเทียมซึ่งเป็นชนิดที่มีลำแคบ (Beam) ให้ชี้มายังโลกในตำแหน่งบริเวณที่ต้องการ มีปัจจัยหลายอย่างที่ทำให้ดาวเทียมเกิดการหมุนซึ่งทำให้ทิศทางของจานสายอากาศผิดไปจากตำแหน่งที่ต้องการ นอกจากนี้ แรงดึงดูดของดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ ก็จะทำให้ดาวเทียมเกิดการหมุนไปได้ ถ้าดาวเทียมไม่อยู่ในสภาพสมดุลเพียงพอ และยังมีสนามแม่เหล็กจากโลก ซึ่งสามารถกระทำให้เกิดแรงต่อดาวเทียมได้ ค่าโมเมนต์ทางแม่เหล็กของดาวเทียมที่ไม่เป็นศูนย์

นอกจากนี้แล้ว สนามโน้มถ่วงต่างๆ ซึ่งกระทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางตำแหน่งแล้วก็ยังทำให้ดาวเทียมเกิดความเร่ง ซึ่งเป็นผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระนาบของโคจร สนามโน้มถ่วงที่มีผลมากที่สุดคือ แรงดึงดูดจากดวงจันทร์ ซึ่งมีค่าประมาณสามเท่าของแรงดึงดูดจากดวงอาทิตย์ ผลทางการเปลี่ยนแปลงของวงโคจรนั้น

จากการที่โลกไม่ได้มีเส้นฐานเป็นทรงกลมอย่างสมบูรณ์ โดยบริเวณเส้นศูนย์สูตรที่ตำแหน่ง Longitude 15 องศาตะวันตก และ 165 องศาตะวันออก จะมีลักษณะที่โป่งออกมามากกว่าส่วนอื่นประมาณ 65 เมตร ซึ่งเป็นผลให้ดาวเทียมที่ไร้การควบคุมมีแนวโน้มที่จะโคจรไปอยู่ที่ตำแหน่งสมดุลตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งจากสองตำแหน่งคือ 105 องศาตะวันตกและ 75 องศาตะวันออก ดังแสดงในรูปที่ 2.1 เพื่อที่จะยังคงให้ดาวเทียมอยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องนั้น จะต้องมียุทธศาสตร์ที่คอยควบคุม

คุมให้เกิดแรงกระทำต่อต้านต่อผลดังกล่าวนี้เป็นระยะๆ โดยเรียกอุปกรณ์นี้ว่า Thrusters สำหรับผลเนื่องจากการป้อนของขั้วโลกเหนือและใต้ประมาณ 20 กิโลเมตร นั้นมีผลน้อยมากต่อดาวเทียมค้างฟ้า [12]



รูปที่ 2.1 แรงที่กระทำต่อดาวเทียมที่โคจรไปพร้อมกับโลก

วิธีที่จะควบคุมตำแหน่งของดาวเทียมให้ถูกต้องโดยทั่วไปมีสองวิธี ซึ่งตามปกติแล้วตัวดาวเทียมเองนั้นจะมีความสามารถที่จะหมุนรอบตัวเองคล้ายลูกข่าง ในช่วงอัตรา 30 - 100 รอบต่อนาที ซึ่งเราจะเรียกดาวเทียมในลักษณะนี้ว่า Spinners ซึ่งจะทำให้เกิดสภาพที่ตัวดาวเทียมมีโมเมนต์ทางการหมุนค่าๆ หนึ่ง ซึ่งจะคอยต่อต้านการกระทำเนื่องจากผลภายนอก สำหรับอีกวิธีหนึ่งนั้นจะใช้ล้อคู่กำลังเรียกว่า Momentum Wheels ติดตั้งอยู่ในแกนสามแกนซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยล้อหมุนที่ว่านี้จะขับโดยมอเตอร์ด้วยอัตราการหมุนที่สูง โดยการควบคุมการหมุนของล้อทั้งสามแกนนี้ก็จะสามารถทำให้ดาวเทียมมีโมเมนต์ในทิศทางต่างๆ อย่างถูกต้อง เพื่อคอยต่อต้านการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลกระทบภายนอกได้ เรียกวิธีนี้ว่า Three-Axis Stabilization ตัวอย่างของดาวเทียมที่ใช้ระบบควบคุมแบบนี้เช่น Intelsat V ตัวอย่างดาวเทียมแบบ Spinner ได้แก่ Intelsat IV-A และดาวเทียมอื่นที่สร้างโดยบริษัท Hughes Aircrafts เช่น Palapa, Comstar และ HS 376 ซึ่งเป็นดาวเทียมรุ่นที่ประเทศไทยนำมาใช้เป็นดวงแรกในชื่อว่า “ไทยคม”

2.1.1.2 ระบบตรวจจับและสั่งการดาวเทียม (Telemetry, Tracking และ Command หรือ TT&C)

ระบบนี้จะมีทั้งในดาวเทียมและอยู่ที่สถานีภาคพื้นดิน โดยระบบ Telemetry จะส่งข้อมูลที่ไ้จากการตรวจจับสัญญาณควบคุมต่างๆ บนดาวเทียม แล้วส่งมายังสถานีควบคุมภาคพื้นดิน ส่วนระบบ Tracking เป็นระบบที่อยู่บนภาคพื้นดินซึ่งคอยจัดการเกี่ยวกับข้อมูลทางตำแหน่งของดาวเทียม เช่น ระยะห่างจากโลก มุม Azimuth และมุม Elevation จากการตรวจจับตัวแปรทั้งสามซ้ำกันหลายๆ ครั้ง ก็จะทำให้สถานีควบคุมภาคพื้นดินสามารถกำหนดตำแหน่งที่ถูกต้องของดาวเทียม ณ ขณะนั้นๆ ได้

การรับสัญญาณระบบ Telemetry จากดาวเทียม และข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งและวงโคจรจากระบบ Tracking ก็จะทำให้สถานีควบคุมภาคพื้นดินสามารถส่งสัญญาณควบคุม Command ไปยังดาวเทียมเพื่อใช้ในการปรับเปลี่ยนตำแหน่งและวงโคจรของดาวเทียมให้ถูกต้อง

2.1.1.2.1 ระบบ Telemetry

ระบบ Telemetry เป็นระบบที่ทำการเก็บข้อมูลจากการตรวจจับ (Sensor) ที่จับสัญญาณจากจุดต่างๆ ในดาวเทียม แล้วทำการส่งข้อมูลดังกล่าวนี้ไปยังสถานีควบคุมภาคพื้นดิน ตามปกติแล้วจุดที่จะต้องทำการตรวจจับต่างๆ นั้นมีมากมาย อาทิเช่น แรงดันในถังเก็บเชื้อเพลิง กระแสไฟฟ้าและแรงดันในส่วนที่ผลิตพลังงานไฟฟ้า ตลอดจนค่ากระแสและแรงดันต่างๆ ในอุปกรณ์สื่อสารอิเล็กทรอนิกส์

โดยทั่วไปสัญญาณข้อมูล Telemetry นี้จะถูกจัดส่งในแบบดิจิตอลชนิด Phase Shift Keying (PSK) หรือ Frequency Shift Keying (FSK) โดยใช้กำลังในการส่งออกต่ำและใช้เทคนิคในการส่งแบบ Time Division Multiplexing (TDM) เมื่อสัญญาณมาถึงสถานีภาคพื้นดินก็จะใช้ระบบคอมพิวเตอร์ทำหน้าที่ตรวจสอบ จัดเก็บ และถอดรหัสข้อมูล Telemetry นี้เพื่อใช้ในการดำเนินการให้ได้มาซึ่งสัญญาณควบคุมเพื่อส่งกลับไปยังดาวเทียมอีกครั้งหนึ่ง

2.1.1.2.2 ระบบ Tracking

การหาค่าตำแหน่งของดาวเทียม โดยตัวตรวจจับความเร็วและความเร่งบนดาวเทียม จะเป็นตัวบ่งบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งและวงโคจรในขณะนั้น สำหรับอุปกรณ์ภาคพื้นดินที่มีความแม่นยำสูงๆ นั้นจะสามารถบ่งบอกถึงตำแหน่งของดาวเทียมได้ละเอียดถูกต้องในระดับความผิดพลาดที่น้อยกว่า 100 เมตร

2.1.1.2.3 ระบบ Command

ระบบสั่งการและระบบการเชื่อมโยง Telemetry นี้ เป็นส่วนแยกออกจากส่วนระบบสื่อสารของดาวเทียมแต่ก็ยังคงใช้ความถี่ในการรับและส่งในย่านเดียวกัน โดยหน้าที่ของระบบสั่งการคือ การเก็บรวบรวมข้อมูลจากระบบ Telemetry และระบบ Tracking จากนั้นจึงผ่านเข้าไปยังส่วนคอมพิวเตอร์ควบคุมที่สถานีภาคพื้นดินแล้วทำการประมวลผลรวมกับตัวควบคุม (Controller) ให้ได้มาซึ่งสัญญาณสั่งการควบคุมเพื่อส่งกลับไปยังดาวเทียม เพื่อให้ดาวเทียมทำการปรับสภาพต่างๆ ของตัวมันเองให้เหมาะสมต่อไป

2.1.1.3 ระบบจ่ายกำลังไฟฟ้า

ดาวเทียมสื่อสารทุกชนิดจะได้รับพลังงานไฟฟ้าจากการแปรผันมาจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Solar Cells หรือ Photovoltaic Cells โดยพลังงานที่ได้นี้จะใช้ในระบบสื่อสารของดาวเทียม โดยเฉพาะในภาคส่งและพลังงานไฟฟ้าที่เหลือก็จะใช้ในส่วนอื่นๆ ของดาวเทียม โดยเรียกว่า Housekeeping เนื่องจากเป็นระบบที่คอยสนับสนุนส่วนของระบบสื่อสารให้ทำงานได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ

ดาวเทียมสื่อสารทั้งหมดจะใช้พลังงานไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์ โดยที่ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งจ่ายพลังงาน โดยแผ่รังสีที่มีความเข้มของพลังงานที่รับได้ที่ดาวเทียมประมาณ 1.39 KW/m^2 แต่พลังงานนี้สามารถแปรผันเป็นพลังงานไฟฟ้าได้เพียง 10% - 15% โดยในปัจจุบันได้มีการพัฒนาตัว Solar Cells หรือ Photovoltaic Cells และรูปแบบของแผงรับแสงอาทิตย์ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานจากพลังงานแสงอาทิตย์มาเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากยิ่งขึ้นเป็นการเพิ่มอายุการใช้งานของดาวเทียมมากยิ่งขึ้น

ดาวเทียมสื่อสารที่เป็นแบบ Spinner มีรูปทรงเป็นแบบทรงกระบอกจะมีแผงรับแสง (Solar Cells หรือ Photovoltaic Cells) ดาวเทียมสื่อสารรุ่น Intelsat IV-A จะมีแผงรับแสงที่มีพื้นที่ 20 ตารางเมตร สามารถจ่ายพลังงานไฟฟ้าได้ 900 Watt แต่ถ้าเป็นดาวเทียมแบบ Three-Axis Stabilized จะใช้พื้นที่ของแผงรับแสงเพียงประมาณ 1 ใน 3 ของดาวเทียมแบบ Spinner ซึ่งจะทำให้มีน้ำหนักเบาลงไปมากเช่นดาวเทียม Intelsat -V

2.1.1.4 ระบบสื่อสารของดาวเทียม

ระบบนี้เป็นส่วนประกอบหลักของดาวเทียมสื่อสาร โดยที่ระบบอื่นๆ เป็นเพียงส่วนที่คอยสนับสนุนการทำงานของระบบนี้เท่านั้น ระบบนี้ประกอบด้วยระบบจานสายอากาศซึ่งคอยรับและ

ส่งสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์กว้างในย่านความถี่ไมโครเวฟ นอกจากนี้ยังมีส่วนของภาครับ - ภาคส่ง และภาคขยายกำลังของสัญญาณสำหรับหน่วยหนึ่งๆ ที่เป็นทั้งตัวรับและตัวส่งสัญญาณเรียกว่า ทรานส์พอนเดอร์ (Transponder)

ดาวเทียมสื่อสารมีหน้าที่ในการบริการการสื่อสารต่างๆ เช่น โทรศัพท์ สัญญาณภาพ และการสื่อสารข้อมูล ในการออกแบบระบบสื่อสารของดาวเทียมนั้น ระบบเชื่อมโยงขาลง (Downlink) จากดาวเทียมลงไปยังสถานีภาคพื้นดินเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เนื่องจากระยะจากดาวเทียมและโลกมีค่าประมาณ 36,000 กิโลเมตร (Geostationary Earth Orbit Satellite) ดังนั้น สัญญาณที่รับได้บนพื้นโลกจะมีค่าอยู่ในระดับเพียง 10^{-10} วัตต์ โดยที่สัญญาณซึ่งสถานีภาคพื้นดินจะนำไปใช้ได้นั้น จะต้องมียกกำลังของสัญญาณข่าวสารต่อสัญญาณข้อมูลอยู่ในระดับ 5 - 25 dB ขึ้นอยู่กับแบนด์วิดท์ (Bandwidth) และชนิดของการมอดูเลต (Modulation)

ระบบสื่อสารดาวเทียมประกอบด้วย ดาวเทียมที่ลอยอยู่ในอวกาศ ซึ่งดาวเทียมนี้จะทำการเชื่อมโยงการสื่อสารกับภาคพื้นดิน โดยผู้ใช้ทำการส่งสัญญาณเบสแบนด์ (Baseband) สัญญาณนี้จะถูกส่งไปยังสถานีภาคพื้นดินโดยผ่านเครือข่ายการสื่อสารภาคพื้นดิน (Terrestrial Network) ซึ่งอาจเป็นสายโทรศัพท์ เมื่อมาถึงสถานีภาคพื้นดิน สัญญาณจะถูกมอดูเลต (Modulate) และขยายจากนั้นจะถูกส่งออกขึ้นไปยังตัวดาวเทียม เมื่อดาวเทียมได้รับสัญญาณจะทำการกรองเฉพาะสัญญาณ ในช่วงความถี่ที่ต้องการแล้วจะทำการขยายสัญญาณและส่งกลับมายังพื้นโลก เมื่อสถานีภาคพื้นดินรับสัญญาณจากตัวดาวเทียมแล้วจะทำการในกระบวนการย้อนกลับ คือทำการขยายสัญญาณแล้วทำการดีมอดูเลต (Demodulate) กลับไปเป็นสัญญาณเบสแบนด์ (Baseband) และส่งต่อไปยังผู้ใช้โดยผ่านทางเครือข่ายการสื่อสารภาคพื้นดิน (Terrestrial Network) [12]

ทรานส์พอนเดอร์ (Transponder)

ในดาวเทียมรุ่นแรกๆ เช่น Intelsat-I และ Intelsat-II จะมีทรานส์พอนเดอร์ขนาดแบนด์วิดท์ 250 MHz เพียง 1 หรือ 2 ทรานส์พอนเดอร์ การใช้แบนด์วิดท์ของทรานส์พอนเดอร์นี้ก็จะทำให้เกิดผลการรบกวน เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้นของ TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier) มีมากด้วยเหตุนี้ ในดาวเทียมรุ่นใหม่จะมีการใช้ทรานส์พอนเดอร์ที่มีแบนด์วิดท์แคบๆ

2.1.1.5 ระบบสายอากาศของตัวดาวเทียม

ระบบสายอากาศที่ใช้ในตัวดาวเทียมนั้นมีอยู่ด้วยกัน 4 แบบ ได้แก่ แบบ Wire แบบ Horn แบบ Reflector และแบบ Array

บริเวณที่สายอากาศของดาวเทียมสามารถให้บริการได้เรียกว่า พื้นที่ครอบคลุม (Coverage Zone) โดยที่ขอบเขตของ Zones จะถูกกำหนดโดยบริเวณขอบที่ระดับสัญญาณเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังสัญญาณสูงสุด โดยเรียกว่า 3 dB - Beamwidth

สำหรับระบบสายอากาศแบบ Wire เช่น ไคโพล หรือ โมโนโพลนั้นใช้กับความถี่ในย่าน VHF และ UHF ซึ่งใช้สำหรับการติดต่อในส่วน of ระบบ TT&C ส่วนสายอากาศแบบ Horn นั้นใช้ในย่านความถี่ไมโครเวฟซึ่งจะให้ลำ (Beam) แบบกว้างหรือที่เรียกว่า Global Coverage แต่สำหรับระบบสายอากาศแบบ Horn นี้สามารถสร้างให้มีอัตราขยายได้สูงสุดประมาณ 23 dB เท่านั้นและ Beamwidth ได้แคบเพียง 10 องศา ถ้าต้องการให้มีอัตราขยายที่สูงและลำที่แคบกว่านี้ก็จะต้องใช้สายอากาศแบบ Reflector หรือ Array

สำหรับสายอากาศแบบช่องเปิดทั่วไปนั้น มีอัตราขยาย G ดังนี้

$$G = \mu \frac{4\pi A}{\lambda^2} \quad (2-1)$$

โดยที่ η เป็นประสิทธิภาพของช่องเปิด (Aperture Efficiency)

λ เป็นความยาวคลื่นที่ใช้งาน (m)

A เป็นพื้นที่ประสิทธิผลของอากาศ (Aperture Area) (m²)

โดยปกติแล้วค่าประสิทธิภาพของช่องเปิดนั้นจะมีค่าประมาณ 50% - 60% สำหรับสายอากาศแบบ Reflector และจะมีค่าสูงสำหรับสายอากาศแบบ Horn คือประมาณ 65% - 80% ส่วนมุม Beamwidth ของสายอากาศ $\theta_{3\text{ dB}}$ มีค่าดังนี้

$$\theta_{3\text{ dB}} = \frac{75\lambda}{D} \quad (2-2)$$

โดยที่ D/λ เป็นขนาดของสายอากาศในหน่วยความยาวคลื่น

สายอากาศแบบใช้ความถี่ซ้ำ

มีอยู่ 2 วิธี ในการที่จะนำความถี่เดียวกันนี้มาใช้ สำหรับการส่งและการรับก็คือ Spatial Beam Separation และ Orthogonal Polarization โดยวิธีแรกเป็นการใช้งานความถี่เดียวกัน แต่เป็นบริเวณที่ห่างกันบนพื้นโลก เพื่อไม่ให้สัญญาณเกิดการรบกวนกัน โดยจะต้องมีค่าของการรบกวนดังกล่าวนี้ในระบบ FM น้อยกว่า -25 dB และในระบบคิวิตอลน้อยกว่า -17 dB สำหรับดาวเทียมที่ทันสมัยนั้นเมื่ออยู่ในวงโคจรปกติแล้วสามารถควบคุมตำแหน่งและทิศทางของสายอากาศ เพื่อการให้บริการบนพื้นที่ต่างๆ ได้ตามต้องการ

นอกจากนี้ระบบชุดสายอากาศของดาวเทียมบางดวงอาจจะมีขนาดใหญ่มาก จนทำให้เกิดความยากลำบากในการขนส่งดาวเทียมขึ้นสู่วงโคจร จึงจำเป็นต้องมีกลไกเพื่อทำให้ดาวเทียมสามารถจัดตำแหน่งต่างๆ ของจานสายอากาศได้เองเมื่ออยู่ในวงโคจร

- 2.1.2 สถานีควบคุมตำแหน่งและวงโคจรของดาวเทียม (Station Keeping, Master Control Station)
- 2.1.3 ชั้นบรรยากาศ (Free Space)
- 2.1.4 สถานีภาคพื้นดินชนิดต่างๆ (Earth Stations)
- 2.1.5 การเชื่อมโยง (Links) ต่างๆ ระหว่างสถานีภาคพื้นดินกับผู้ใช้บริการ (Users) เช่น ชุมสายโทรศัพท์ สถานีโทรทัศน์ เป็นต้น
- 2.1.6 การเชื่อมต่อกับเครือข่ายการสื่อสารภาคพื้นดิน (Terrestrial Network)

2.1 ชนิดของดาวเทียม

หากแบ่งตามลักษณะการโคจรจากพื้นโลกแบ่งเป็น 3 ชนิด Low Earth Orbit (LEO) Medium Earth Orbit (MEO) และ ดาวเทียมค้างฟ้า (Geostationary Earth Orbit (GEO)) ซึ่งแต่ละชนิดจะโคจรห่างจากพื้นโลกและมีความเร็วไปกลับ (Round Trip Time) (RTT) แตกต่างกันมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ [1]

- 2.2.1 Low Earth Orbit (LEO) โคจรห่างจากโลกประมาณ 700 - 2,000 กิโลเมตร มีช่วงเวลากลับ (RTT) ประมาณ 0.05 วินาที คาบการโคจรรอบโลกประมาณ 100 - 127 นาที
- 2.2.2 Medium Earth Orbit (MEO) โคจรห่างจากโลกประมาณ 10,000 กิโลเมตร มีช่วงเวลากลับ (RTT) ประมาณ 0.25 วินาที
- 2.2.3 Geostationary Earth Orbit (GEO) หรือดาวเทียมค้างฟ้าโคจรห่างจากโลกประมาณ 36,000 กิโลเมตร มีช่วงเวลากลับ (RTT) ประมาณ 0.55 วินาที คาบการโคจรรอบโลกประมาณ 24 ชั่วโมง ซึ่งจะมีความเร็วสัมพัทธ์เทียบกับโลกเป็นศูนย์

2.3 ระบบเชื่อมโยงการสื่อสารระหว่างดาวเทียมกับสถานีภาคพื้นดิน (Satellite Links)

การออกแบบระบบสื่อสารดาวเทียมนั้น ต้องคำนึงถึงปัจจัยและผลกระทบในหลายๆ ด้าน เพื่อให้ได้มาซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดในราคาที่เหมาะสม ปัจจัยที่ควรต้องพิจารณา มีดังต่อไปนี้

- 2.3.1 น้ำหนักของตัวดาวเทียม
- 2.3.2 แหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าบนดาวเทียม
- 2.3.3 ย่านความถี่ที่ใช้สำหรับการสื่อสาร
- 2.3.4 ขนาดของสายอากาศทั้งที่ภาคพื้นดินและบนดาวเทียม
- 2.3.5 เทคนิคในการใช้งานตัวดาวเทียมร่วมกับสถานีภาคพื้นดินหลายๆ แห่ง

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานทางการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การคำนวณกำลังงานที่รับได้โดยสถานีภาคพื้นดินนั้น เป็นพื้นฐานสำคัญสำหรับการสื่อสารดาวเทียม พิจารณาการคำนวณความหนาแน่นของพลังงานต่อพื้นที่และสูตรการส่งผ่านของ Friis

ความหนาแน่นพลังจจากแหล่งกำเนิดแบบ Isotropic จะได้ว่าระยะห่าง R จะมีความหนาแน่นของพลังงานเป็นดังสมการ

$$F = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad \text{W/m}^2 \quad (2-3)$$

โดย P_t เป็นกำลังงานที่ส่งออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุด

ในทางปฏิบัติ จะใช้สายอากาศที่มีอัตราขยาย G_t เป็นตัวขับส่งพลังงานอีกต่อหนึ่ง ดังนั้นความหนาแน่นของพลังงานต่อพื้นที่ในที่นี้จะเป็น

$$F = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \quad \text{W/m}^2 \quad (2-4)$$

โดยที่ผลคูณ $P_t G_t$ เรียกว่า EIRP (Effective Isotropically Radiated Power)

สำหรับสายอากาศรับที่มีพื้นที่ประสิทธิภาพในการรับ (Aperture) A_m^2 จะมีพลังงานเป็น

$$P_r = FA \quad (2-5)$$

ในทางปฏิบัติ ระบบสายอากาศที่มีพื้นที่รับทางกายภาพเป็น A_r แต่ค่าของพื้นที่ประสิทธิภาพ A_e มีค่าน้อยกว่า A_r เสมอตามความสัมพันธ์

$$A_e = \eta A_r \quad (2-6)$$

โดยที่ η เป็นค่าสัมประสิทธิ์การรับคลื่น (Aperture Efficiency) จากสมการ (2-5) จะได้ว่า

$$P_r = \frac{P_t G_t A_e}{4\pi R^2} \quad (2-7)$$

และความสัมพันธ์พื้นฐานของสายอากาศ

$$G_r = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (2-8)$$

โดยที่ λ เป็นความยาวคลื่นที่ใช้งาน

เมื่อแทนค่า A_e ของสมการ (2-8) ในสมการ (2-7) จะได้ว่า

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{[4\pi R/\lambda]^2} \quad (2-9)$$

ซึ่งเรียกว่าสูตรส่งผ่านของ Friis ในเทอม $(4\pi R/\lambda)^2$ สามารถนิยามเป็นค่าการสูญเสียระหว่างทาง (Path loss หรือ L) เมื่อเขียนในหน่วยเดซิเบลได้เป็น

$$P_r = EIRP + G_r - L_p \quad (2-10)$$

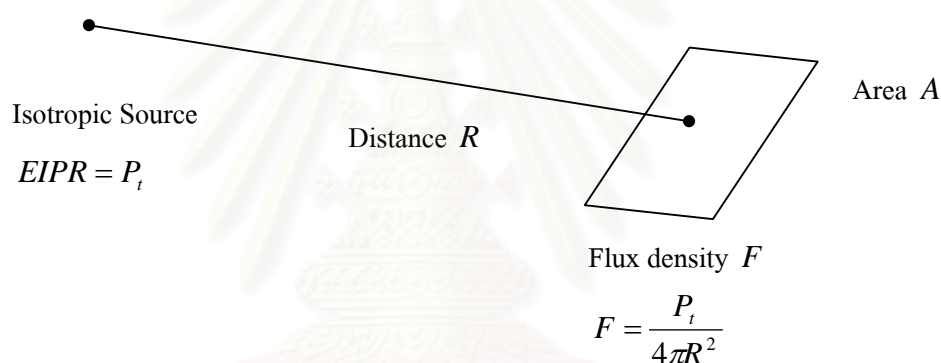
โดยที่ $EIRP = 10 \log_{10}(P_t G_t)$, $G_r = 10 \log_{10} \left[\frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \right]$ และ $L_p = 10 \log_{10} \left[\frac{4\pi R}{\lambda} \right]^2$

นอกจากนี้ ถ้าคำนึงถึงการสูญเสียที่เกิดขึ้นในชั้นบรรยากาศ และการสูญเสียที่สายอากาศรับและสายอากาศส่งจะเขียนสมการ (2-10) ได้เป็น

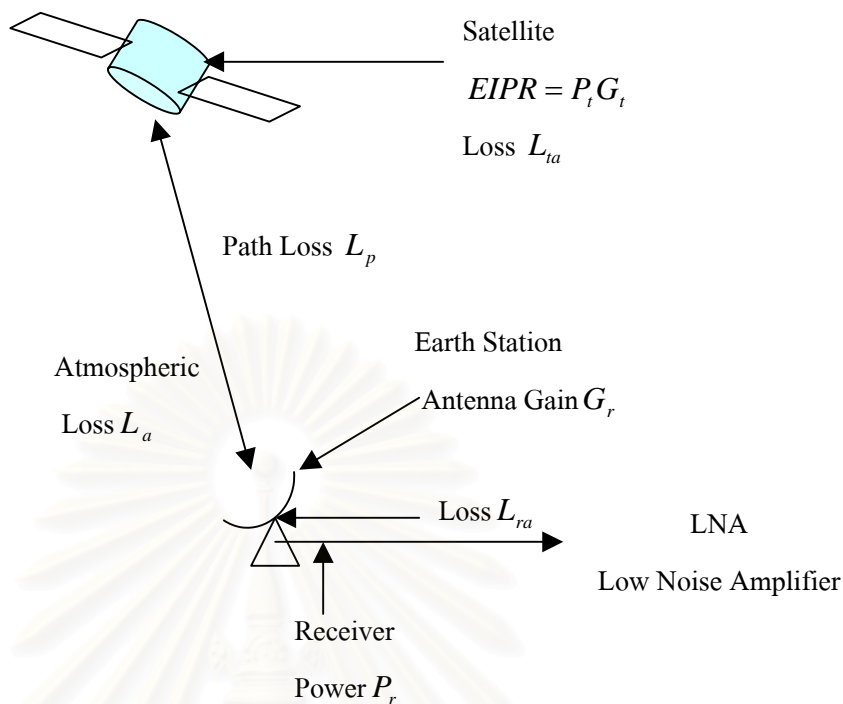
$$P_r = EIRP + G_r - L_p - L_a - L_{ta} - L_{ra} \quad (2-11)$$

โดยที่ L_a เป็นการสูญเสียในชั้นบรรยากาศ L_{ta} เป็นการสูญเสียที่สายอากาศส่งและ L_{ra} เป็นการสูญเสียที่สายอากาศรับ

ค่าของ L_a L_{ta} และ L_{ra} สามารถเรียกว่า Link Power Budget และพลังงานที่รับได้ P_r ยังสามารถเรียกว่า พลังงานของคลื่นพาห์ เนื่องจากระบบสื่อสารดาวเทียมจะใช้การมอดูเลตแบบ Frequency Modulation (FM) สำหรับระบบแอนะล็อก และการมอดูเลตแบบ Phase Shift Keying (PSK) หรือ Frequency Shift Keying (FSK) สำหรับระบบดิจิทัล การมอดูเลตในระบบดิจิทัลจะมีผลทำให้ขนาด (Amplitude) ของคลื่นพาห์คงที่ตลอดเวลา ซึ่งทำให้พลังงานของคลื่นพาห์มีค่าเท่ากับพลังงานของคลื่นที่รับได้



รูปที่ 2.2 ความหนาแน่นฟลักซ์จากแหล่งกำเนิดแบบ Isotropic



รูปที่ 2.3 การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียมกับสถานีภาคพื้นดิน

2.5 การมอดูเลตและการดีมอดูเลต (Modulation and Demodulation)

คุณสมบัติของสัญญาณ เช่น ขนาด ความถี่ หรือมุมเฟส สามารถที่จะใช้วิธีมอดูเลตแบบดิจิทัลได้แต่ เฟสมอดูเลต (Phase Modulation) เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุดในการสื่อสารดาวเทียม ซึ่งเรียกว่า Phase Shift Keying (PSK) การมอดูเลตแบบ M-Phase PSK จะสร้างความต่างเฟส M สถานะตามค่าของแรงแค้นมอดูเลต นอกจากนั้นยังมี Phase Shift Keying (PSK) อีกแบบคือ Differential PSK ซึ่งขึ้นกับการเปลี่ยนสถานะของแรงแค้นมอดูเลต ความสัมพันธ์ระหว่างสถานะ M กับจำนวนบิต N_b มีดังนี้

$$N_b = \log_2 M \tag{2-12}$$

ความแตกต่างระหว่างการมอดูเลตแบบดิจิทัลกับการเข้ารหัสแบบดิจิทัล ไม่สามารถแยกแยะออกจากกันได้ชัดเจน แต่การเข้ารหัสจะมีบิตเพิ่มเติมเพื่อทำการ Forward Error Correction (FEC) เพื่อแก้ไขความผิดพลาดในการส่งข้อมูลแล้วจึงทำการมอดูเลต แต่ในกระบวนการมอดูเลตก็มีการเพิ่มเติมบิตความผิดพลาด

2.6 บิตและอัตราความผิดพลาด

ค่าพารามิเตอร์ของการเชื่อมโยงทางดิจิทัลที่สำคัญ ได้แก่ อัตราความผิดพลาดของบิต (Bit Error Rate หรือ BER) และมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต (Bit Error Probability หรือ PB) ซึ่งมีความหมายถึงความน่าจะเป็นของบิตที่ส่งไปแล้วทำการรับไม่ถูกต้อง เช่น ถ้า $BER = 1 \times 10^{-4}$ แสดงว่าส่งไป 10,000 บิตแล้วเกิดความผิดพลาด 1 บิต จะเห็นได้ว่า BER ก็เป็นเครื่องชี้คุณภาพของการสื่อสารระบบดิจิทัล

ความผิดพลาดของสัญลักษณ์ เกิดจากสัญญาณรบกวนเทอร์มัล (Thermal Noise) ส่งผลกระทบต่อสัญญาณจากภายนอกและจากภายในวงจรเอง ถ้าพิจารณาเฉพาะสัญญาณรบกวนเทอร์มัล ค่าอัตราความผิดพลาดของสัญลักษณ์ (Symbol Error Rate หรือ SER อาจเรียกว่า Symbol Error Probability หรือ PE) จะสามารถคำนวณได้จาก E_s/N_o หรือพลังงานต่อสัญลักษณ์ในหน่วย Joules หารด้วยความหนาแน่นกำลังของสัญญาณรบกวนในหน่วย W/Hz วัดที่แบนด์วิดท์ IF ที่ด้านขาเข้าของดีมอดูเลเตอร์ ถ้าค่า E_s/N_o ยิ่งสูงแสดงว่า SER มีค่าน้อย

ถ้าให้ C เป็นกำลังของคลื่นพาห้ซึ่งส่งในระหว่างคาบของสัญลักษณ์ (T_s) พลังงานที่ได้รับใน 1 คาบเวลาของสัญลักษณ์ คือ

$$E_s = CT_s = C/R_s \quad (2-13)$$

โดยที่ R_s คืออัตราสัญลักษณ์ ในหน่วยสัญลักษณ์ต่อวินาที

ค่าความหนาแน่นสัญญาณรบกวน (Noise Density หรือ N_o) เป็นค่ากำลังของสัญญาณรบกวนที่ได้รับ (N) หารด้วยแบนด์วิดท์ที่ขาเข้าของตัวดีมอดูเลเตอร์

$$N_o = N/B \quad (2-14)$$

ดังนั้นจะได้

$$\frac{E_s}{N_o} = \frac{C}{N} \cdot \frac{B}{R_s} \quad (2-15)$$

ถ้าหากใช้วงจรกรองแบบ Square-Root Nyquist Cosine มีแบนด์วิดท์ ของสัญญาณรบกวน B เท่ากับอัตราสัญลักษณ์ R_s ดังนั้น การออกแบบทางด้านรับด้วยเครื่องกรองชนิดนี้ทำให้ ISI เป็นศูนย์ และมี $BT = 1$ ซึ่งเราสามารถใช่วงจรกรองแบบ Butterworth หรือ Chebychev ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงที่จะทำให้ BT เข้าใกล้ 1 ได้

สำหรับ Binary Phase Shift Keying (BPSK) บิตและความผิดพลาดของสัญลักษณ์มีค่าเท่ากัน ในขณะที่การมอดูเลชันอื่นๆ ที่ M มากกว่า 2 มีความสัมพันธ์ระหว่าง PB และ PE ดังสมการ

$$PB = \frac{1}{2} \frac{PE}{1 - 2^{-N_b}} \quad (2-16)$$

สำหรับ PE มีค่าน้อยกว่า 1 มากๆ สมการจะเป็น

$$PB = \frac{\ln 2}{\ln M} PE = \frac{PE}{\log_2 M} \quad (2-17)$$

2.7 Binary Phase Shift Keying (BPSK)

ในระบบ BPSK สัญญาณบิต 2 ค่าจะทำให้เฟสของคลื่นพาห์เปลี่ยนไปเป็น $\pm 90^\circ$ ดังนั้นถ้าให้ u_i เป็นบิตที่ i เขียนสมการของคลื่นพาห์ที่ส่ง (v_c) ได้เป็น

$$v_c = V \cos(\omega_c t - u_i \pi/2) = Vu_i \sin(\omega_c t) \quad (2-18)$$

เมื่อ v_c เป็นคลื่นพาห์ที่ส่ง

จะเห็นได้ว่าคลื่นพาห์ที่ผ่านการมอดูเลตแบบ BPSK จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาด ในการหาสัญญาณมอดูเลตจะใช้วิธีเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณคลื่นพาห์ที่ได้รับกับสัญญาณอ้างอิง ซึ่งมีเฟสตรงกันกับคลื่นพาห์เมื่อยังไม่ถูกมอดูเลต ซึ่งจะสามารถทำได้โดยใช้ Product Detector ซึ่งใช้คลื่นที่มีความถี่เดียวกันกับคลื่นที่ได้รับเป็นสัญญาณอ้างอิงซึ่งเรียกว่า Coherent Detection

ในการหาความน่าจะเป็นในการเกิดอัตราความผิดพลาดสัญญาณ ทำได้โดยสมมติให้สัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณเป็นแบบ Gaussian Distribution มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1 ถ้าสมมติให้ $u_i = 1$ ที่เวลาใดๆ ดังนั้น

$$v_o = n(t) - V \quad (2-19)$$

ถ้า v_o เป็นบวก วงจรจะแสดงค่า $u_i = 1$ ซึ่งจะเกิดเมื่อ $n(t) > V$ ซึ่ง

$$P(N > V) = PE = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{V}{\sigma\sqrt{2}}\right) \quad (2-20)$$

โดยที่ $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\pi} \int_x^\infty e^{-u^2} du$

ถ้าให้คาบของสัญญาณเป็น T_s จะได้กำลังในคลื่น 1 คาบเป็น

$$E_s = \frac{V^2}{2R} T_s \quad (2-21)$$

สมมติว่าใช้วงจรกรองแบบ Matched Filter ในเครื่องรับ

$$V = \sqrt{\frac{2RE_s}{T_s}} \quad (2-22)$$

และค่ากำลังของสัญญาณรบกวนที่มีการกระจายข้างต้นจะเขียนได้เป็น $\frac{\sigma^2}{R}$ ดังนั้น ความหนาแน่นของสัญญาณรบกวน (N_o) ขณะที่วงจรกรองมีแบนด์วิดท์ $1/T_s$

$$N_o = \frac{\sigma^2}{R} T_s \quad \text{โดยที่ } \sigma = \sqrt{\frac{RN_o}{T_s}} \quad (2-23)$$

$$\text{และ } PE = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\frac{\sqrt{2RE_s/T_s}}{\sqrt{RN_o/T_s}} \frac{1}{\sqrt{2}}\right] = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left[\sqrt{\frac{E_s}{N_o}}\right]$$

สำหรับ BPSK ค่าบิตและความผิดพลาดสัญลักษณ์เป็นค่าเดียวกันดังนี้

$$PB = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{E_b/N_o}\right) \quad (2-24)$$

สำหรับสัญญาณอ้างอิงที่ใช้อาจจะสร้างจากสัญญาณที่ได้รับ โดยใช้วงจร Carrier Recovery ซึ่งใช้หลักการของ Phase Locked Loop แต่ภายในวงจร Carrier Recovery จะมีความไม่ชัดเจนของเฟสอยู่ 180° ซึ่งเป็นผลทางตรรก “0” และ “1” สลับกัน การแก้ไขมีหลายทาง เช่น การใช้เทคนิคการเข้ารหัส และการใส่วงจร Phase Shifter เป็นต้น

2.8 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

ในระบบนี้ เฟสของคลื่นพาห้ ϕ จะถูกทำให้ต่างกัน 4 สถานะของสัญญาณมอดูเลต ซึ่งเราสามารถเขียนสมการของคลื่นพาห้ได้เป็น

$$v = V\sqrt{2} \cos(\omega_c t - \phi) \quad (2-25)$$

เมื่อ v_c เป็นคลื่นพาห้ที่ส่ง

โดยที่ ϕ แทนค่า $\frac{\pi}{4}$ $\frac{3\pi}{4}$ $\frac{5\pi}{4}$ และ $\frac{7\pi}{4}$ radian เมื่อใช้เอกลักษณ์ทางตรีโกณมิติแล้ว จะเขียนสมการได้เป็นสมการของคลื่นพาห้ได้เป็น

$$v = V\sqrt{2} \cos \omega_c t \cos \phi + V\sqrt{2} \sin \omega_c t \sin \phi \quad (2-26)$$

เทอมแรกคือ BPSK ที่มีเฟสเดียวกันกับคลื่นพาห้ เทอมที่สองจะมีเฟสต่างกับคลื่นพาห้ เราเรียกว่า I และ Q Channel ตามลำดับ ดังนั้น QPSK สามารถเขียนให้อยู่ในรูป BPSK 2 พจน์ที่ต่างกันคือ

$$v = u_I V \cos \omega_c t + u_Q V \sin \omega_c t \quad (2-27)$$

โดย u_I และ u_Q แสดงค่า Binary ข้อมูลในช่วง I และ Q ตามลำดับ ตรรก 1 ทำให้ u_I หรือ u_Q เท่ากับ 1 ตรรก 0 ทำให้ u_I หรือ u_Q เท่ากับ 0 โดยมีความสัมพันธ์ระหว่าง u_I และ u_Q เขียนได้เป็น

$$u_I = \sqrt{2} \cos \phi \quad \text{และ} \quad u_Q = \sqrt{2} \sin \phi \quad (2-28)$$

ซึ่งอาจแปลความหมายได้ว่า ϕ เป็นมุมเฟสของค่าจริงเป็น u_I และค่าจินตภาพเป็น u_Q บิต u_I และ u_Q อาจจะถูกเลือกสลับกันจากบิตด้านขาเข้าได้ เช่น u_I แสดงบิตเลขคู่ และ u_Q แสดงบิตเลขคี่ เป็นต้น

ตัวมอดูเลเตอร์และตัวดีมอดูเลเตอร์ของ QPSK โดยพื้นฐานแล้วคือ ช่องสัญญาณคู่ของตัวมอดูเลเตอร์และตัวดีมอดูเลเตอร์ของ BPSK ช่องสัญญาณหนึ่งใช้ประมวลผล u_I และใช้คลื่นพาห้อ้างอิง อีกช่องสัญญาณหนึ่งประมวลผล u_Q และใช้คลื่นพาห้ที่มีเฟสต่างจากคลื่นพาห้อ้างอิงช่องแรก 90°

จากความผิดพลาดที่เกิดขึ้น

$$PE = 2P_A = \operatorname{erfc}\left(\frac{v}{\sigma\sqrt{2}}\right) \quad (2-29)$$

เราจะคำนวณอัตราความผิดพลาดบิตได้โดยคิดในกรณีที่มี 2 บิตต่อ 1 สัญลักษณ์ โดยมี $E_s = 2E_b$ ทำให้ $PB = 0.5PE$ และ

$$PB = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}}\right) \quad (2-30)$$

ดังนั้น จะเห็นว่า QPSK และ BPSK มีค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate) เดียวกัน สำหรับค่า E_b/N_o เดียวกัน เพื่อเป็นการเปรียบเทียบ QPSK และ BPSK ที่มีการส่งบิตเป็น R_o บิตต่อวินาที ด้วยแบนด์วิดท์คงที่ B และค่า C/N เดียวกัน

สำหรับ QPSK นั้น $R_s = R_o/2$

$$\left[\frac{E_s}{N_o}\right]_{QPSK} = \frac{C}{N} \frac{B_{QPSK}}{R_s} = \frac{C}{N} \frac{2B}{R_o} \quad (2-31)$$

สำหรับ BPSK $R_s = R_o$

$$\left[\frac{E_s}{N_o}\right]_{BPSK} = \frac{C}{N} \frac{B_{BPSK}}{R_s} = \frac{C}{N} \frac{2}{R_o} \quad (2-32)$$

และจาก

$$PB_{BPSK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{B}{R_o} \frac{C}{N_o}}\right) \quad (2-33)$$

ดังนั้น

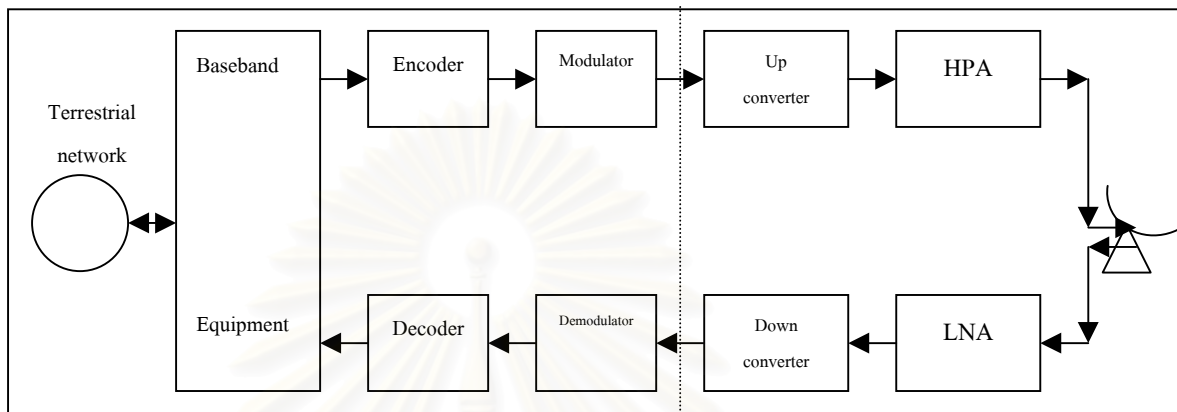
$$PB_{QPSK} = \frac{1}{2} PB_{BPSK} = \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{BC}{R_o N}}\right) \quad (2-34)$$

ดังนั้น QPSK จะมีค่า BER สูงกว่า BPSK เมื่อเปรียบเทียบกันโดยอัตราบิต แบนด์วิดท์ และ C/N เท่ากัน แต่ QPSK ส่งข้อมูลในรูปบิตได้เป็น 2 เท่าของ BPSK ที่แบนด์วิดท์ RF เดียวกัน ดังนั้น QPSK จึงมีความจุในการส่งข่าวสารเป็น 2 เท่าของ BPSK แต่มีความซับซ้อนกว่า

2.9 สถานีภาคพื้นดิน (Earth Station)

ระบบดาวเทียม ประกอบด้วยตัวดาวเทียมซึ่งลอยอยู่ในอวกาศที่จะติดต่อกับสถานีภาคพื้นดิน (Earth Station) หลายๆ สถานีบนพื้นดิน โดยผู้ส่งต้องนำสัญญาณความถี่เบสแบนด์ที่ต้องการส่งไปยังวงจรที่ทำหน้าที่ตัดตอนให้สัญญาณนี้ถูกส่งไปยังดาวเทียมผ่านทางสถานีภาคพื้นดิน ที่สถานีภาคพื้นดิน สัญญาณเบสแบนด์จะถูกมอดูเลตโดยความถี่วิทยุ (Radio Frequency หรือ RF) เพื่อส่งไปยังดาวเทียม เราอาจเปรียบเทียบดาวเทียมเสมือนกับสถานีทวนสัญญาณขนาดใหญ่ในอวกาศเนื่องจาก

โลกเป็นทรงกลม โดยจะรับสัญญาณ RF ที่ถูกมอดูเลตจากสถานีภาคพื้นดินในความถี่ขาขึ้น และขยายแล้วส่งกลับมายังโลกในความถี่ขาลง ซึ่งมีความถี่ต่างจากความถี่ขาขึ้น เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนกัน จากนั้นสถานีภาคพื้นดินจะแปลงความถี่ RF ที่ได้รับกลับมาเป็นสัญญาณความถี่เบสแบนด์ ครั้งหนึ่งแล้วผ่านวงจรตัดต่อให้ออกไปยังผู้ใช้บริการ



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของสถานีภาคพื้นดิน

จากรูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของสถานีภาคพื้นดินในระบบดิจิทัล สัญญาณดิจิทัลจะอยู่ในรูปเลขฐานสองจากวงจรตัดต่อจะเข้าไปยังด้านส่งของสถานีภาคพื้นดิน และถูกดำเนินการต่างๆ เช่นการมัลติเพล็กซ์ เป็นต้นโดยอุปกรณ์ย่านความถี่เบสแบนด์ เพื่อที่จะสามารถส่งข้อมูลต่างๆ ไปยังดาวเทียมได้อย่างเหมาะสม สัญญาณรบกวนและความไม่เป็นอุดมคติของช่องสัญญาณสื่อสารต่างๆ จะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้ในข่าวสารที่ถูกส่งออกไป และจะเป็นตัวจำกัดอัตราการส่งข้อมูล ถ้าอัตราความผิดพลาดของข้อมูลนี้เกินกว่าที่จะยอมรับได้ ก็จะมีการใส่รหัสเลขฐานสองไปยังสายข้อมูล บิตพิเศษเหล่านี้ไม่มีข่าวสารแต่อย่างใด แต่จะใช้เพื่อลดอัตราการผิดพลาดของข้อมูล และแก้ไขข้อมูลให้ถูกต้อง

เพื่อที่จะส่งสัญญาณข่าวสารดิจิทัลความถี่เบสแบนด์ ผ่านไปยังช่องสัญญาณดาวเทียม เราจึงจำเป็นต้องแปลงข้อมูลเหล่านี้ให้อยู่ในรูปของคลื่นพาห้ในความถี่ที่เหมาะสมสำหรับช่องสัญญาณ วิธีการนี้เรียกว่าการมอดูเลตเข้ากับคลื่นพาห้แบบดิจิทัล (Digital Carrier Modulation) หน้าที่ของตัวมอดูเลเตอร์คือ รับสายข้อมูลจากตัวอักษรเข้ารหัสและมอดูเลตไปยังสัญญาณความถี่ IF (Intermediate Frequency) ในการสื่อสารผ่านดาวเทียมนั้น ความถี่ IF จะมีค่า 70 MHz สำหรับช่องสัญญาณที่ใช้ทรานส์พอนเดอร์กว้าง 36 MHz และความถี่ IF 140 MHz สำหรับช่องสัญญาณที่ใช้ทรานส์พอนเดอร์กว้าง 54 MHz หรือ 72 MHz การที่ต้องมีความถี่ IF ก่อนนั้นเพื่อลดความยุ่งยากในการสร้างเครื่องมอดูเลเตอร์ความถี่ RF โดยตรง เนื่องจากการสร้างเครื่องขยายที่ความถี่สูงมากๆ นั้นเป็นไปได้ยากและเสียค่าใช้จ่ายสูง

ในภาครับนั้น สายอากาศจะรับสัญญาณ RF ขนาดเล็กมาจากดาวเทียม เราจึงต้องขยายสัญญาณนี้ด้วยภาคสัญญาณที่มีระดับของสัญญาณรบกวนต่ำ (Low Noise Amplifier หรือ LNA) เพื่อให้ค่า S/N (Signal-to-Noise Ratio) ของสัญญาณดีขึ้น ค่าบิดผิดพลาดจึงลดน้อยลง ภาคแปลงความถี่สัญญาณขาลงจะรับสัญญาณ RF ที่ถูกขยายแล้วมาเปลี่ยนเป็นความถี่ IF เนื่องจากขั้นตอนของสัญญาณที่ถูกเก็บออกมาจากภาคดีมอดูเลเตอร์อาจมีข้อผิดพลาด ดังนั้นตัวถอดรหัสต้องมีรหัสเดียวกับตัวเข้ารหัส ซึ่งจะมีความสามารถในระดับหนึ่งในการแยกแยะสัญญาณข่าวสารหรือสัญญาณรบกวน

ในทางปฏิบัติ เราสามารถแบ่งสถานีภาคพื้นดินออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ

1. ส่วนของความถี่ RF ซึ่งประกอบด้วยตัวแปลงความถี่ขึ้นและตัวแปลงความถี่ลง (Up Converter และ Down Converter) ภาคขยายสัญญาณ RF ที่มีกำลังสูง (High Power Amplifier หรือ HPA) ภาคขยายสัญญาณ RF ที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ (Low Noise Amplifier หรือ LNA) และสายอากาศ
2. ส่วนของความถี่เบสแบนด์ ประกอบด้วย อุปกรณ์เบสแบนด์ต่างๆ เช่นตัวเข้ารหัส (Encoder) ตัวถอดรหัส (Decoder) ตัวมอดูเลต (Modulator) และตัวดีมอดูเลต (Demodulator)

2.10 งานสายอากาศ

สายอากาศที่ใช้ในสถานีภาคพื้นดินเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญอย่างหนึ่งในส่วนของอุปกรณ์ความถี่ RF เพราะสายอากาศจะทำหน้าที่แพร่กระจายคลื่น RF ที่ถูกมอดูเลตแล้วไปยังดาวเทียมที่ความถี่ขาขึ้น และทำหน้าที่รับคลื่น RF จากดาวเทียมที่ความถี่ขาลง สายอากาศที่สถานีภาคพื้นดินต้องมีคุณสมบัติพื้นฐาน 3 ประการ

1. ต้องมีทิศทางสูง (Highly Directive Gain) คือมีลำ (Beamwidth) ที่แคบทั้งในการส่งและรับนอกจากนั้นต้องมี Sidelobe น้อยเพื่อลดการรบกวนกันกับสัญญาณที่ไม่ต้องการ
2. ต้องมีค่า Noise Temperature ต่ำ เพื่อสัญญาณที่รับจะได้ค่า S/N สูง
3. ต้องมีความเที่ยงตรงสูงต่อสัญญาณที่ได้รับ คือใช้ระบบ Tracking System ที่มีการควบคุมการเลื่อนสายอากาศไปตามตำแหน่งที่มีสัญญาณแรงที่สุด

2.10.1 อัตราขยายของสายอากาศ

อัตราขยายของสายอากาศหาได้โดย

$$G = \frac{4n\pi A}{\lambda^2} = \frac{4n\pi A f^2}{c^2} \quad (2-35)$$

โดยที่ A เป็นพื้นที่หน้าตัดของจานสายอากาศ (m^2)
 λ เป็นความยาวคลื่น (m)
 f เป็นความถี่ (Hz)
 c เป็นความเร็วแสง (m/s)
 และ n เป็นประสิทธิภาพพื้นที่ของสายอากาศ
 สำหรับสายอากาศที่มีหน้าคลื่นเป็นพื้นที่รูปวงกลม จะได้พื้นที่

$$A = \pi D^2 / 4 \quad (2-36)$$

โดยที่ D เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของสายอากาศ ดังนั้นอัตราขยายจะเป็น

$$G = n(\pi D / \lambda)^2 \quad (2-37)$$

$$= n(\pi f D / c)^2 \quad (2-38)$$

2.11 ภาคขยาย HPA (High Power Amplifier)

ภาคขยาย HPA มีอยู่ 2 แบบ คือ แบบที่ใช้หลอดไคลสตรอน (Klystron Power Amplifier) กับแบบที่ใช้คลื่นจร (Traveling Wave Tube Amplifier หรือ TWTA) แบบที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบันคือแบบที่ใช้คลื่นจร

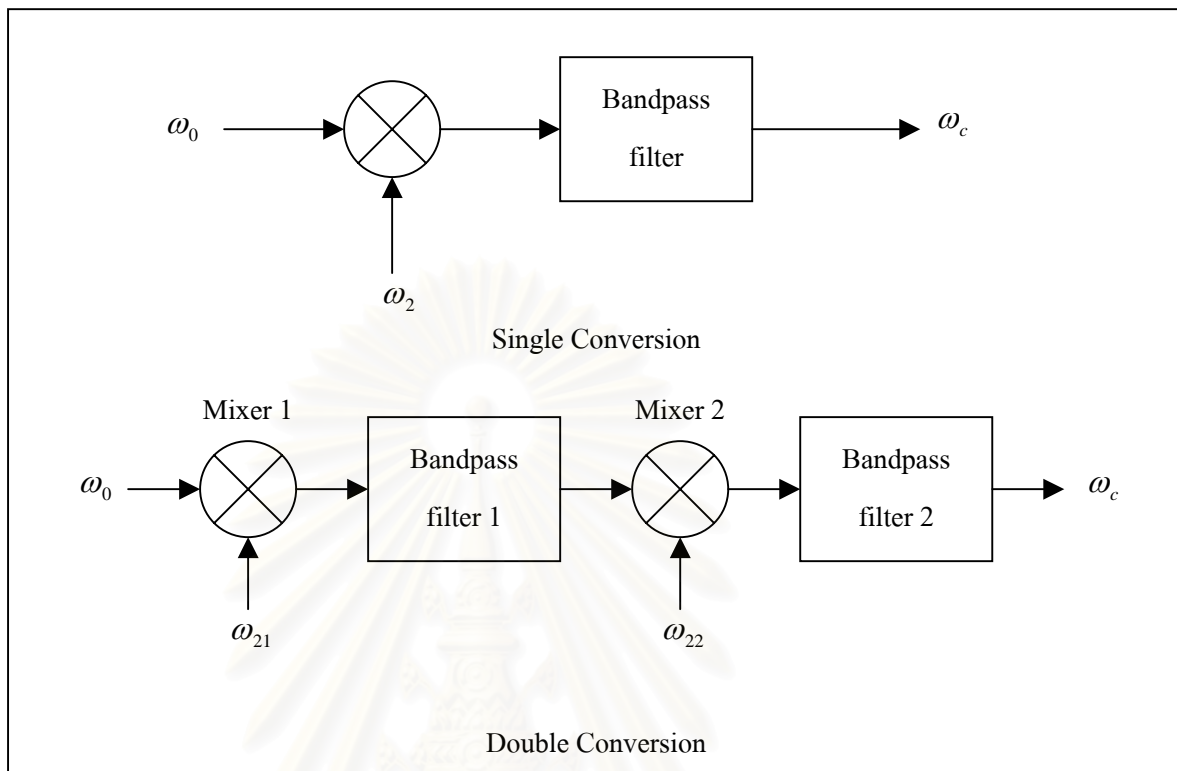
2.12 ภาคขยาย LNA (Low Noise Amplifier)

ภาคขยาย LNA (Low Noise Amplifier) ที่นิยมใช้มากที่สุดในสถานีดาวเทียมภาคพื้นดินคือ Parametric Amplifier และ GaAs FET Amplifier ภาคขยาย LNA แบบ Parametric Amplifier มีใช้ตั้งแต่ยุคแรกของการสื่อสารดาวเทียม ภาคขยาย LNA แบบนี้สามารถให้ค่า Noise Temperature ต่ำมากได้ อย่างไรก็ตาม ภาคขยาย LNA แบบ GaAs FET ก็ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยมีค่า Noise Temperature ที่ต่ำเช่นเดียวกันและมีข้อได้เปรียบคือ มีเสถียรภาพความเชื่อถือได้ดีกว่า อีกทั้งยังมีราคาที่ถูกกว่า ภาคขยาย LNA แบบ GaAs FET จึงนิยมใช้ในสถานีแบบรับอย่างเดียวในปัจจุบันซึ่งมีขนาดเล็ก

2.12.1 ภาค Up converter

ภาค Up converter เป็นตัวแปลงความถี่ขึ้นโดยนำเอาสัญญาณ IF (Intermediate Frequency) ความถี่ ω_0 มารวมกับสัญญาณจาก Local Oscillator ความถี่ ω_1 เป็นสัญญาณ RF ความถี่ ω_u การ

แปลงสัญญาณนี้สามารถทำได้ 2 แบบคือ Single-Conversion Process และ Dual-Conversion Process



รูปที่ 2.5 แผนผังของ Up Converter

กระบวนการแปลงความถี่ Single Conversion แสดงในรูป พิจารณาสัญญาณ IF $\cos(\omega_0 t + \phi)$ และสัญญาณ Local Oscillator (LO) $\cos \omega_1 t$ เมื่อสมมติให้ $\omega_1 > \omega_0$ กระบวนการจะให้ผลออกมาคือ

$$\cos(\omega_0 t + \phi) \cos \omega_1 t = (1/2) \cos[(\omega_1 - \omega_0)t - \phi] + (1/2) \cos[(\omega_1 + \omega_0)t + \phi] \quad (2-39)$$

เลือกให้ $\omega_1 + \omega_0 = \omega_u$ นั่นคือออกแบบให้ Local Oscillator กำเนิดสัญญาณความถี่ $\omega_1 = \omega_u - \omega_0$ และเมื่อสัญญาณตามสมการ (2-39) ผ่านวงจรกรอง Bandpass ก็จะได้สัญญาณความถี่ $\omega_1 + \omega_0$ ซึ่งก็คือ ω_u ตามต้องการ ต่อไปพิจารณากระบวนการแปลง 2 ชั้น ชั้นแรกจะแปลงสัญญาณ IF $\cos(\omega_0 t + \phi)$ โดยสัญญาณ Local Oscillator ตัวแรกคือ $\cos \omega_{11} t$ โดยสมมติให้ $\omega_{11} > \omega_0$ จะได้

$$\cos(\omega_0 t + \phi) \cos \omega_{11} t = (1/2) \cos[(\omega_{11} - \omega_0)t - \phi] + (1/2) \cos[(\omega_{11} + \omega_0)t + \phi] \quad (2-40)$$

สัญญาณนี้เมื่อผ่านวงจรกรอง Bandpass ตัวแรกจะได้สัญญาณ $\cos[(\omega_{11} + \omega_0)t + \phi]$ ออกมา และสัญญาณที่ได้จะนำมารวมกับสัญญาณ Local Oscillator ที่สองคือ $\cos \omega_{12} t$ โดยสมมติให้ $\omega_{12} > \omega_{11} + \omega_0$ จะได้

$$\cos[(\omega_{11} + \omega_0)t + \phi] \cos \omega_{12} t = (1/2) \cos[(\omega_{12} - \omega_{11} - \omega_0)t - \phi]$$

$$+ (1/2)\cos[(\omega_{12} + \omega_{11} + \omega_0)t + \phi] \quad (2-41)$$

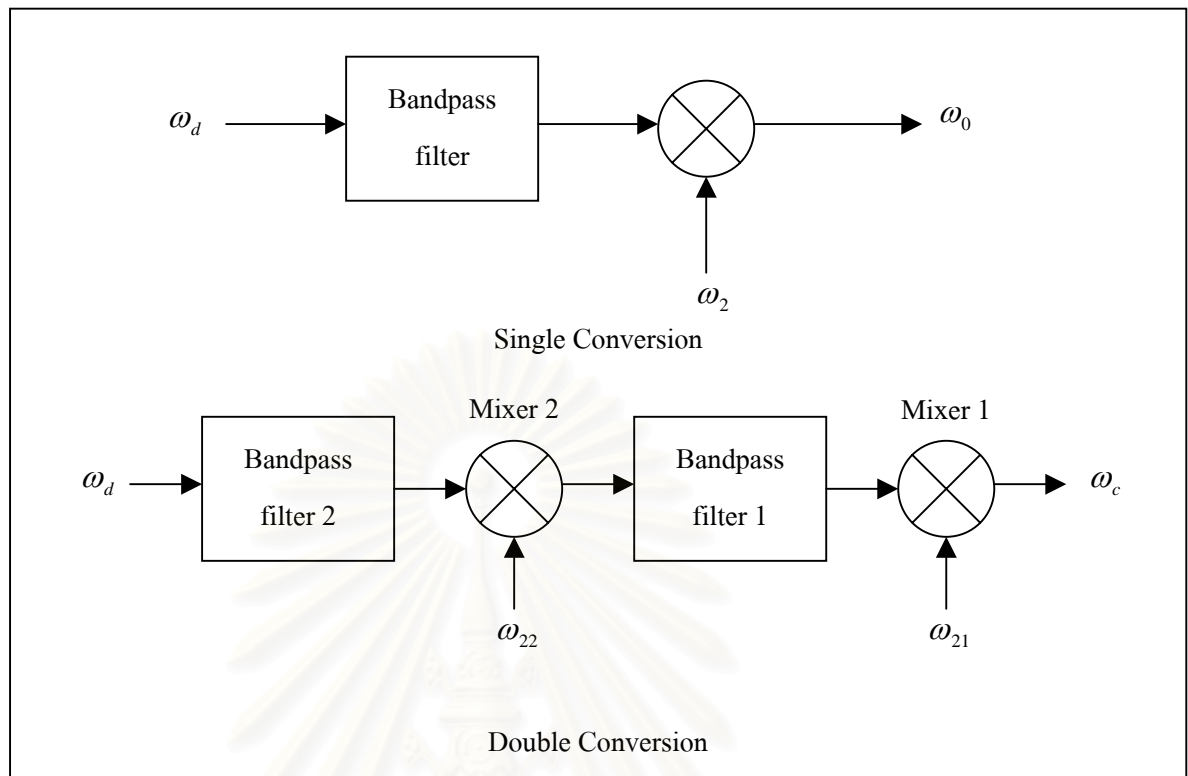
สัญญาณนี้เมื่อผ่านวงจรกรอง Bandpass ชุดที่สองแล้ว จะได้สัญญาณ $\cos[(\omega_{12} + \omega_{11} + \omega_0)t + \phi]$ ออกมาซึ่งหมายถึงว่า $\omega_{11} + \omega_{12}$ สามารถถูกเลือกให้สอดคล้องกับเงื่อนไข $\omega_{11} + \omega_{12} = \omega_u - \omega_0$ ได้เมื่อ $\omega_{12} > \omega_{11} + \omega_0$ และ $\omega_{11} > \omega_0$

ในกระบวนการแปลงขึ้นเดี่ยวนั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อต้องการเปลี่ยนแปลงความถี่สัญญาณ RF คือ ω_u จะต้องเปลี่ยนความถี่ ω_1 ของสัญญาณจาก Local Oscillator คือสัญญาณ LO และต้องเปลี่ยนแถบความถี่ของวงจรกรอง Bandpass การเปลี่ยนคุณสมบัติของวงจรกรอง Bandpass ดังกล่าวทำได้ยากและไม่เป็นที่นิยมกัน จึงใช้การแปลงแบบ 2 ชั้นเพื่อให้ระบบยืดหยุ่นกว่า พิจารณาจาก เมื่อให้สัญญาณ IF ตัวที่สองซึ่งมีความถี่ $\omega_{11} + \omega_0$ คงที่ และถูกเลือกให้มีค่าใหญ่กว่าความกว้างของแบนด์วิดท์ของสัญญาณ RF คือ $\omega_{u,max} - \omega_{u,min}$ ซึ่งปกติมีค่า 500 MHz ที่ C-Band (5.9 GHz – 6.4 GHz) และที่ความถี่ Ku-Band (14 GHz – 14.5 GHz) ดังนั้นความถี่ Lower Sideband ที่ไม่ต้องการคือ $\omega_{12} - \omega_{11} - \omega_0$ ก็จะมีค่านอกเหนือแถบความถี่ของสัญญาณ RF ที่ได้เสมอ โดยลักษณะนี้ทำได้โดยการออกแบบวงจรกรอง Bandpass ตัวที่สองให้ความถี่ RF ที่ได้ครอบคลุมแถบความถี่ของสัญญาณขาขึ้นทั้งหมด และเมื่อต้องการเปลี่ยนแปลง ω_u ก็จะได้ทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงค่า ω_{12} เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

2.12.2 ภาค Down Converter

ภาค Down Converter จะรับสัญญาณ RF จากภาคขยาย LNA และแปลงสัญญาณ RF ความถี่ ω_u ไปเป็นสัญญาณ IF ความถี่ ω_0 ภาค Down Converter มีสองแบบเหมือนภาค Up Converter คือ Single-Conversion Process และ Dual-Conversion Process ดังแสดงในรูปที่ 2.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.6 แผนผังของ Down Converter

กระบวนการแปลงความถี่

การแปลงความถี่ชั้นเดียว (Single-Conversion Process) ไม่ค่อยจะมีใช้ในสถานีภาคพื้นดิน นอกจากสถานีที่ต้องการความประหยัด สำหรับการแปลงความถี่สองชั้น (Dual-Conversion Process) พิจารณาการแปลงสัญญาณ RF $\cos(\omega_d t + \phi)$ ในขั้นแรกโดยใช้สัญญาณ Local Oscillator $\omega_{12} t$ โดยสมมติให้ $\omega_{12} < \omega_d$ จะได้

$$\begin{aligned} \cos(\omega_d t + \phi) \cos \omega_{12} t &= (1/2) \cos[(\omega_d - \omega_{12})t + \phi] \\ &+ (1/2) \cos[(\omega_d + \omega_{12})t + \phi] \end{aligned}$$

เมื่อผ่านวงจรกรอง Bandpass แล้วจะเหลือแต่ Lower Sideband คือ $(1/2) \cos[(\omega_d - \omega_{12})t + \phi]$ และจะถูกแปลงอีกครั้งโดยสัญญาณ Local Oscillator $\cos \omega_{11} t$ เพื่อให้ $\omega_{11} < \omega_d - \omega_{12}$ จะได้

$$\begin{aligned} \cos[(\omega_d - \omega_{12})t + \phi] \cos \omega_{11} t &= (1/2) \cos[(\omega_d - \omega_{12} - \omega_{11})t + \phi] \\ &+ (1/2) \cos[(\omega_d - \omega_{12} + \omega_{11})t + \phi] \end{aligned}$$

เมื่อสัญญาณ IF ที่ได้เป็นสัญญาณ Lower Sideband $\cos[(\omega_d - \omega_{12} - \omega_{11})t + \phi]$ และจะได้ความถี่ IF $\omega_0 = \omega_d - \omega_{12} - \omega_{11}$ ความถี่ Local Oscillator ทั้งสองคือ ω_{11} และ ω_{12} จะถูกเลือกเพื่อให้สอดคล้องกับเงื่อนไข $\omega_{11} + \omega_{12} = \omega_d - \omega_0$ เมื่อ $\omega_{12} < \omega_d$ และ $\omega_{11} < \omega_d - \omega_{12}$

2.13 การตรวจสอบและควบคุม

การตรวจสอบและควบคุมมีไว้เพื่อให้ระบบมีความเชื่อถือได้สูงจากลักษณะ Redundancy โดยจะทำการตรวจสอบว่าอุปกรณ์ เช่น ภาค HPA ภาค LNA ภาค Up Converter และภาค Down Converter ว่าตัวใดใช้การไม่ได้เมื่อพบว่าตัวใดตัวหนึ่งชำรุด ก็จะนำเครื่องสำรองมาใช้แทนโดยทำการสับสวิตช์อัตโนมัติ

ในเครือข่ายดาวเทียมที่มีสถานีดาวเทียมอยู่เป็นจำนวนมากจะมีศูนย์ควบคุมเครือข่าย (Network Control Center หรือ NCC) การตรวจสอบและควบคุมจะมีความสำคัญอย่างยิ่งและมีระดับการตรวจสอบอุปกรณ์ดังนี้

1. ตรวจสอบและควบคุมอุปกรณ์ย่านความถี่ RF ต่าง ๆ
2. ตรวจสอบและควบคุมอุปกรณ์ย่านความถี่เบสแบนด์ต่าง ๆ
3. ตรวจสอบและควบคุมสถานีทั้งหมดจากศูนย์ควบคุมเครือข่ายผ่านทางช่องสื่อสารดาวเทียมโดยใช้โทรศัพท์สำรองที่ภาคพื้นดิน การตรวจสอบและควบคุมกรณีนี้เป็นการทำจากระยะไกล ๆ

ความสามารถของระบบตรวจสอบควบคุม มีดังนี้

- รวบรวมข้อมูลและสถานะต่างๆ สำหรับการจัดหมวดหมู่
- ขนถ่ายข้อมูลสถานะเหล่านี้ไปยัง Network Operators
- แปลค่าความหมายข้อมูลสถานะ
- แยกอุปกรณ์ที่ทำงานผิดพลาดออก
- สวิตช์ไปยังอุปกรณ์สำรองตามคำสั่ง
- ขนถ่ายคำสั่งควบคุมไปยังอุปกรณ์ย่านความถี่เบสแบนด์ สำหรับควบคุม Traffic หรือตำแหน่งของสายอากาศ
- พร้อมที่จะตรวจสอบอุปกรณ์ตลอดเวลา

2.14 ความน่าเชื่อถือของระบบ

ถ้าสมมติว่าความผิดพลาดเกิดอย่างสุ่ม (Random) ความน่าจะเป็นที่ระบบจะทำงานเป็นเวลานานจนถึงเวลา t

$$R(t) = \exp(-pt) \quad (2.42)$$

โดยที่ p เป็นอัตราเฉลี่ยของความผิดพลาด การหาค่าเวลาเฉลี่ยก่อนการผิดพลาดของระบบ (Mean Time of Failure, MTTF) หาได้จาก

$$MTFF = \int_0^{\infty} -tdR(t) \quad (2.43)$$

ถ้าหลายๆ ระบบถูกนำมาต่อกันในลักษณะการต่อเรียงกัน (Cascade) เมื่อตัวใดตัวหนึ่งเสีย ระบบทั้งระบบจะเกิดการผิดพลาด ดังนั้นความน่าเชื่อถือของระบบที่ต่อเรียงกัน ก็จะเป็นผลคูณของความน่าเชื่อถือของแต่ละตัวคูณกัน

$$R_c(t) = R_1(t)R_2(t) \dots R_n(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n p_i t\right) \quad (2.44)$$

ดังนั้น ค่าเวลา MTTF ของระบบจะเป็น

$$MTTF_c = -\int_0^{\infty} -tdR_c(t) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n p_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (MTTF_i)^{-1}} \quad (2.45)$$

โดยที่ $MTTF_i = 1/p_i$ และค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นของการผิดพลาดคือ

$$p_c = \sum_{i=1}^n p_i \quad (2.46)$$

ตัวอย่างของการต่อในลักษณะการต่อเรียงกัน (Cascade) ได้แก่ การต่อ LNA เข้ากับ Down Converter และการต่อ Up Converter เข้ากับ HPA

ในกรณีการต่อแบบขนาน จะทำงานได้ในตลอดเวลาที่ตัวใดตัวหนึ่งยังสามารถทำงานได้อยู่ ดังนั้นความน่าเชื่อถือของระบบคือ

$$R_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] = 1 - [1 - R(t)]^n = 1 - [1 - \exp(-pt)]^n \quad (2.47)$$

$$= \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} \binom{n}{i} \exp(-ipt) \quad (2.48)$$

โดยที่ $\binom{n}{i} = \frac{n!}{(n-i)!i!}$ จะได้เวลาเฉลี่ยก่อนการผิดพลาดคือ

$$MTTF_p = \int_0^{\infty} -tdR_p(t) = \sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} \binom{n}{i} \frac{1}{ip} \quad (2.49)$$

และค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นของการผิดพลาด

$$p_p = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (-1)^{i+1} \binom{n}{i} \frac{1}{ip}}$$

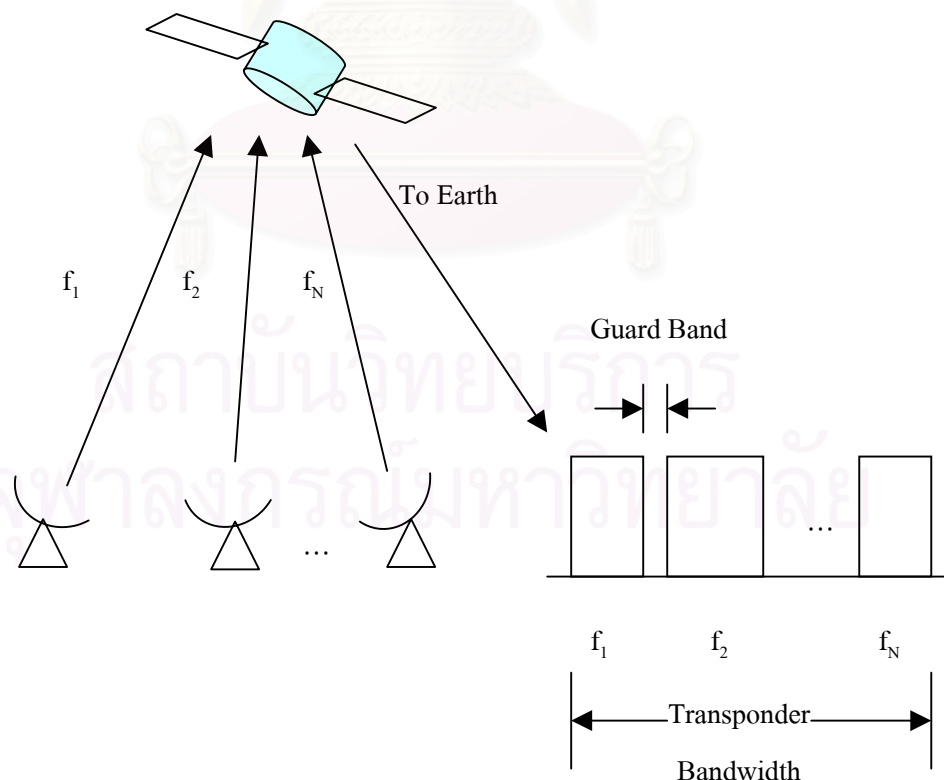
ตัวอย่างของการต่อแบบขนานได้แก่การต่อลักษณะ 1:1 (ใช้งาน 1 และสำรอง 1) และ 1:2 Redundancy ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความน่าเชื่อถือของระบบสูงกว่าแบบการต่อเรียงกัน (Cascade) แต่มีข้อเสียคือต้องเสียอุปกรณ์สำรองทำให้ต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบสูง

2.15 การเข้าถึงหลายทาง (Multiple Access)

การเข้าถึงหลาย (Multiple Access) สามารถแบ่งออกเป็นส่วนใหญ่ๆ ได้ 3 แบบ ได้แก่ การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access หรือ FDMA) การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access หรือ TDMA) และ การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access หรือ CDMA)

2.15.1 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access หรือ FDMA)

ซึ่งแต่ละสถานีภาคพื้นดินในระบบโครงข่ายดาวเทียมจะส่งสัญญาณคลื่นพาห์ ที่มีความถี่ศูนย์กลางต่างๆ กันไปในทรานส์พอนเดอร์ของดาวเทียม แต่ละความถี่จะถูกกำหนดแถบความถี่โดย Guard Band เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการทับกันระหว่างคลื่นพาห์ที่อยู่ติดกัน ทรานส์พอนเดอร์ของดาวเทียมจะรับคลื่นพาห์ทั้งหมดที่อยู่ในแบนด์วิดท์นั้นๆ ขยายแล้วส่งกลับสู่โลก ทรานส์พอนเดอร์สามารถเลือกคลื่นพาห์ที่จะแจกจ่ายไปให้สถานีภาคพื้นดินที่อยู่ในบีมของดาวเทียมของระบบ FDMA ในระบบนี้คลื่นพาห์สามารถใช้ได้ทั้งการมอดูเลตแบบอะนาลอก เช่น FM (Frequency Modulation) หรือ การมอดูเลตแบบดิจิทัล เช่น PSK (Phase Shift Keying)



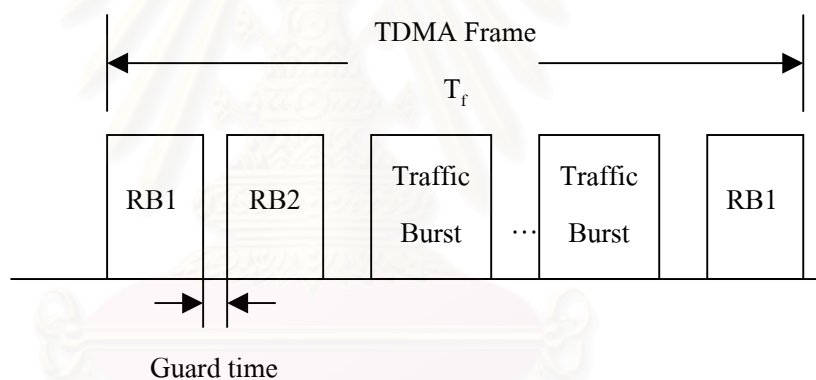
รูปที่ 2.7 การส่งข้อมูลในระบบ FDMA

2.15.2 การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access หรือ TDMA)

การเข้าถึงหลายทางที่สถานีภาคพื้นดินหลายๆ สถานีในโครงข่ายสื่อสารดาวเทียม โดยใช้คลื่นพาห้คลื่นเดียวร่วมกันในการส่งสัญญาณข้อมูลต่างๆ ผ่านทรานส์พอนเดอร์หนึ่งๆ ทุกๆ สถานีที่ใช้ทรานส์พอนเดอร์ร่วมกันจะได้รับให้อนุญาตให้ส่งติดต่อสื่อสารโดยใช้คลื่นพาห้ได้เฉพาะในช่วงเวลาที่ถูกจัดสรรมาให้เท่านั้น ดังนั้นในแต่ละสถานีจะต้องมีการเข้าจังหวะกัน (Synchronization) กัน เพื่อให้ข้อมูลจากสถานีทุกสถานีไปถึงทรานส์พอนเดอร์บนดาวเทียมโดยไม่ซ้อนทับ (Overlap) กัน แต่จะมีการเว้นช่วงเวลาให้เป็นไปตามที่กำหนดไว้

โครงสร้างของ TDMA

ในเครือข่ายของระบบ TDMA สถานีภาคพื้นดินแต่ละแห่งจะส่ง Burst ไปสู่ดาวเทียม สัญญาณขาเข้าที่เข้าสู่ทรานส์พอนเดอร์ของดาวเทียมจะประกอบด้วยกลุ่ม Burst ที่รับมาจากสถานีภาคพื้นดินแต่ละแห่ง กลุ่มของ Burst เหล่านี้จะประกอบกันเป็นเฟรม TDMA



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของ TDMA Frame

2.16 โพรโทคอลเข้าถึง (Access Protocol)

การแบ่งชนิดของโพรโทคอลเข้าถึงมีได้หลายแบบ เช่น แบ่งตามวิธีการควบคุม ซึ่งได้แก่ การใช้เทคนิคควบคุมแบบกระจาย (Distributed Control) การใช้เทคนิคควบคุมแบบศูนย์ (Centralized Control) และการแบ่งตามการเข้าใช้ช่องสัญญาณแบบสุ่มหรือแบบกำหนดล่วงหน้า เป็นต้น อย่างไรก็ตาม โดยทั่วไปชนิดของโพรโทคอลที่ใช้งานแบ่งออกได้เป็น Fixed Assignment, Random Access, Implicit Reservation, Explicit Reservation และ Hybrid Circuit/Packet Switching [12]

2.16.1 Fixed Assignment

ถือว่าเป็นโพรโทคอลที่มีความง่ายที่สุดสำหรับเครือข่ายดาวเทียมแบบสวิตท์กลุ่มข้อมูล วิธีการคือแบ่งเวลาของช่องสัญญาณออกเป็นเฟรม ในแต่ละเฟรมจะถูกแบ่งออกเป็นร่อง (Slot) ที่มีขนาดเท่าๆ กัน และแต่ละร่องก็จะถูกแบ่งให้กับแต่ละสถานีในระบบ โดยมีการกำหนดไว้ล่วงหน้า

2.16.2 Random Access

โพรโทคอลแบบนี้เป็นที่รู้จักโดยทั่วไป ได้แก่ Pure ALOHA หรือ Unslotted ALOHA วิธีการคือ การให้แต่ละสถานีในระบบเข้ามาแย่งชิงการใช้ช่องสัญญาณ ซึ่งทำให้กลุ่มข้อมูลหรือแพ็กเก็ตที่ส่งออกมาจากหลายๆ สถานีต้องเกิดการชนกันและสูญหายไปมากที่สุด สถานีที่ข้อมูลหรือแพ็กเก็ตของตนเองสูญหาย ต้องมีการส่งกลุ่มข้อมูลออกไปใหม่ และระยะเวลาในการรอที่จะส่งกลุ่มข้อมูลออกไปใหม่ของแต่ละสถานีต้องไม่เท่ากันทั้งนี้ เพื่อหลีกเลี่ยงการชนกันของกลุ่มข้อมูล ระยะเวลาดังกล่าวมีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง

ข้อแตกต่างระหว่าง Pure ALOHA และ Slotted ALOHA ก็คือ การเข้าถึงช่องสัญญาณของ Pure ALOHA นั้นสามารถทำได้ตลอดเวลาตามต้องการ ส่วน Slotted ALOHA ช่องสัญญาณจะถูกแบ่งออกเป็นร่อง (Slot) การใช้ช่องสัญญาณต้องรอเวลาเริ่มต้นของแต่ละร่องที่มาถึงเท่านั้น

2.16.3 Implicit Reservation

โพรโทคอลชนิดนี้ ได้แก่ Reservation ALOHA ซึ่งใช้วิธีการแบ่งช่องสัญญาณแบบ Slotted ALOHA ออกเป็นเฟรมเช่นเดียวกับวิธี Fixed-TDMA โดยอาศัยหลักการเบื้องต้น คือ การยอมให้สถานีที่มี Traffic ของใช้ช่องสัญญาณสูงสามารถที่จะใช้ร่อง (Slot) ได้มากกว่าหนึ่งร่องในแต่ละเฟรม ทั้งนี้ สถานีดังกล่าวไม่ต้องไปแย่งชิงการใช้ช่องสัญญาณกับสถานีอื่น เพราะถ้าการส่งกลุ่มข้อมูลของสถานีที่มี Traffic สูงยังไม่เสร็จสิ้นตำแหน่งของร่องที่ใช้ในเฟรมหนึ่งๆ ก็จะถูกกำหนดให้ใช้ได้ อีกในเฟรมถัดไป จนกว่ากลุ่มข้อมูลที่จะส่งนั้นหมดไป

2.16.4 Explicit Reservation

โพรโทคอลมีหลายชนิดที่สำคัญได้แก่

2.16.4.1 Reservation TDMA หรือ R-TDMA

มีวิธีการคล้ายคลึงกับวิธี Fixed TDMA ที่กำหนดช่องให้กับแต่ละสถานีไว้ล่วงหน้าอย่างถาวร แต่ต่างกันตรงที่เมื่อใดมีช่องใดไม่ถูกใช้โดยสถานีเจ้าของช่องดังกล่าว ก็จะถูกกำหนดให้กับสถานีอื่นที่มี Traffic ต้องการจะส่ง ในลักษณะที่แต่ละสถานีที่มี Traffic ต้องการจะส่งจะเข้ามาในช่องสัญญาณแบบเรียงลำดับ แต่ไม่ได้มีการกำหนดไว้ล่วงหน้าว่าใครจะใช้

2.16.4.2 C-PODA หรือ Contention Priority Oriented Demand Assignment C-PODA

ใช้วิธีแบ่งช่องของช่องสัญญาณให้กับผู้ใช้ โดยขึ้นอยู่กับ การจองช่องสัญญาณล่วงหน้าของผู้ใช้ ทั้งนี้ จะใช้ช่องสัญญาณแบบ Slotted ALOHA ในการจองช่องสัญญาณ กล่าวคือ ให้ผู้ใช้เข้ามาแย่งชิงการจองในช่วงเวลาที่กำหนดให้สำหรับการจองช่องสัญญาณ หรืออาจส่งสัญญาณการจองมาพร้อมกับกลุ่มข้อมูลที่ต้องการจะส่ง ซึ่งเรียกว่า Piggyback Reservation เมื่อสถานีเหล่านั้นจองช่องสัญญาณได้แล้ว ข่าวสารและเวลาที่ใช้ในการส่งที่ต้องการ C-PODA สามารถรับ/ส่งข้อมูลที่เป็น Datagram และ Stream ได้

2.16.5 Hybrid Circuit/Packet Switching

เครือข่ายผสม ก็คือ เครือข่ายที่อาศัยข้อได้เปรียบของการสื่อสารแบบสวิตท่วงจร (Circuit Switching) และการสื่อสารแบบสวิตท์กลุ่มข้อมูล (Packet Switching) ร่วมกัน ซึ่งอาศัยโพรโทคอลที่สำคัญได้แก่

2.16.5.1 PODA คือ โพรโทคอลที่ถูกออกแบบมาเพื่อรองรับความต้องการของเครือข่ายดาวเทียมแบบสวิตท์กลุ่มข้อมูล (Packet Switching) ในทุกรูปแบบ (General Purpose Packet Satellite Network, GPSN) กล่าวคือสามารถรับ/ส่ง ได้ทั้ง Datagram ซึ่งเหมาะกับข่าวสารจากคอมพิวเตอร์ และ Stream ซึ่งเหมาะกับสัญญาณเสียง ทั้งนี้โดยอาศัยเทคนิคของการสื่อสารแบบสวิตท่วงจร (Circuit Switching) และการสื่อสารแบบสวิตท์กลุ่มข้อมูล (Packet Switching) ร่วมกัน อย่างไรก็ตาม วิธีการของ PODA ก่อนข้างจะยุ่งยากซับซ้อน ทำให้ราคาของสถานีรับ/ส่งมีค่าสูง

2.16.5.2 Flexible Hybrid สำหรับวิธีการนี้ใช้เทคนิคการสื่อสารแบบสวิตท่วงจร (Circuit Switching) และการสื่อสารแบบสวิตท์กลุ่มข้อมูล (Packet Switching) ร่วมกัน โดยที่สัญญาณเสียงและสัญญาณข้อมูลที่มีการโต้ตอบกันอยู่ตลอดเวลาจะใช้วิธีการสื่อสารแบบสวิตท์กลุ่มข้อมูล (Packet Switching) ส่วนข้อมูลที่ส่งทีละหลายๆ จะใช้วิธีการสื่อสารแบบสวิตท่วงจร (Circuit Switching) จุดมุ่งหมายของวิธีการนี้ก็คือต้องการความเสถียรภาพของระบบ

2.17 ปัญหาการเชื่อมโยงของระบบ TCP/IP กับระบบดาวเทียม

เนื่องจากการสื่อสารผ่านดาวเทียมมีข้อได้เปรียบหลายประการ แต่เนื่องจากด้วยลักษณะของระบบทำให้ในปัจจุบันปัญหาการสื่อสารผ่านดาวเทียมมีดังนี้

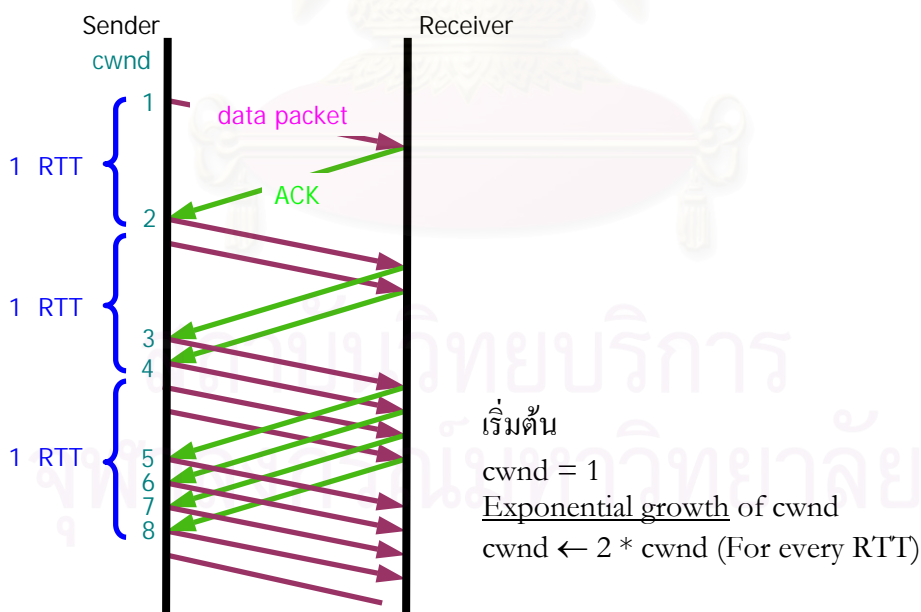
2.17.1 Slow Start อัลกอริทึม

Slow Start อัลกอริทึม ใช้ในการเริ่มของการเชื่อมโยงระบบ โดยเริ่มต้นจะให้ Congestion Window ($cwnd$) มีค่าเท่ากับ 1 หลังจากได้รับ Acknowledge Segment เครื่องส่งจะเพิ่มค่า Congestion Window ($cwnd$) 2 เท่าในทุกๆ ของช่วงเวลาไปกลับ (RTT) ดังแสดงในรูปที่ 2.9 การเริ่มต้นของการเชื่อมต่อ เครื่องส่งจะเริ่ม Slow Start อัลกอริทึม เพื่อที่จะทราบว่ามีแบนด์วิดท์เพียงพอในการเชื่อมโยงหรือไม่ ปริมาณเวลาที่ใช้นี้ [1]

$$t_{Slow\ Start} = RTT \times (1 + \log_2 B \times RTT/l) \quad (2.50)$$

เมื่อ RTT คือเวลาไปกลับในการส่งข้อมูล (Round Trip Time)(วินาที)

B คืออัตราข้อมูล (bit/s) และ $l = 8000$ บิต คือความยาวเฉลี่ยของแพ็กเก็ต (ปกติจะเท่ากับ 1 กิโลไบต์ มีค่าเท่ากับ 8 กิโลบิต) [1]



รูปที่ 2.9 ขนาด Congestion Window ($cwnd$) ในตอนเริ่มเชื่อมต่อระบบ

ตารางที่ 2.1 ระยะเวลาช่วง Slow Start สำหรับดาวเทียมชนิด LEO, MEO และ GEO [1]

ชนิดของดาวเทียม (Satellite Type)	RTT (Round Trip Time)	$t_{\text{SlowStart}}$ (B = 1 Mb/sec)	$t_{\text{SlowStart}}$ (B = 10 Mb/sec)	$t_{\text{SlowStart}}$ (B = 155 Mb/sec)
LEO (Low Earth Orbit)	0.05 วินาที	0.18 วินาที	0.35 วินาที	0.55 วินาที
MEO (Medium Earth Orbit)	0.25 วินาที	1.49 วินาที	2.32 วินาที	3.31 วินาที
GEO (Geostationary Earth Orbit)	0.55 วินาที	3.91 วินาที	5.73 วินาที	7.91 วินาที

ในหลายๆ การใช้งานของ TCP เช่น HTTP ซึ่งใช้ในการส่งขนาดข้อมูลขนาดเล็ก ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่าการส่งข้อมูลเสร็จสิ้นภายในช่วง Slow Start อาจกล่าวได้ว่าการเชื่อมโยง TCP ผ่านดาวเทียมไม่สามารถใช้ทรัพยากรของระบบได้อย่างเต็มที่ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีงานวิจัยที่ได้เสนอวิธีการแก้ปัญหาดังต่อไปนี้

1. เพิ่มขนาด Congestion Window ตอนเริ่มต้น (IIW) ซึ่งจะทำการตั้งค่าเริ่มต้นของ Congestion Window ให้มากกว่า 1 แต่ไม่มากกว่า 4 ทำให้ค่า $t_{\text{Slow Start}}$ ในตารางที่ 2.1 มีค่าลดลงประมาณ 3 เท่าแต่ค่าก็ยังคงสูงอยู่

2. Fast Start มีหลักการโดยการใช้อัตราการส่งจากอัตราการส่งสุดท้าย แต่อย่างไรก็ตามการใช้อัตราการส่งสุดท้ายซึ่งบางครั้งมีค่าที่สูงกับสถานะปัจจุบันของระบบ ซึ่งอาจทำให้เกิดความคับคั่งกับระบบได้ ดังนั้นข้อมูลที่ส่งในช่วงนี้จะส่งด้วยแพ็กเก็ต IP ความสำคัญต่ำ แต่อย่างไรก็ตามยังเกิดปัญหาการส่งข้อมูลส่วนความสำคัญต่ำแต่ก็ยังเป็นการส่งข้อมูลใหม่ไปยังเครื่องรับ ดังนั้นจึงอาจเป็นไปได้ว่ามีข้อมูลสูญหาย ซึ่งหากเกิดการสูญหายจะต้องมีการส่งข้อมูลใหม่

2.18 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารดาวเทียม TCP

TCP ในเบื้องต้นถูกพัฒนาเพื่อให้ใช้กับระบบที่มีสายซึ่งอัตราความผิดพลาดของการเชื่อมโยงมีค่าต่ำโดยที่ Transmission Control Protocol (TCP) จะมีตัวแปรคือ Congestion Window ($cwnd$) แทนปริมาณของข้อมูลในขณะใดขณะหนึ่ง ซึ่งใช้กำหนดอัตราการส่ง ใน TCP-Reno ช่วง Slow Start ค่าของ Congestion Window ($cwnd$) จะเพิ่มเป็นสองเท่าในทุกๆ เวลาไปกลับ (RTT) จนกระทั่งเกิดการสูญหายของข้อมูล เมื่อการตรวจพบว่าระบบคับคั่งและมีข้อมูลสูญหายและข้อมูลจะถูกส่งใหม่ Congestion Window จะลดลงครึ่งหนึ่ง และจะเข้าสู่ช่วง Congestion Avoidance ระหว่างช่วงนี้ Congestion Window จะเพิ่มครั้งละ 1 Segment เป็นอย่างมากต่อช่วงเวลาไปกลับ

และจะลดลงครึ่งหนึ่งเมื่อตรวจสอบพบว่าระบบคับคั่ง ท้ายที่สุดหากการส่งใหม่ยังมีการสูญหายของข้อมูลอีก เครื่องส่ง TCP จะเริ่มนับเวลา Timeout และในช่วงเวลานี้จะลดค่า Congestion Window ($cwnd$) ให้มีค่าเป็น 1 Segment ซึ่งในระบบการสื่อสารดาวเทียม ช่วงเวลา Timeout และเริ่ม Slow Start นี้จะใช้เวลาประมาณหลายวินาที ช่วงเวลานี้วิสัยสามารถจะมีค่าต่ำ [7]

2.19 Explicit Congestion Notification (ECN)

ในปัจจุบันการควบคุมความคับคั่งในระบบสื่อสารดาวเทียม ซึ่ง The Internet Engineering Task Force (IETF) ได้กำหนดมาตรฐาน RFC 2481 ได้กำหนด Explicit Congestion Notification (ECN) โดยให้ใช้ 2 บิตใน IP Header กำหนดให้มีชื่อ บิต CE และ บิต ECT ตามลำดับโดยที่บิต CE ใช้บอกความคับคั่งที่เส้นทาง การทำสัญลักษณ์โดยใช้ RED (Random Early Detection) อัลกอริทึมขึ้นอยู่กับขนาดของคิวเฉลี่ย ในส่วนของเครื่องรับจะส่ง ECN กลับไปยังเครื่องส่งโดยผ่านทาง TCP Acknowledges เครื่องส่งจะตอบสนองต่อ ECN หนึ่งครั้งต่อเวลาไปกลับ (Round Trip Time) (RTT) [4], [9]

ข้อได้เปรียบของ ECN คือ ในกรณีของการเกิดความคับคั่งมีขนาดไม่มากนักจะไม่มีแพ็กเก็ตสูญหาย และทำให้สามารถบอกข้อมูลความคับคั่งของระบบได้มากขึ้นทำให้สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการส่งระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับทำให้ลดการเชื่อมต่อระบบใหม่ในกรณีที่แพ็กเก็ตสูญหาย ซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมเนื่องจากในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมนั้นมีการหน่วงเวลาของการแพร่กระจายมาก

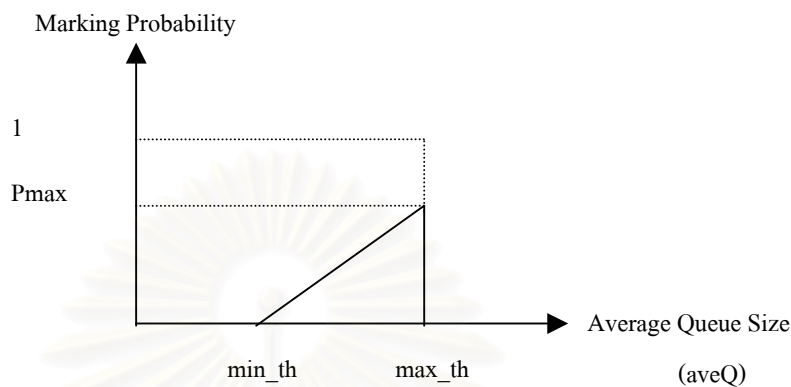
ในปัจจุบัน ECN ใช้ 2 บิตใน IP Header (บิตที่ 6 และ บิตที่ 7 ใน TOS (Type of Service) ซึ่งแต่เดิม ECN ได้กำหนดการควบคุมไว้เป็นสองระดับดังตารางที่ 2 [4]

ตารางที่ 2.2 เราเตอร์ตอบสนองความคับคั่งโดยทำสัญลักษณ์ที่บิต CE และ ECT [4]

บิต CE (บิตที่ 6 ใน TOS)	บิต ECT (บิตที่ 7 ใน TOS)	ระดับของความคับคั่ง (Congestion State)
0	0	ไม่มีความคับคั่ง
0	1	ระบบคับคั่ง

2.20 Random Early Detection (RED) อัลกอริทึม

Random Early Detection อัลกอริทึมจะคำนวณขนาดคิวเฉลี่ยเมื่อขนาดของคิวเฉลี่ยมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้จะทำการทิ้งแพ็กเก็ต ซึ่งค่าความน่าจะเป็นจะเป็นฟังก์ชันของขนาดคิวเฉลี่ย [4]



รูปที่ 2.10 Random Early Detection อัลกอริทึม

$$max_th = 2 \times min_th \quad (2-51)$$

$$P_{max} \approx 0.1 \quad (2-52)$$

$$aveQ = (1 - wq) \times aveQ + wq \times int\ anQ \quad (2-53)$$

เมื่อ wq คือ Weighting Factor $0.002 \leq wq \leq 0.0042$

ใน NS-2 Simulator จะกำหนดให้ค่า $wq = 0.002$ เป็นค่าเริ่มต้น

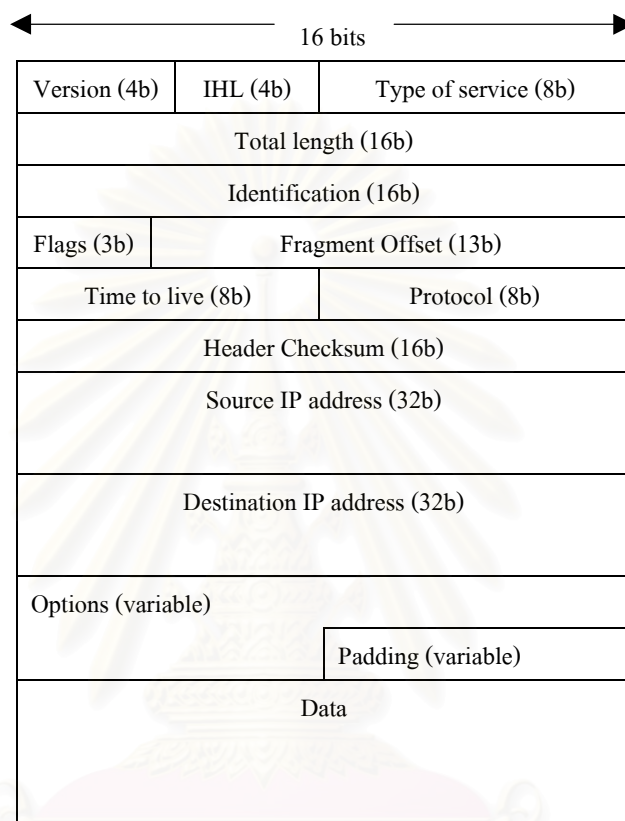
เนื่องจากหาก wq มีค่ามากจะทำให้วิสัยสามารถของระบบเพิ่มขึ้นแต่การควบคุมจะทำได้ยาก แต่ถ้าหาก wq มีค่าน้อยจะทำให้วิสัยสามารถของระบบลดลง

2.21 Fast Retransmit อัลกอริทึม

การตรวจสอบข้อมูลสูญหายจะสมมติให้ข้อมูลสูญหายเนื่องจากความคับคั่ง และจะตรวจสอบโดยเครื่องส่งแจ้งว่าได้รับ Acknowledged Segment เดิมซ้ำกัน 3 ครั้ง จะเริ่มต้นของ Fast Retransmit อัลกอริทึม และจะเริ่มให้ Congestion Window ($cwnd$) มีค่าเท่ากับ 1

2.22 โครงสร้างแพ็กเก็ตของโปรโตคอล IP

โครงสร้างแพ็กเก็ตของโปรโตคอล IP ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ประกอบด้วย 2 ส่วนหลักคือ ส่วนที่เรียกว่าเฮดเดอร์ (Header) และส่วนของข้อมูล (Data) [5]



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของโปรโตคอล IP (Ipv4)

รายละเอียดของแพ็กเก็ต IP มีดังต่อไปนี้ [13]

Version Field มีขนาด 4 บิต เป็นฟิลด์แรกของไอพีดาตาแกรมใช้ระบุถึงรุ่นหรือเวอร์ชันของโปรโตคอล IP ที่ใช้ในการสร้างไอพีดาตาแกรม ฟิลด์นี้มีไว้สำหรับแยกแยะระหว่างโปรโตคอล IP รุ่นเก่ากับโปรโตคอล IP รุ่นที่ใหม่กว่าในกรณีที่มีการปรับปรุงโปรโตคอลรุ่นที่ใหม่ขึ้นกว่าเดิม ทั้งนี้เพื่อให้แน่ใจว่าซอฟต์แวร์ของโปรโตคอล IP ทั้งสองฝ่ายติดต่อสื่อสารกันด้วยโปรโตคอล IP รุ่นเดียวกัน ปัจจุบันโปรโตคอลที่ใช้อยู่เป็นโปรโตคอล IP เวอร์ชัน 4

Internet Header Length (IHL) มีขนาด 4 บิต เป็นฟิลด์ที่ระบุถึงขนาดเฮดเดอร์ของไอพีดาตาแกรม โดยจะบอกในหน่วยเวิร์ดขนาด 32 บิต เนื่องจาก Header Length มีขนาดเพียง 4 บิต เฮดเดอร์ของไอพีดาตาแกรมจึงมีความยาวได้ไม่เกิน 60 ไบต์

Type of Service (TOS) มีขนาด 8 บิต ใช้สำหรับบอกคุณลักษณะหรือรูปแบบการให้บริการที่ไอพีดาตาแกรมต้องการ เพื่อให้อุปกรณ์เราเตอร์ (Router) เลือกส่งไอพีดาตาแกรมในเส้นทางที่เหมาะสมสอดคล้องกับความต้องการของไอพีดาตาแกรมนั้นๆ สำหรับโครงสร้างของฟิลด์นี้ประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 2.12 ส่วนแรกคือส่วน Precedence จำนวน 3 บิตใช้สำหรับจัดลำดับความสำคัญของไอพีดาตาแกรมซึ่งมีได้ 8 ระดับ ตั้งแต่ระดับ 0 ซึ่งมีความสำคัญน้อยสุดใช้สำหรับไอพีดาตาแกรมข้อมูลปกติ ไปจนถึงระดับ 7 ที่มีความสำคัญสูงสุดสำหรับไอพีดาตาแกรมที่ส่งคำสั่งควบคุมโครงข่าย การจัดลำดับความสำคัญจะมีประโยชน์อย่างมากกับการแก้ปัญหาบางอย่างในระบบ เช่นปัญหาความคับคั่ง (Congestion)

0	1	2	3	4	5	6	7
Precedence			D	T	R	CE	ECT

รูปที่ 2.12 โครงสร้างของฟิลด์ Type of Service

Total Length มีขนาด 16 บิตมีไว้เพื่อบ่งถึงขนาดของไอพีดาตาแกรมทุกส่วนรวมกันในหน่วยของไบต์ ดังนั้นไอพีดาตาแกรมจึงมีขนาดสูงสุดได้ไม่เกิน $2^{16}-1$ หรือ 65,535 ไบต์ เมื่อระบบได้อ่านค่าในฟิลด์ Header Length จะทราบจุดเริ่มต้นในส่วนฟิลด์ Data ได้ ฟิลด์ที่มีความสำคัญและจำเป็นต้องมีเมื่อใช้งานกับบางโครงข่ายที่ชั้นลิงก์เลเยอร์กำหนดขนาดต่ำสุดของเฟรมไว้ เช่น อีเทอร์เน็ต (Ethernet) ซึ่งกำหนดให้ข้อมูลหรือไอพีดาตาแกรมที่บรรจุลงในเฟรมต้องมีขนาดอย่างต่ำ 46 ไบต์ ถ้าข้อมูลที่ใส่มีขนาดเล็กกว่านี้ลิงก์เลเยอร์ก็จะเพิ่ม Padding ต่อท้ายจนครบจำนวน เนื่องจากไอพีดาตาแกรมอาจจะมีขนาดเล็กกว่า 46 ไบต์ ดังนั้นถ้าไม่มีฟิลด์ Total Length กำกับเราจะไม่สามารถรู้ได้ว่าส่วนข้อมูลที่ดึงออกมาจากเฟรมอีเทอร์เน็ตมีกี่ไบต์ที่เป็นไบต์ดาตาแกรมจริง ๆ

Identification ทุกครั้งที่โฮสต์ต้นทางมีการส่งไอพีดาตาแกรมออกไปแต่ละตัวจะพิจารณาฟิลด์ Identification ก่อน ซึ่งมีขนาด 16 บิต ซึ่งการทำเช่นนี้เป็นเหมือนการกำหนดหมายเลขประจำตัวของไอพีดาตาแกรมแต่ละตัว เมื่อไอพีดาตาแกรมเดินทางถึงเราเตอร์หนึ่งจะพบว่าจำเป็นต้องมีการทำแฟรกเมนต์เราเตอร์จะบรรจุค่า Identification เดียวกันกับที่ได้รับให้กับแฟรกเมนต์ทุกตัวของไอพีดาตาแกรมเหมือนกันหมด จะเห็นว่าฟิลด์นี้มีประโยชน์ต่อการทำแฟรกเมนต์โดยตรงเพราะมีหน้าที่บ่งบอกให้ปลายทางทราบว่าแฟรกเมนต์ที่ได้รับแต่ละส่วนเป็นองค์ประกอบหนึ่งของไอพีดาตาแกรมเดียวกันหรือไม่

Flag เป็นฟิลด์ที่มีขนาด 3 บิต บิตแรกไม่มีการใช้งานและกำหนดให้เป็น 0 เสมอ บิตที่สองเรียกว่าบิต D มีไว้เพื่อกำหนดว่าไอพิดาตาแกรมนี้อนุญาตให้ทำแฟรกเมนต์ได้หรือไม่ ถ้าโฮสต์ต้นทางกำหนดให้ D = 0 ก็หมายถึงอนุญาตให้อุปกรณ์เราเตอร์ระหว่างทางทำการแฟรกเมนต์ได้ถ้ามีความจำเป็น แต่หากตั้งค่าไว้

D = 1 หมายความว่าห้ามมิให้ทำการแฟรกเมนต์โดยเด็ดขาด

Fragment Offset มีหน้าที่ชี้หรือระบุตำแหน่งเริ่มต้นของส่วนย่อยแต่ละส่วน ภายในไอพิดาตาแกรม ฟิลด์นี้มีขนาด 13 บิต โดยค่าที่ใช้มีหน่วยเป็นจำนวนเท่าของ 8 ไบต์ เมื่อโฮสต์ปลายทางอ่านค่าฟิลด์นี้ประกอบกับฟิลด์ Total Length ของแฟรกเมนต์ที่ได้รับแต่ละตัว ก็จะสามารถตรวจสอบได้ว่าได้รับแฟรกเมนต์ของไอพิดาตาแกรมครบถ้วนหรือไม่

Time To Live (TTL) เป็นฟิลด์ที่มีขนาด 8 บิต ทำหน้าที่กำหนดจำนวนเราเตอร์สูงสุดที่ไอพิดาตาแกรมสามารถเดินทางผ่านได้ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเป็นการกำหนดอายุของดาตาแกรมที่อนุญาตให้อยู่ในโครงข่าย

Protocol เป็นค่าที่ระบุว่าข้อมูลในดาตาแกรมได้รับการกำเนิดจากโพรโทคอลชั้นที่สูงกว่าประเภทหรือชนิดใด

Header Checksum มีขนาด 16 บิต มีไว้เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเฮดเดอร์

Source IP Address และ Destination IP Address ฟิลด์ทั้งสองมีขนาด เท่ากันคือ 32 บิต ใช้เป็นหมายเลขประจำตัวของโฮสต์ เมื่อโฮสต์ต้นทางกำเนิดไอพิดาตาแกรมขึ้นจะระบุหมายเลขไอพีแอดเดรสต้นทางเป็นหมายเลขไอพีของตนเอง และกำหนดหมายเลขไอพีแอดเดรสปลายทางเป็นหมายเลขของโฮสต์ปลายทางที่ต้องการติดต่อด้วย

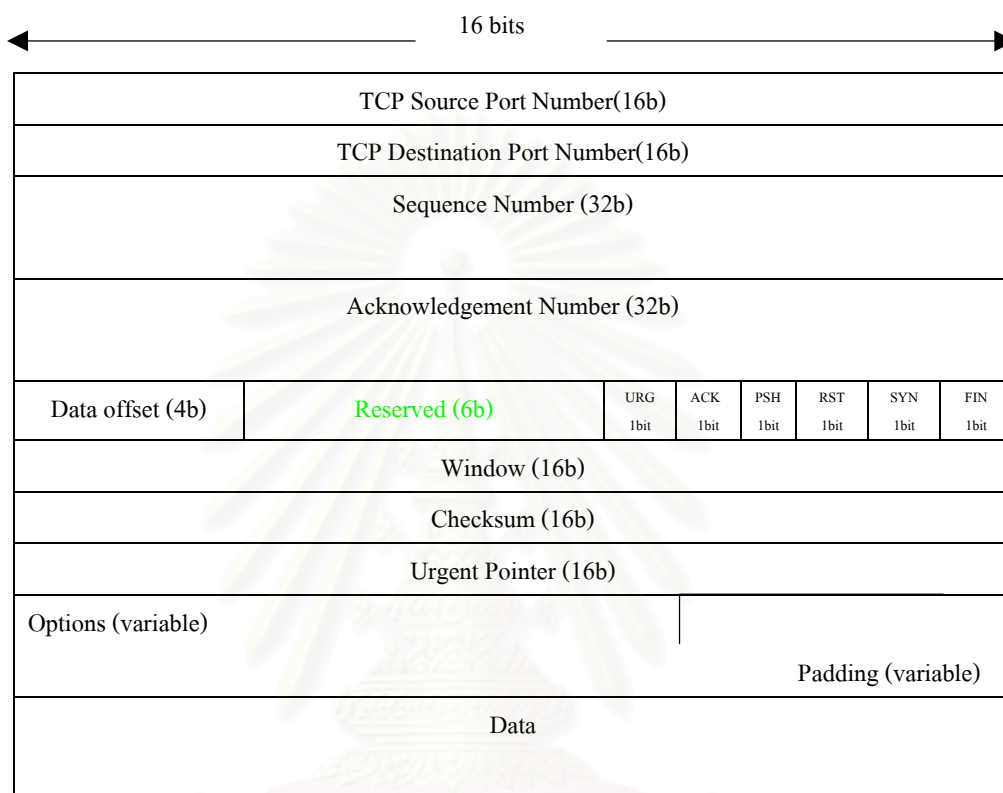
Option และ Padding เป็นส่วนที่เพิ่มเติมเข้ามากับไอพิดาตาแกรม มีการใช้เฉพาะกับงานบางอย่างเช่น การทดสอบโครงข่าย และตรวจหาจุดผิดพลาดของระบบ ฟิลด์นี้มีขนาดไม่ตายตัวขึ้นอยู่กับชนิดของ Option ที่เลือกใช้ ในกรณีที่ฟิลด์ที่เลือกใช้มีขนาดที่ไม่ลงตัวเป็นจำนวนเท่าของ 32 บิตจะมีการเติมบิตที่มีค่าเป็นศูนย์ต่อท้ายจนครบ 32 บิต เรียกบิตเพิ่มเติมนี้ว่า Padding

Data คือส่วนที่ใช้บรรจุข้อมูลของไอพิดาตาแกรม ฟิลด์นี้มีขนาดไม่ตายตัว ความยาวของฟิลด์ Data เมื่อรวมกับส่วนของเฮดเดอร์จะต้องมีค่าไม่เกิน $65,535 (2^{16}-1)$

2.23 โครงสร้างแพ็กเก็ตของโปรโตคอล TCP

โครงสร้างแพ็กเก็ตของโปรโตคอล TCP แสดงในรูปที่ 2.13 [13]

เมื่อ TCP ใช้ IP แพ็กเก็ต TCP จะหุ้มรวม IP แพ็กเก็ตไว้ก่อนที่จะมีการส่ง แพ็กเก็ต IP จะบ่งบอก Address ของเครื่องส่งและเครื่องรับ



รูปที่ 2.13 โครงสร้างแพ็กเก็ตของโปรโตคอล TCP

รายละเอียดของแต่ละฟิลด์มีดังต่อไปนี้ [13]

TCP Source Port Number คือหมายเลขพอร์ตที่โฮสต์ต้นทาง

TCP Destination Port Number คือหมายเลขพอร์ตที่โฮสต์ปลายทาง

Sequence Number และ **Acknowledgement Number** มีขนาดเท่ากันคือ 32 บิต กำหนดขึ้นเพื่อใช้งานควบคู่กันสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องการส่งผ่านข้อมูลในชั้นโปรโตคอล TCP ฟิลด์ Sequence Number ใช้ระบุหมายเลขไบนารีในสตรีมข้อมูลที่โฮสต์ต้นทางกำลังส่งอยู่ เนื่องจากไบนารีทุกไบนารีในสตรีมของโปรโตคอล TCP จะมีการจัดสรรหมายเลขให้โดยเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก หมายเลขที่ใช้มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง $2^{32}-1$ เมื่อใดที่ได้ใช้ถึงตัวเลขที่มีค่าสูงสุดแล้วก็ให้วน

กลับมาใช้ตัวเลขศูนย์ใหม่ และเป็นเช่นนี้เรื่อยไป ส่วนฟิลด์ Acknowledgement Number ได้รับการกำหนดโดยโฮสต์ปลายทาง ค่าที่บรรจุอยู่ในฟิลด์นี้จะถูกกำหนดให้สอดคล้องสัมพันธ์กับหมายเลขของฟิลด์ Sequence Number ในเซกเมนต์ข้อมูลที่ส่งมาจากโฮสต์ต้นทางเพื่อแสดงความหมายว่าโฮสต์ปลายทางกำลังรอรับหมายเลขของไบต์ถัดไปในสตรีมข้อมูลหมายเลขโดยอยู่

Header Length มีความยาว 4 บิต ใช้บอกถึงขนาดหรือจำนวนไบต์ในเฮดเดอร์ของเซกเมนต์โดยตัวเลขที่ระบุเป็นตัวเลขที่เป็นจำนวนเท่าของ 4 ไบต์ เฮดเดอร์ปกติจะมีขนาดคงที่เท่ากับ 20 ไบต์ นั่นคือ Head Length = 5 เฮดเดอร์จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้งานฟิลด์ Option ซึ่งมีขนาดไม่คงที่ขึ้นกับชนิดของ Option ที่เลือกใช้ โดยเฮดเดอร์จะมีขนาดสูงสุดไม่เกิน 60 ไบต์

Reserved

Code Bits มีขนาด 6 บิต เป็นฟิลด์ที่บ่งถึงชนิดหรือประเภทของเซกเมนต์ที่ใช้งานอยู่ เนื่องจากโปรโตคอล TCP กำหนดชนิดของเซกเมนต์ไว้หลายรูปแบบ เช่น เซกเมนต์ที่ไว้รับส่งข้อมูลของโปรแกรมแอปพลิเคชัน เซกเมนต์ใช้ในการสร้างคอนเนกชันเพื่อเปิดการเชื่อมต่อ และเซกเมนต์สำหรับขอลิ้นสุดการเชื่อมต่อ ฟิลด์ Code Bits มีองค์ประกอบดังนี้

URG	ACK	PSH	RST	SYN	FIN
-----	-----	-----	-----	-----	-----

รูปที่ 2.14 โครงสร้างของ Reserved Field

URG บิตนี้จะเซตเพื่อแสดงว่าเซกเมนต์มีการใช้งานฟิลด์ Urgent Pointer อยู่โดยจะใช้งานร่วมกันเพื่อบอกให้โปรแกรมของโฮสต์ปลายทางหยุดอ่านสตรีมข้อมูลที่อยู่ก่อนหน้าทั้งหมดชั่วคราว และให้อ่านข้อมูลเร่งด่วนที่อยู่ในเซกเมนต์ส่วนนี้ก่อนที่จะดำเนินกิจกรรมเดิมต่อ การใช้งานของบิต URG เกิดขึ้นเฉพาะในกรณี เช่น ผู้ใช้อาจต้องยกเลิกการติดต่อสื่อสารกลางครั้น จึงกดปุ่มยกเลิก ข้อมูลการขอยกเลิกการสื่อสารจึงได้รับการส่งออกอย่างเร่งด่วนในเซกเมนต์ที่มีการเซตบิต URG ทั้งนี้ฟิลด์ Urgent Pointer มีหน้าที่ระบุตำแหน่งจุดสิ้นสุดของข้อมูลเร่งด่วนภายในเซกเมนต์

ACK ใช้เพื่อบอกว่ามีการใช้งานฟิลด์ Acknowledge Number สำหรับกระบวนการตอบรับเซกเมนต์อยู่หรือไม่ โดยทั่วไปฟิลด์นี้มีใช้งานในเซกเมนต์แทบทุกตัวยกเว้นก็เฉพาะแต่เซกเมนต์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างโฮสต์ในครั้งแรกเท่านั้น

PHS บิตนี้จะถูกเซตในกรณีที่ต้องการให้ชั้นโปรโตคอล TCP ของโฮสต์ปลายทางส่งต่อข้อมูลในเซกเมนต์ไปให้โปรแกรมแอปพลิเคชันทันที ทั้งนี้เพราะโดยปกติโปรโตคอล TCP จะสะสมและเก็บเซกเมนต์ไว้จนกว่าจะมีปริมาณมากพอจึงค่อยส่งต่อให้โปรแกรมแอปพลิเคชันเพื่อลดปริมาณงานการติดต่อลง

RST บิตนี้จะใช้งานเมื่อมีความผิดพลาดของการทำงานเกิดขึ้นและระบบไม่สามารถจัดการกับปัญหาเหล่านี้ได้อีกต่อไป การส่งเซกเมนต์ที่เซตบิต RST จึงเป็นกลไกในการปิดการเชื่อมต่อหรือสิ้นสุดคอนเนกชันที่มีอยู่ลง หรือยังอาจใช้ในการตอบปฏิเสธการขอเปิดคอนเนกชันได้ด้วยเมื่อมีการติดต่อขอสร้างคอนเนกชันเข้ามา

SYN บิตนี้ใช้งานเฉพาะสำหรับการแสดงความประสงค์ขอเปิดคอนเนกชันระหว่างโฮสต์ เริ่มแรกโฮสต์ด้านหนึ่งจะส่งเซกเมนต์ที่มีการเซตบิต SYN ออกไป หากโฮสต์ปลายทางยินดีจะตอบรับการเปิดคอนเนกชันก็จะส่งเซกเมนต์ที่เซตบิต SYN ตอบรับกลับไป

FIN บิตนี้มีหน้าที่กลับกันกับบิต SYN กล่าวคือมีไว้สำหรับโฮสต์ใช้ในการแสดงความต้องการขอปิดหรือสิ้นสุดคอนเนกชัน เนื่องจากไม่มีข้อมูลเหลือสำหรับส่งอีกต่อไป

Window Size มีขนาด 16 บิตมีไว้สำหรับโฮสต์ปลายทางใช้ในการประกาศขนาดของ Window ที่อนุญาตให้โฮสต์ต้นทางใช้งานได้ ขนาดของ Window เป็นตัวกำหนดจำนวนไบต์สตรีมที่โฮสต์ต้นทางสามารถส่งออกอย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องรอการตอบรับจากโฮสต์ปลายทาง ฉะนั้นโฮสต์ปลายทางจึงสามารถควบคุมปริมาณหรืออัตราการส่งเซกเมนต์ของโฮสต์ต้นทางได้ตามที่เห็นว่าเหมาะสม

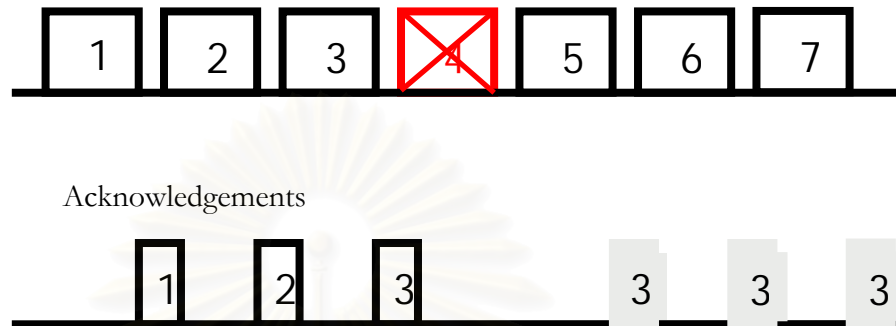
Checksum มีขนาด 16 บิต ทำหน้าที่ตรวจสอบความถูกต้องขององค์ประกอบทุกส่วนในเซกเมนต์คือทั้งในส่วนของเฮดเดอร์และส่วนของข้อมูล วิธีการคำนวณค่า Checksum เหมือนกันกับในกรณีของโพรโทคอล UDP คือนำองค์ประกอบทุกส่วนมาบวกรวมกันแบบ one's complement ที่ละ 16 บิต

Urgent Pointer มีขนาด 16 บิต จะมีความหมายก็เฉพาะเมื่อมีการเซตบิต URG = 1 เท่านั้น เมื่อโฮสต์ปลายทางได้รับเซกเมนต์ที่มีการเซตบิต URG ก็จะอ่านค่าในฟิลด์ Urgent Pointer เพื่อให้ทราบถึงตำแหน่งไบต์สุดท้ายของข้อมูลเร่งด่วนในเซกเมนต์นั้น

Option มีขนาดเปลี่ยนแปลงได้ โดยขนาดที่แน่นอนของแต่ละเซกเมนต์สามารถดูได้จากฟิลด์ Header Length

2.24 การสูญหายของกลุ่มข้อมูล (Packet Loss)

สมมติว่าการสูญหายของกลุ่มข้อมูลใช้เป็นตัวสัญญาณบอกความคับคั่งของเส้นทาง การสูญหายของกลุ่มข้อมูลตรวจสอบจากการได้รับ Acknowledgement ซ้ำกัน 3 ครั้ง ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การจำลองการสูญหายของข้อมูล

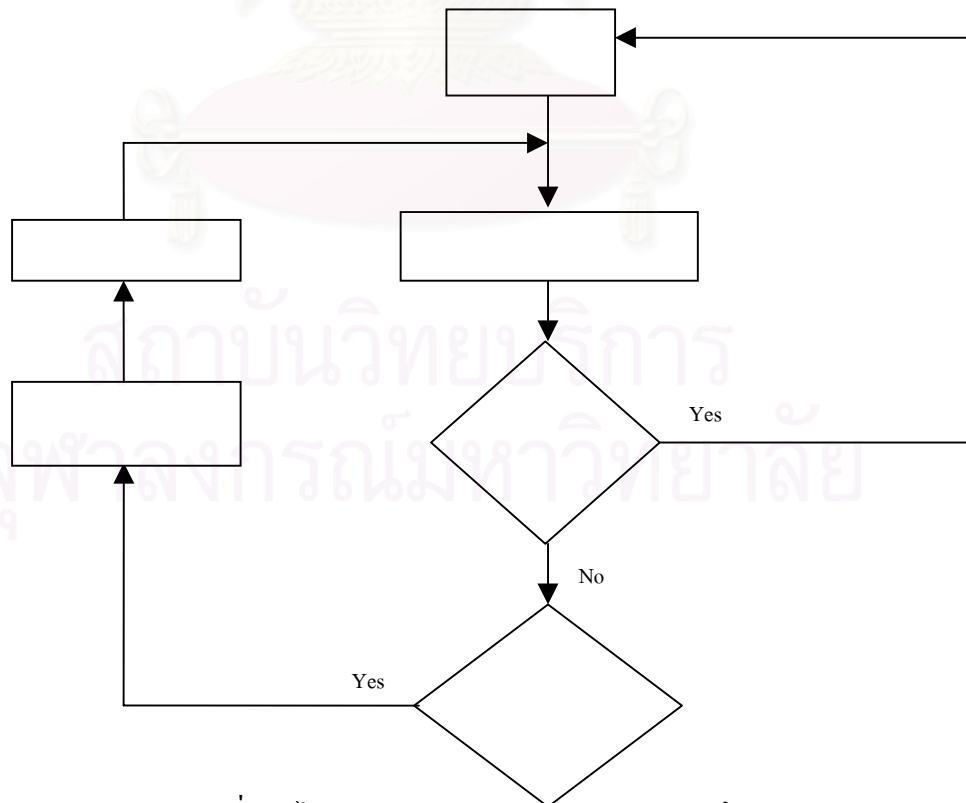
จากรูปที่ 2.15 จะสมมติว่าแพ็กเก็ตที่ 4 สูญหาย จะพบว่าจะได้รับ Acknowledgement ของแพ็กเก็ตที่ 3 ซ้ำกัน 3 ครั้ง

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

เนื่องจาก TCP-Peach ที่ได้นำเสนอก่อนหน้านี้ [1] ในช่วง Congestion Avoidance เมื่อระบบตรวจพบว่ามีข้อมูลสูญหายจากการได้รับ Acknowledge Segments ซ้ำกัน 3 ครั้ง เครื่องส่งจะลด Congestion Window ลงครึ่งหนึ่งทำให้ช่วงของการลดค่า Congestion Window มีการก้าวกระโดดมาก ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำการใช้ Multi Level Explicit Congestion Notification (MECN) มาใช้เพื่อที่จะทำให้เครื่องส่งและเครื่องรับสามารถรับรู้สถานะความคับคั่งของระบบที่เชื่อมโยง และปรับค่าอัตราการส่งหลายระดับทำให้มีความละเอียดในการปรับค่า Congestion Window มากขึ้น ดังนั้นจะสามารถลดความคับคั่งและลดโอกาสในการเชื่อมโยงระบบอีกครั้ง ซึ่งมีความสำคัญมากในระบบสื่อสารดาวเทียม เนื่องจากมีการหน่วงเวลาของการแพร่กระจายคลื่นมาก ด้วยเหตุนี้ทำให้สามารถเพิ่มวิสัยสามารถ (Throughput) ของระบบ

TCP-Peach# ที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบด้วย Sudden Start อัลกอริทึม Congestion Avoidance อัลกอริทึมและ Fast Retransmit & Rapid Recover อัลกอริทึม หลักการทำงานดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ไคอะแกรมของ TCP-Peach# อัลกอริทึม

เนื่องจากปัญหาของ Slow Start อัลกอริทึม และปัญหาข้อมูลสูญหายเนื่องจากความคับคั่งทำให้วิสัยสามารถ (Throughput) และอัตราการส่งข้อมูลลดน้อยลง จากปัญหาดังกล่าวเราจะทำการวิเคราะห์ระบบ แบ่งเป็น 3 ส่วน โดยอัลกอริทึมต่างๆ มีหลักการทำงานดังนี้

3.1 Sudden Start อัลกอริทึม

Sudden Start อัลกอริทึมใช้ในการเริ่มต้นการเชื่อมโยงระบบโดยการส่งร่วมกันกับ Dummy Segments ซึ่งเป็นส่วนข้อมูลความสำคัญต่ำเพื่อเป็นการหยุดสภาวะของระบบซึ่งจะมีผลทำให้ Congestion Window เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถใช้ทรัพยากรของระบบได้อย่างรวดเร็วและเต็มที่

Dummy Segments คือข้อมูลส่วนความสำคัญต่ำสร้างโดยเครื่องส่งโดยการทำสำเนาข้อมูลที่ส่งสุดท้ายด้วยเหตุนี้จึงไม่นำข้อมูลใหม่ไปยังผู้รับ

เครื่องส่งจะใช้ Dummy Segments ในการทดสอบว่าระบบยังมีเส้นทางในการส่งหรือไม่ถ้าเส้นทางนั้นคับคั่ง จะทำการทิ้งส่วนที่เป็น Dummy Segments แต่ถ้าหากเส้นทางไม่คับคั่ง Dummy Segments จะถูกส่งไปถึงยังเครื่องรับ เครื่องส่งจะใช้หนึ่งบิตหรือมากกว่า ในส่วนที่ไม่ใช่จาก 6 บิต TCP Header เพื่อที่จะแยกแยะระหว่าง Dummy Segments กับ Data Segments และการส่ง Dummy Segments ไม่ได้มีผลกระทบในการลดวิสัยสามารถ (Throughput) ของระบบ

Dummy Segments จะมีประโยชน์ต่อการใช้ในกรณีที่มีการเชื่อมโยงระบบใหม่หรือการเชื่อมโยงระบบที่เกิดจากการเชื่อมโยงผิดพลาด เช่น ในช่วง Sudden Start กับ ช่วง Fast Retransmit & Rapid Recovery เนื่องจากการเชื่อมโยงผิดพลาด โดยจะเป็นส่วนที่ทำให้ Congestion Window ($cwnd$) เพิ่มขึ้นในทุกๆ การได้รับ Acknowledge จาก Dummy Segments นี้

การแก้ปัญหาโดยใช้ Sudden Start อัลกอริทึมซึ่งเพิ่ม Congestion Window อย่างรวดเร็วในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมต่อระบบภายใน 2 เท่าของช่วงเวลาไปกลับเนื่องจากการใช้ Dummy Segments [4] เราจะให้ตัวแปร $rwnd$ แทน Congestion Window ที่มีค่าที่มากที่สุด (Maximum Congestion Window) โดยมีแนวความคิดว่าในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมต่อเครื่องส่งจะให้ Congestion Window มีค่าเป็น 1 และหลังจากส่ง Data Segment แล้วจะส่ง $(rwnd - 1)$ Dummy Segments ในทุกๆ

$$\tau = RTT/rwnd \quad (3-1)$$

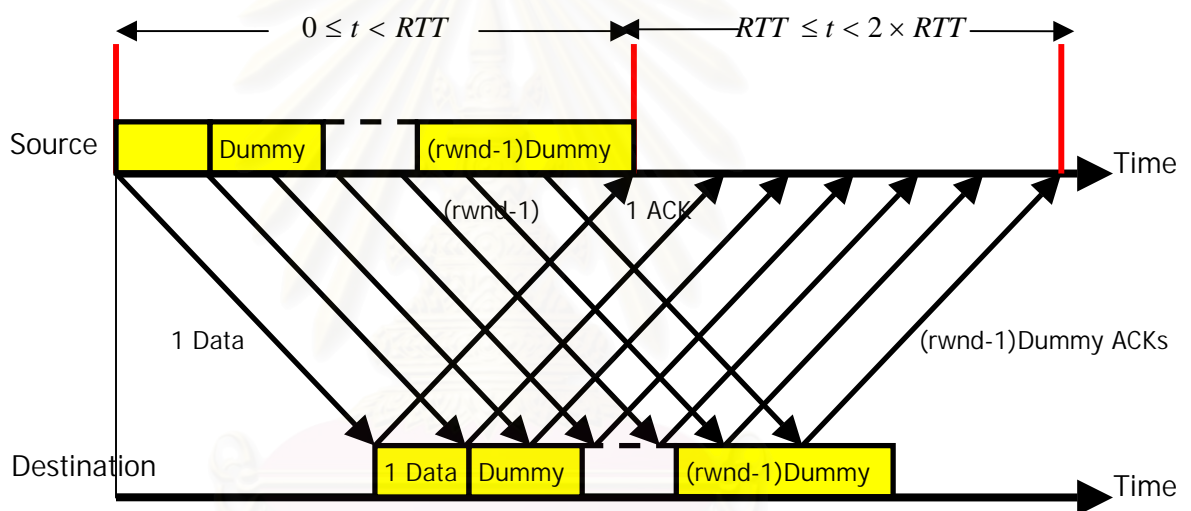
ด้วยเหตุนี้ หลังจากหนึ่งช่วงของเวลาไปกลับ Congestion Window ($cwnd$) จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนเท่ากับค่าของ Congestion Window ($cwnd$) ที่กำหนดให้มีค่ามากที่สุดด้วยเหตุนี้เครื่องส่งสามารถประมาณค่าเวลาไปกลับได้

รายละเอียดของ Sudden Start อัลกอริทึมมีดังนี้

```

Sudden_Start()
  cwnd = 1;
   $\tau = RTT / rwnd$ ;
  Send (Data_Segment);
  For ( $i = 1$  to  $rwnd - 1$ );
    wait ( $\tau$ );
    send (Dummy_Segment);
  end;
end.

```



รูปที่ 3.2 การส่งแพ็กเก็ตเกิดขึ้นในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมโยงระบบ
จากรูปสามารถอธิบายในรายละเอียดได้ดังนี้
สมมติการเชื่อมต่อที่เวลา $t = 0$

- $0 \leq t < RTT$
เครื่องส่งจะส่งทั้ง Data Segment และ $(rwnd - 1)$ Dummy Segments ในช่วงเวลา
- $RTT \leq t < 2 \times RTT$
เมื่อ Acknowledge Segments เนื่องจากส่วน Data Segment และ $(rwnd - 1)$ Dummy Segments ที่ส่งไปเมื่อช่วงเวลา $0 \leq t < RTT$ กลับมายังเครื่องส่ง สำหรับในแต่ละ Acknowledge Segments ที่เครื่องส่งรับหลังจากนั้นเครื่องส่งจะเพิ่ม Congestion Window ($cwnd$) ครั้งละ 1 และจะเริ่มส่งข้อมูลใหม่
- $t \approx 2 \times RTT$

ที่เวลานี้ Acknowledge Segments สุดท้ายซึ่งเกิดจากการส่ง Dummy Segments มาถึงยังเครื่องส่ง และเครื่องส่งจะเข้าสู่ช่วง Congestion Avoidance

จากการจำลองดังกล่าวสามารถหาวิสัยสามารถของระบบได้จาก

$$\text{Throughput} = \text{cwnd} / \text{RTT} \quad (3-2)$$

เมื่อ *Throughput* คือ วิสัยสามารถของระบบ (packets/sec)

cwnd คือ ขนาด Congestion Window ที่เวลาต่าง ๆ (packets)

RTT คือ เวลาไปกลับมีหน่วยเป็น (sec)

3.2 ปัญหาข้อมูลสูญหายเนื่องจากเส้นทางคับคั่ง

เนื่องจากการควบคุมความคับคั่งแบบ ECN สามารถบอกระดับของความคับคั่งได้เพียง 2 ระดับ จึงมีแนวความคิดที่จะนำการควบคุมความคับคั่งหลายระดับ (MECN) มาประยุกต์ใช้กับระบบสื่อสารดาวเทียมโดยทำการเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ ของการควบคุมความคับคั่งหลายระดับ เช่น $P1\ max$, $P2\ max$, α_x , min_th , mid_th , max_th

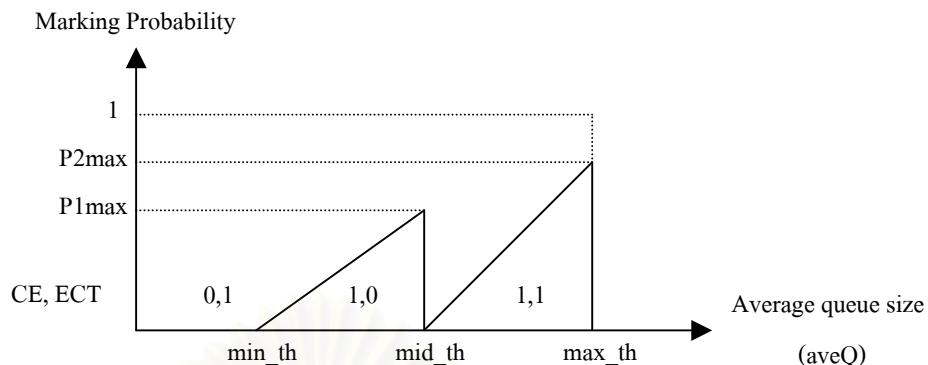
Multi levels Explicit Congestion Notification (MECN)

ใช้การบอกความคับคั่งหลายระดับทำให้สามารถบอกความคับคั่งได้ 4 ระดับ โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

3.2.1 การทำสัญลักษณ์

ตารางที่ 3.1 การให้สัญลักษณ์ของบิต CE และบิต ECT เพื่อบอกระดับของความคับคั่ง

บิต CE (บิตที่ 6 ใน TOS)	บิต ECT (บิตที่ 7 ใน TOS)	ระดับของความคับคั่ง (Congestion State)
0	1	ไม่มีความคับคั่ง
1	0	เริ่มคับคั่ง
1	1	คับคั่งปานกลาง
แฟ้มเกตสูญหาย		ระบบคับคั่ง



รูปที่ 3.3 การทำสัญลักษณ์ที่เรเตอร์

ค่าเริ่มต้นของ RED อัลกอริทึม [9], [11]

$$P1\ max, P2\ max \approx 0.1 \tag{3-3}$$

$$min_th \approx 5 \tag{3-4}$$

$$mid_th = 2 \times min_th \tag{3-5}$$

$$max_th = 2 \times mid_th \tag{3-6}$$

$$aveQ = (1 - wq) \times aveQ + wq \times int\ anQ \tag{3-7}$$

ใน NS Simulator จะกำหนดให้ค่า $wq = 0.002$ เป็นค่าเริ่มต้น

3.2.2 การป้อนกลับจากเครื่องรับไปยังเครื่องส่ง

จะใช้ 2 บิตที่ 8 และบิตที่ 9 ใน Reserved Field ของ TCP Header [4]

ตารางที่ 3.2 การทำสัญลักษณ์ที่เครื่องรับที่บิต CWR และบิต ECE

บิต CWR (บิตที่ 8 ใน Reserved Field)	บิต ECE (บิตที่ 9 ใน Reserved Field)	ระดับของความคับคั่ง (Congestion State)
0	0	ไม่มีความคับคั่ง
0	1	เริ่มคับคั่ง
1	1	คับคั่งปานกลาง
แฟ้มเกิดสูญหาย		ระบบคับคั่ง

3.2.3 การตอบสนองของเครื่องส่ง

เครื่องส่งตอบสนองกับสถานะความคับคั่งของระบบโดยการคูณขนาด Congestion Window ด้วยตัวแปร α โดยจะวิเคราะห์ค่าของตัวแปร α เป็นสองกรณี

ตารางที่ 3.3 การตอบสนองโดยเครื่องส่ง [4]

ระดับของความคับคั่ง (Congestion State)	cwnd เปลี่ยนแปลง กรณีที่ 1	cwnd เปลี่ยนแปลง กรณีที่ 2
ไม่มีความคับคั่ง	เพิ่ม “cwnd” ตามปกติ	เพิ่ม “cwnd” ตามปกติ
เริ่มคับคั่ง	คูณด้วยตัวคูณลด $\alpha_1 = 20\%$	คูณด้วยตัวคูณลด $\alpha_1 = 20\%$
คับคั่งปานกลาง	คูณด้วยตัวคูณลด $\alpha_2 = 40\%$	คูณด้วยตัวคูณลด $\alpha_2 = 35\%$
ระบบคับคั่ง	คูณด้วยตัวคูณลด $\alpha_3 = 50\%$	คูณด้วยตัวคูณลด $\alpha_3 = 50\%$

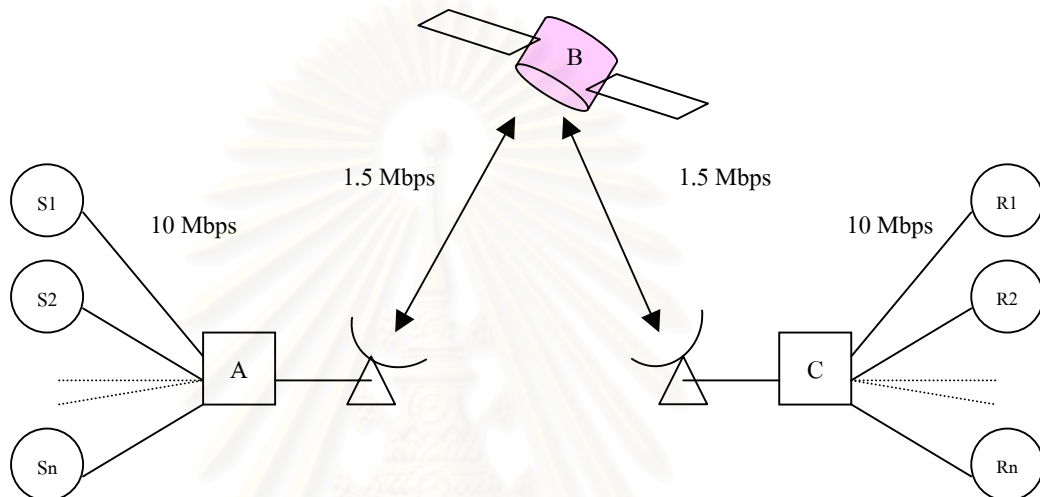
การใช้ Fast Retransmit อัลกอริทึมเมื่อเกิดข้อมูลสูญหาย ในช่วงที่เกิดข้อมูลสูญหายระบบจะทำการลด Congestion Window ลงครึ่งหนึ่ง เมื่อช่วง Fast Retransmit และ Rapid Recovery อัลกอริทึมหลังจากนั้นจะวนกลับเข้าสู่ช่วง Congestion Avoidance อีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 3.1

โดยทำการส่งใหม่ทันทีที่ได้รับ Acknowledge 3 ครั้ง และเริ่ม Slow Start อัลกอริทึมและเริ่มกำหนดให้ $cwnd = 1$

ใช้ Rapid Recovery อัลกอริทึมแทน Fast Recovery อัลกอริทึม ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อแก้ปัญหาเนื่องจากการเชื่อมโยงระบบผิดพลาด

3.3 รูปแบบจำลองการทดลอง

จำลองการทดลองและควบคุมความคับคั่งโดยใช้ Slow Start อัลกอริทึม Congestion Avoidance อัลกอริทึมและ Fast Retransmit & Rapid Recovery อัลกอริทึม โดยประกอบด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 3.4 การจำลองการทดลองระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม

กำหนดให้สถานะของระบบโดยมีเครื่องส่ง 10 เครื่อง ($S_1 \dots S_{10}$) เชื่อมโยงที่เส้นทาง A มีอัตราการเชื่อมโยง 10 Mbps เส้นทาง A เชื่อมโยงกับเส้นทาง B โดยมีอัตราการเชื่อมโยง 1.5 Mbps เส้นทาง B เชื่อมโยงกับเส้นทาง C โดยมีอัตราการเชื่อมโยง 1.5 Mbps และเส้นทาง C เชื่อมโยงกับผู้รับ 10 เครื่อง ($R_1 \dots R_{10}$) โดยมีอัตราการเชื่อมโยง 10 Mbps

กำหนดให้เครื่องส่งแต่ละเครื่องเป็นอิสระต่อกันในการเพิ่มขนาดหรือลดขนาด Congestion Window

3.3.1 Sudden Start

ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมและขนาดของ Congestion Window ($cwnd$) และ Acknowledge Segments ($acked$) ในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมโยงระบบโดยกำหนดให้เวลาไปกลับเป็น 550 ms เทียบกับเวลาในหน่วย Round Trip Time (RTT) โดยใช้หลักการตามรูปที่ 3.2

3.3.2 Congestion Avoidance

กำหนดให้สถานะของระบบโดยเครื่องส่ง $S_1 \dots S_{10}$ เชื่อมโยงที่เส้นทาง A มีอัตราการเชื่อมโยง 10 Mbps มีเวลาหน่วง 2 ms เส้นทาง A เชื่อมโยงกับเส้นทาง B โดยมีอัตราการเชื่อมโยง 1.5 Mbps มีเวลาหน่วง 65 ms เส้นทาง B เชื่อมโยงกับเส้นทาง C โดยมีอัตราการเชื่อมโยง 1.5 Mbps มีเวลาหน่วง 65 ms และเส้นทาง C เชื่อมโยงกับผู้รับ $R_1 \dots R_{10}$ โดยมีอัตราการเชื่อมโยง 10 Mbps และมีเวลาหน่วง 4 ms

กำหนดให้เครื่องส่งมีเวลาไปกลับต่างกัน โดยเริ่มจาก 272 ms และเพิ่ม 10 ms ในทุกๆ เครื่องส่ง ดังนั้น เวลาไปกลับจะมีค่าดังนี้ 272, 282, ..., 362 ms

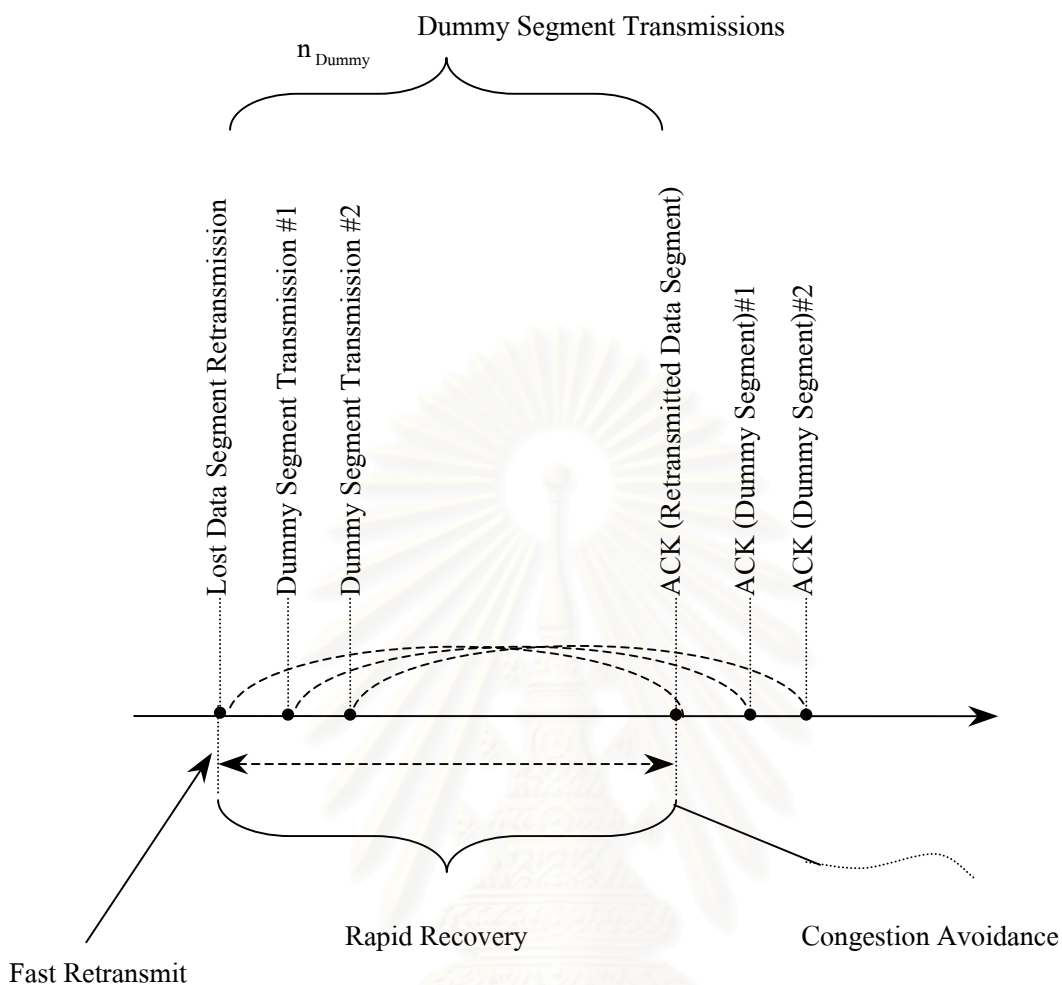
การบอกความคับคั่งหลายระดับ (MECN) เพื่อทำการวิเคราะห์ Instantaneous Queue และ Average Queue เทียบกับ ค่า Threshold (min_th , mid_th และ max_th) และการปรับค่า α_x Congestion Window ($cwnd$) กับตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบและอัตราการส่งข้อมูลเพื่อให้สามารถลดการเกิดความคับคั่งซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการเชื่อมโยงระบบ

3.3.3 Fast Retransmit & Rapid Recovery

โดยการจำลองการทำงานและวิเคราะห์ขนาด Congestion Window เทียบกับช่วงเวลา กำหนดให้เวลาไปกลับเท่ากับ 550 ms และสมมติให้มีข้อมูลสูญหาย

การทำงานของ Fast Retransmit & Rapid Recovery อัลกอริทึมมีหลักการดังรูปที่ 3.5 ซึ่งจะคล้ายกับ Sudden Start อัลกอริทึม เมื่อมีการส่ง Data Segment หลังจากนั้นจะมีการส่ง Dummy Segments

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

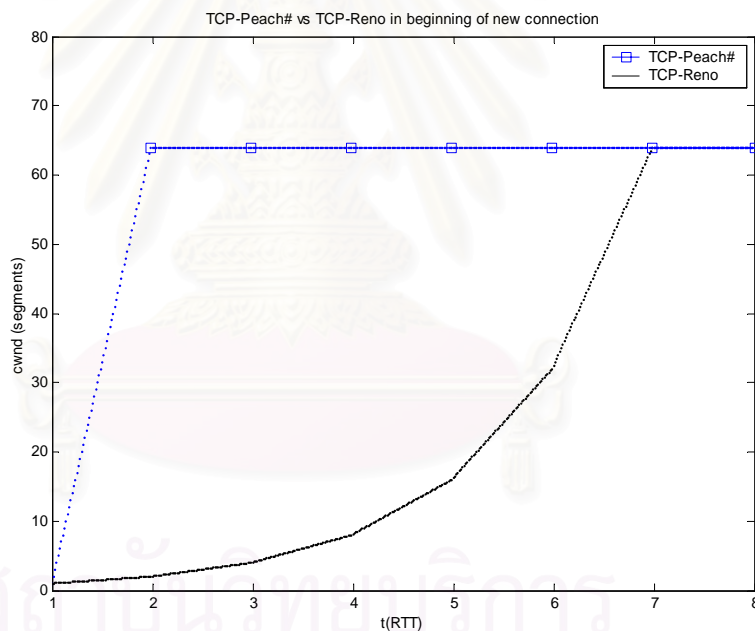


รูปที่ 3.5 การทำงานของ Fast Retransmit & Rapid Recovery อัลกอริทึม

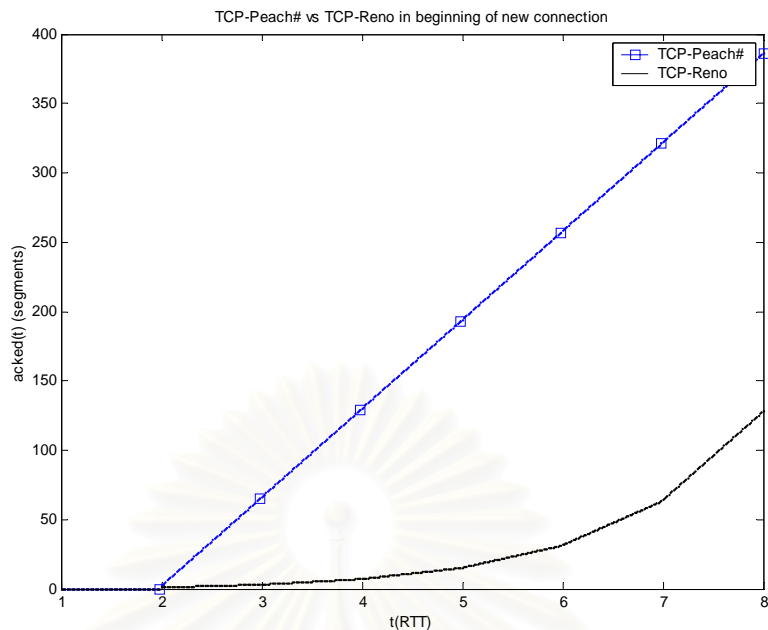
บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการจำลองระบบและทดลองโดยการเขียนโปรแกรม Matlab เพื่อศึกษาผลการทดลองโดยเริ่มจาก Sudden Start อัลกอริทึม เพื่อเปรียบเทียบ Congestion Window ($cwnd$) ในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมต่อ ($cwnd$) มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งผลที่ได้ดังรูปที่ 4.1 จะพบว่าในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมต่อในรูปแบบเดิมคือ TCP-Reno, Congestion Window จะเพิ่มขึ้นทุกๆ สองเท่าของเวลาไปกลับ (RTT) แต่รูปแบบ TCP-Peach# ที่นำเสนอ Congestion Window จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและจะเพิ่มขึ้นเท่ากับ Maximum Congestion Window ($rwnd$) ภายในเวลา 2 เท่าของเวลาไปกลับ เนื่องจากในช่วงเวลาระหว่างเวลา RTT ถึง $2 \times RTT$ Congestion Window จะเพิ่มทุกๆ ที่ได้รับ Acknowledge Segments ดังแสดงเส้นที่เป็นสี่เหลี่ยม



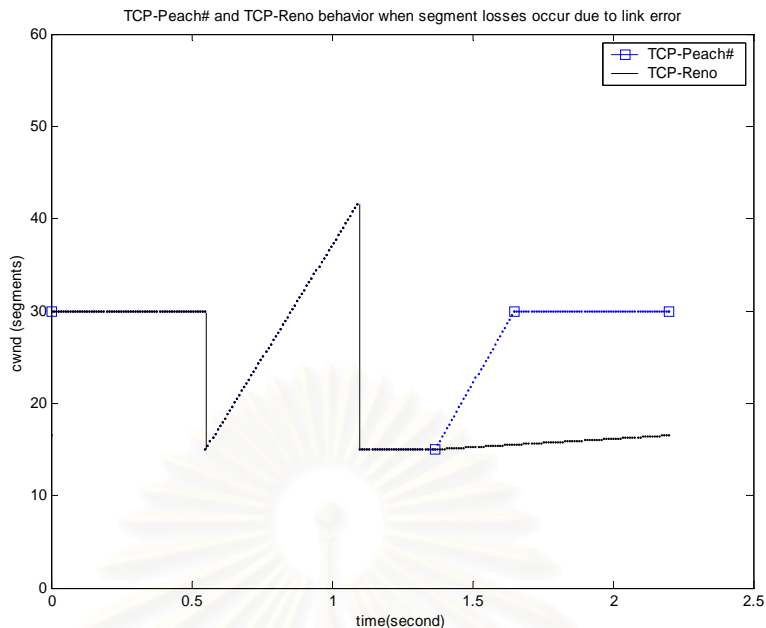
รูปที่ 4.1 TCP-Peach# กับ TCP-Reno ในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมต่อระหว่าง Congestion Window กับ RTT



รูปที่ 4.2 Acknowledge Data ของ TCP-Peach# กับ TCP-Reno ในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมโยงระบบ

จากรูปที่ 4.2 แสดงการวิเคราะห์ Acknowledge Segments จะพบว่า TCP-Peach# เครื่องส่งจะได้รับ Acknowledge Segments มากกว่า TCP-Reno เมื่อเทียบในช่วงเวลาเดียวกัน ซึ่งเกิดจากการเพิ่ม Congestion Window อย่างรวดเร็วในช่วง 2 เท่าของเวลาไปกลับ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของ Congestion Window

การปรับเปลี่ยนค่า wq (Weighting Factor) มีผลกระทบต่อค่า min_th , mid_th และค่า max_th ด้วย ซึ่งถ้าหากใช้ค่า wq ที่มีค่ามากจะทำให้ขนาดคิวเฉลี่ย $aveQ$ (Average Queue Size) ใน Random Early Detection (RED) อัดอกริซึม เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

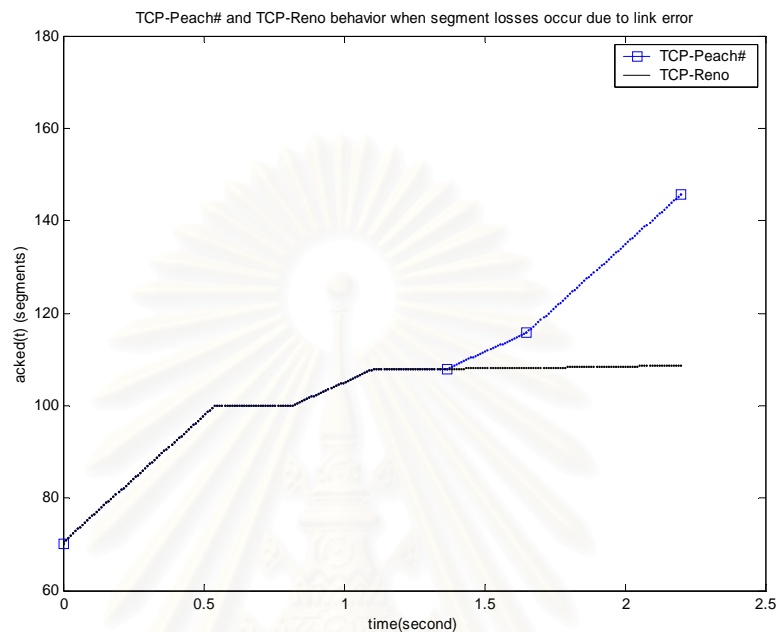


รูปที่ 4.3 TCP-Peach# กับ TCP-Reno เมื่อข้อมูลสูญหายเนื่องจากการเชื่อมโยงผิดพลาด
ระหว่าง Congestion Window กับ RTT

จากรูปที่ 4.3 สมมติให้ RTT มีค่าเท่ากับ 0.55 วินาที และให้ข้อมูลสูญหายที่เวลา t_0 และตรวจสอบได้ว่าข้อมูลสูญหายที่เวลา $t = (t_0 + RTT) = 0.55$ วินาที ดังนั้นที่เวลา 0.55 วินาที ขนาดของ Congestion Window จะลดลงครึ่งหนึ่ง ดังนั้น $cwnd = 15$ ดังนั้น TCP-Peach# จะใช้ Rapid Recovery อัลกอริทึมในขณะที่เดียวกัน TCP-Reno จะใช้ Fast Recovery อัลกอริทึม ในช่วงเวลานี้ ขนาดของ Congestion Window ($cwnd$) จะเพิ่มครั้งละ 1 Segment ต่อการได้รับ Acknowledge ในช่วงนี้เครื่องส่งได้รับ 27 Segments จนเท่ากับ 42 Segments ที่เวลา $t \approx (t_0 + 2 \times RTT) = 1.1$ วินาที เครื่องส่งได้รับ Acknowledge สำหรับข้อมูลส่วนที่สูญหาย ดังนั้นทั้ง TCP-Peach# และ TCP-Reno ลดขนาดของ Congestion Window ($cwnd$) ลงเท่ากับ 15 Segments และเข้าสู่ช่วง Congestion Avoidance ในช่วงนี้ TCP-Peach# ได้รับ Acknowledge สำหรับ Dummy Segments ที่ส่งก่อนในช่วง Rapid Recovery ดังนั้น $t \approx (t_0 + 2.5 \times RTT) = 1.375$ วินาที จนถึง $t \approx (t_0 + 3 \times RTT) = 1.65$ วินาที ขนาดของ $cwnd$ สำหรับ TCP-Peach# เพิ่มขึ้นจาก 15 เป็น 30 Segments สำหรับ TCP-Reno, Congestion Window ($cwnd$) จะเพิ่ม 1 Segment ต่อช่วงเวลาไปกลับ (RTT)

จากการจำลองการทดลองพบว่ากรณีที่ Congestion Window ที่เพิ่มขึ้นแตกต่างกันในช่วง $t \approx (t_0 + 2.5 \times RTT) = 1.375$ วินาทีถึงช่วง $t \approx (t_0 + 3 \times RTT) = 1.65$ วินาที เกิดจากในช่วงเวลา $t \approx (t_0 + 2 \times RTT) = 1.1$ วินาที มีการใช้อัลกอริทึมที่ต่างกัน โดยที่ TCP-Peach# ใช้ Rapid

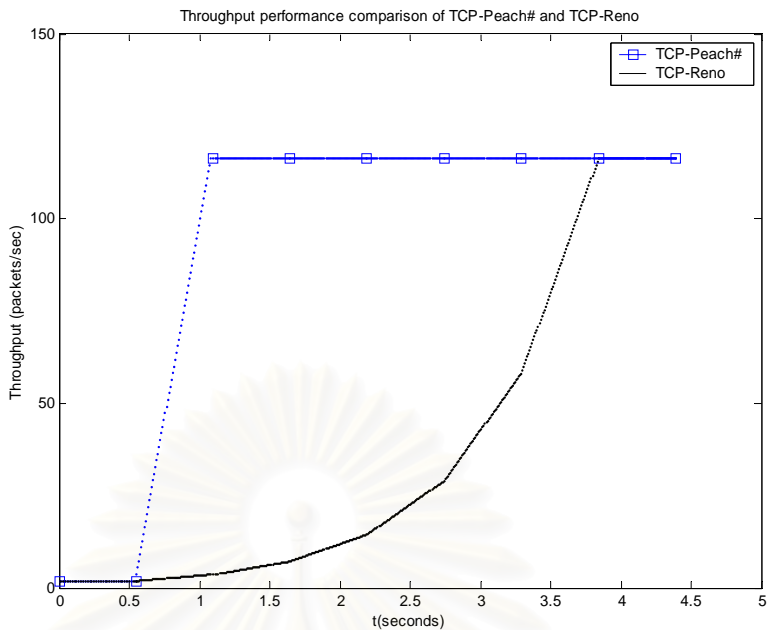
Recovery อัลกอริทึม แต่ TCP-Reno ใช้ Fast Recovery ข้อแตกต่างก็คือการใช้ Dummy Segments ทำให้ในช่วงตั้งแต่ $t \approx (t_0 + 2.5 \times RTT) = 1.375$ วินาทีถึงช่วง $t \approx (t_0 + 3 \times RTT) = 1.65$ วินาที เครื่องส่งจะได้รับ Acknowledge Segments ทำให้ Congestion Window เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถเพิ่มวิสัยความสามารถของระบบเนื่องจากการเชื่อมโยงผิดพลาด



รูปที่ 4.4 TCP-Peach# กับ TCP-Reno เมื่อข้อมูลสูญหายเนื่องจากการเชื่อมโยงผิดพลาด ระหว่าง Acknowledge กับ RTT

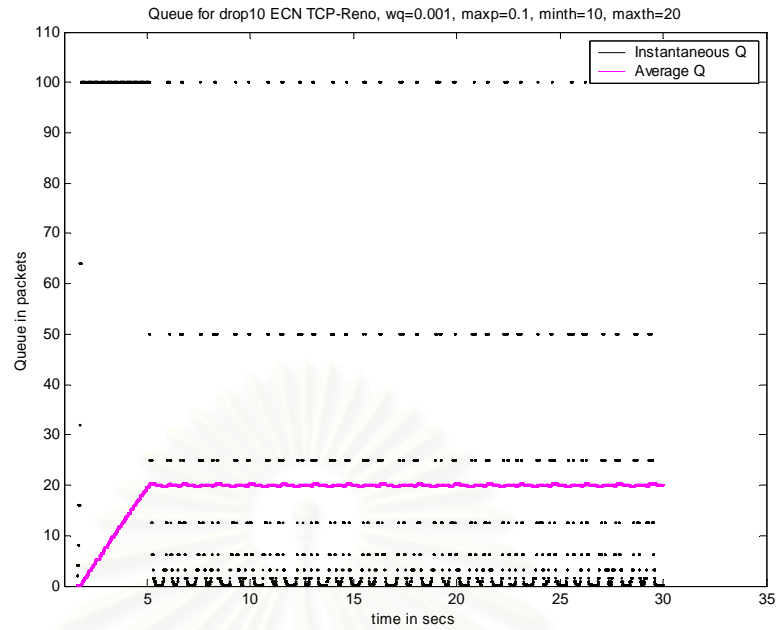
จากเหตุการณ์สมมติข้างต้นสามารถเปรียบเทียบ Acknowledge Segments กับเวลา (วินาที) ดังรูปที่ 4.4 จะพบว่า Fast Retransmit & Rapid Recovery อัลกอริทึมสามารถแก้ไขและเพิ่มวิสัยความสามารถให้กับระบบได้เมื่อเปรียบเทียบกับ Fast Retransmit & Fast Recovery อัลกอริทึมเดิม เนื่องจากการเชื่อมโยงผิดพลาด

เปรียบเทียบวิสัยความสามารถของระบบในช่วง Sudden Start อัลกอริทึม ดังแสดงในรูป 4.5 จะพบว่าหลังจากช่วงเวลา 1.1 วินาที เท่ากับ RTT วิสัยความสามารถของระบบเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่การสมมติดังกล่าวไม่ได้รวมถึงการแย่งชิงการส่งของเครื่องส่ง ซึ่งอาจเกิดปัญหาการชนกันของข้อมูล อาจทำให้ข้อมูลเกิดการสูญหายได้ วิสัยความสามารถของระบบ

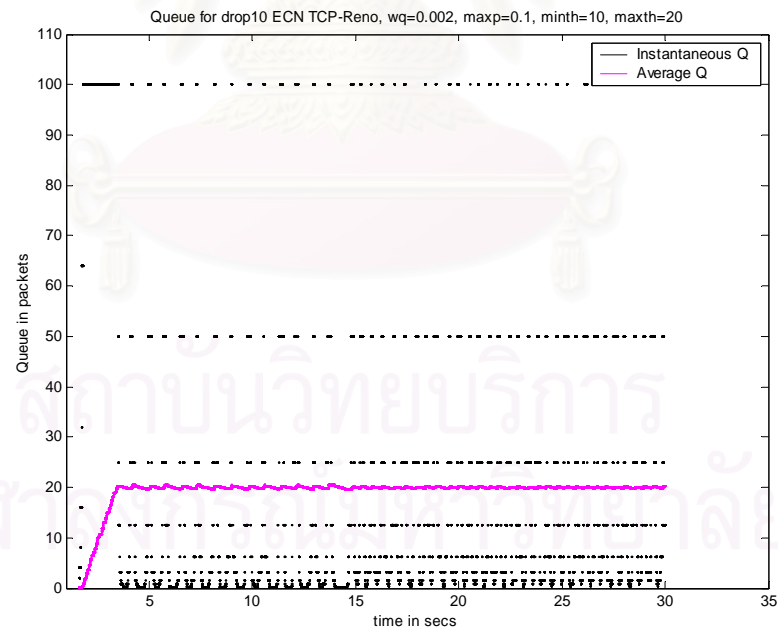


รูปที่ 4.5 วิสัยสามารถของระบบระหว่าง TCP-Peach# กับ TCP-Reno เปรียบเทียบกับเวลาในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมโยงระบบ

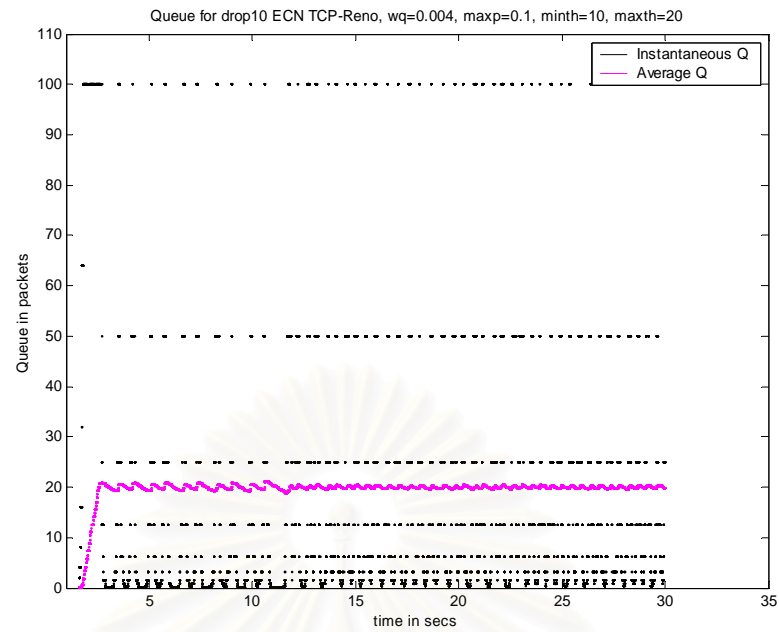
เปรียบเทียบผลการทดลองจากรูปที่ 4.6 ถึง รูปที่ 4.11 เมื่อให้ตัวแปรต่างๆ มีค่าดังนี้ $\max_p = 0.1$, $\min_th = 10$, $\max_th = 20$ และตัวแปรที่แตกต่างกันคือ wq ซึ่งมีค่า 0.001, 0.002, 0.004, 0.008, 0.016 และ 0.024 จะพบว่าถ้าค่า wq ยิ่งมีค่าที่มากขึ้นจะทำค่า Average Queue Size เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าค่า wq ที่มีค่าน้อยๆ ทำให้เพิ่มวิสัยสามารถของระบบแต่หากค่า wq มีค่ามากๆ จะทำให้เกิดการแกว่งตัวของค่า Average Queue Size ทำให้ระบบไม่เสถียรภาพและการควบคุมความคับคั่งทำได้ยาก



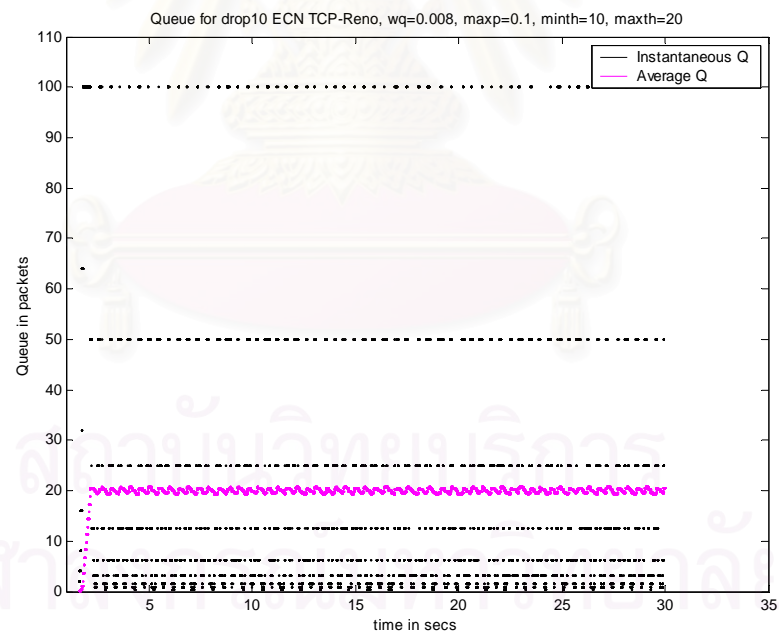
รูปที่ 4.6 คิวสำหรับ ECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.001$, $max_p = 0.1$, $min_th = 10$, $max_th = 20$



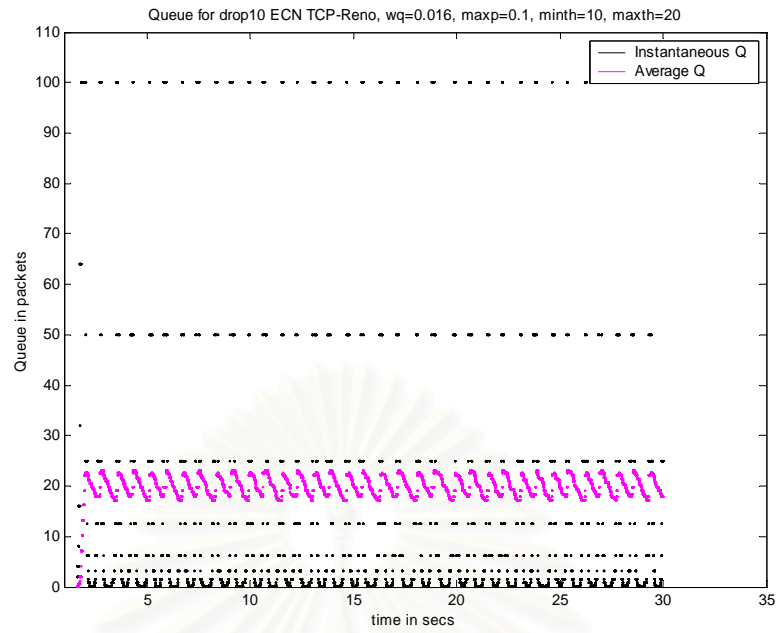
รูปที่ 4.7 คิวสำหรับ ECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.002$, $max_p = 0.1$, $min_th = 10$, $max_th = 20$



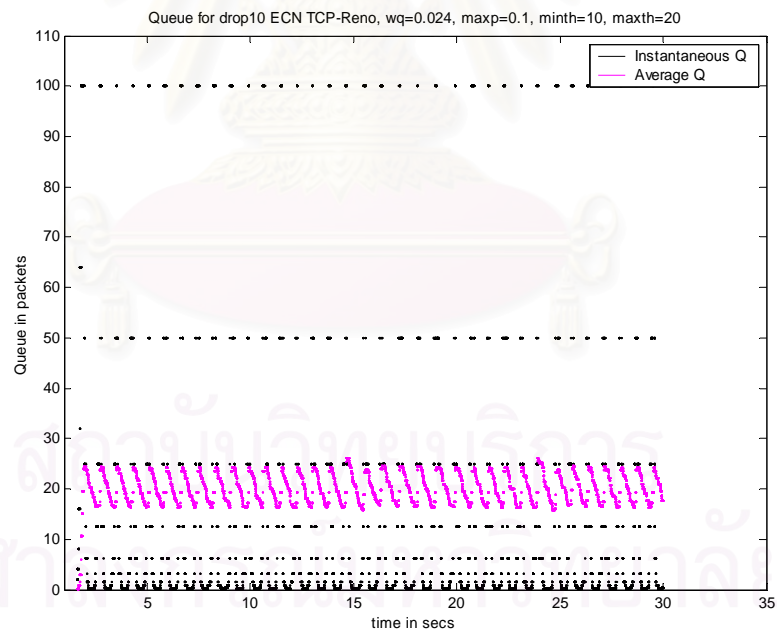
รูปที่ 4.8 คิวสำหรับ ECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.004$, $max_p = 0.1$, $min_th = 10$,
 $max_th = 20$



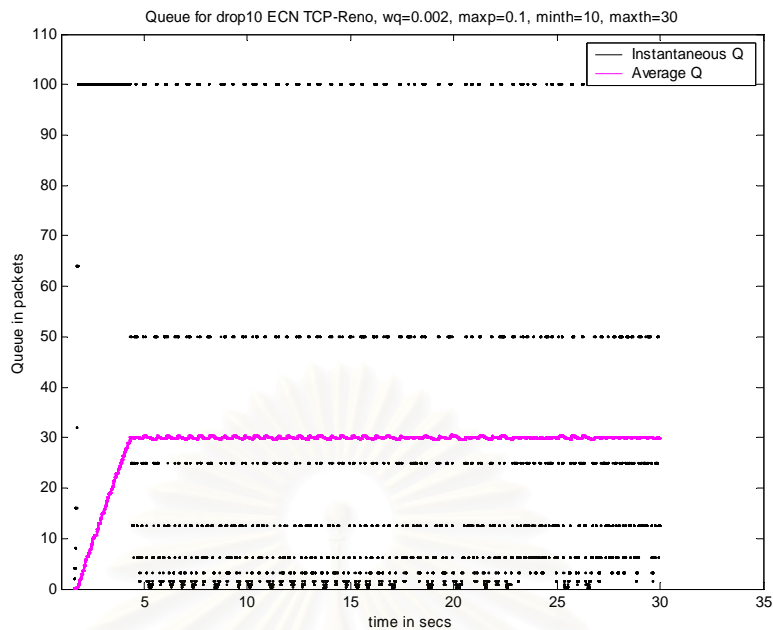
รูปที่ 4.9 คิวสำหรับ ECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.008$, $max_p = 0.1$, $min_th = 10$,
 $max_th = 20$



รูปที่ 4.10 กราฟสำหรับ ECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.016$, $max_p = 0.1$, $min_th = 10$,
 $max_th = 20$

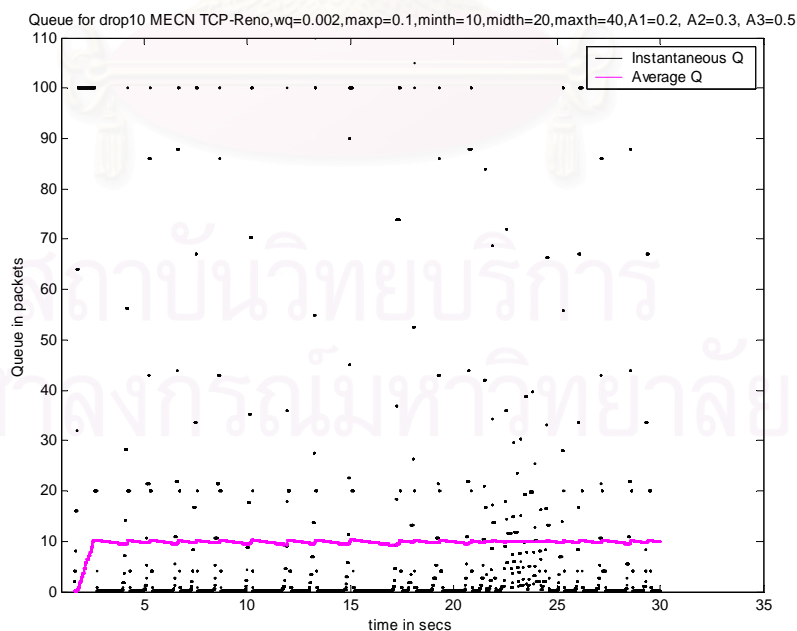


รูปที่ 4.11 กราฟสำหรับ ECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.024$, $max_p = 0.1$, $min_th = 10$,
 $max_th = 20$

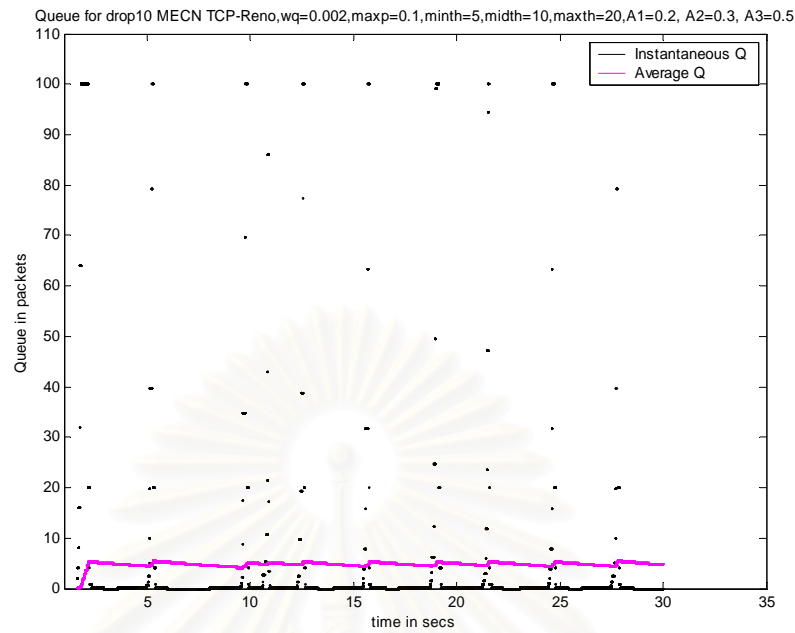


รูปที่ 4.12 คิวสำหรับ ECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.002$, $\max_p = 0.1$, $\min_{th} = 10$,
 $\max_{th} = 30$

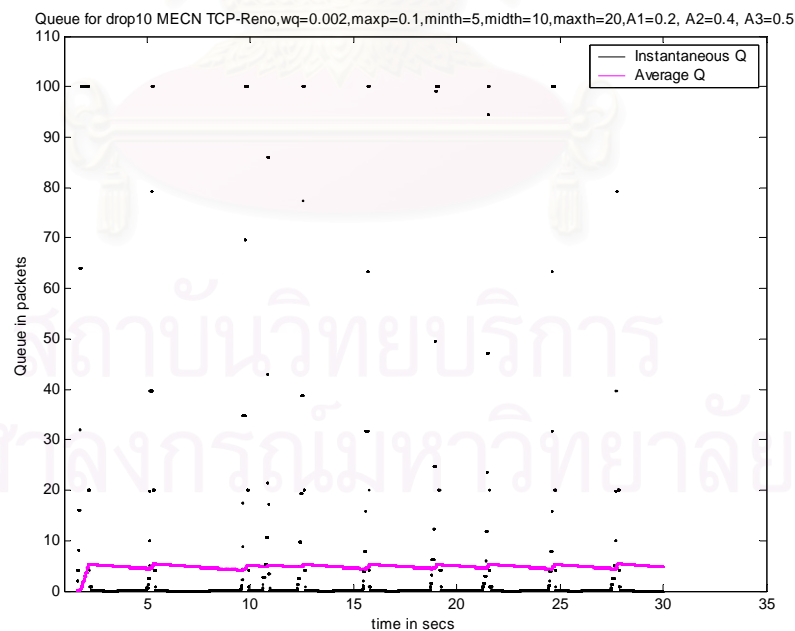
จากรูปที่ 4.13 ถึง รูปที่ 4.24 การใช้ Multi Level Explicit Congestion Notification (MECN) แทน Explicit Congestion Notification (ECN) จะพบว่าค่า Average Queue Size จะแกว่งตัวในช่วงแคบๆ ซึ่งสามารถปรับค่า Average Queue Size ได้ดีกว่าทำให้สามารถสรุปได้ว่าระบบมีเสถียรภาพมากกว่า



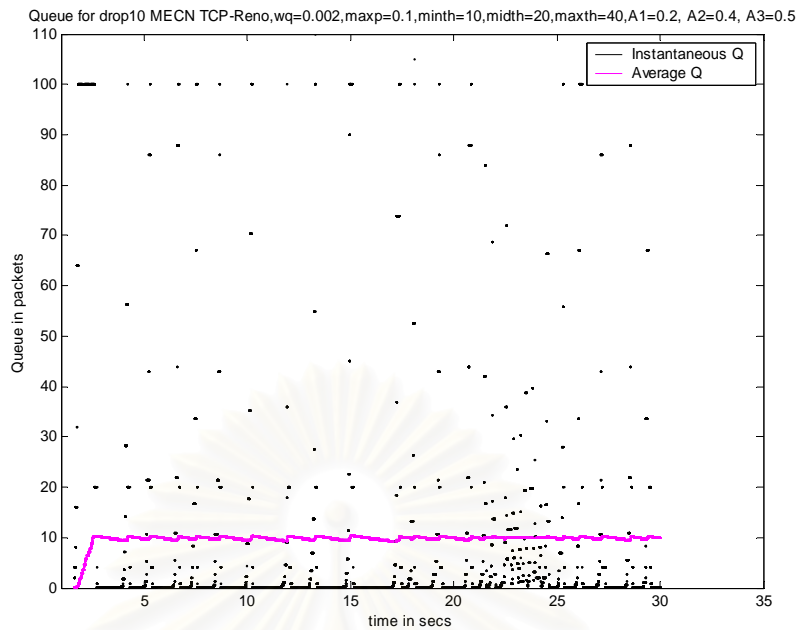
รูปที่ 4.13 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.002$, $\max_p = 0.1$,
 $\min_{th} = 10$, $\text{mid}_{th} = 20$, $\max_{th} = 40$, $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.3$, $\alpha_3 = 0.5$



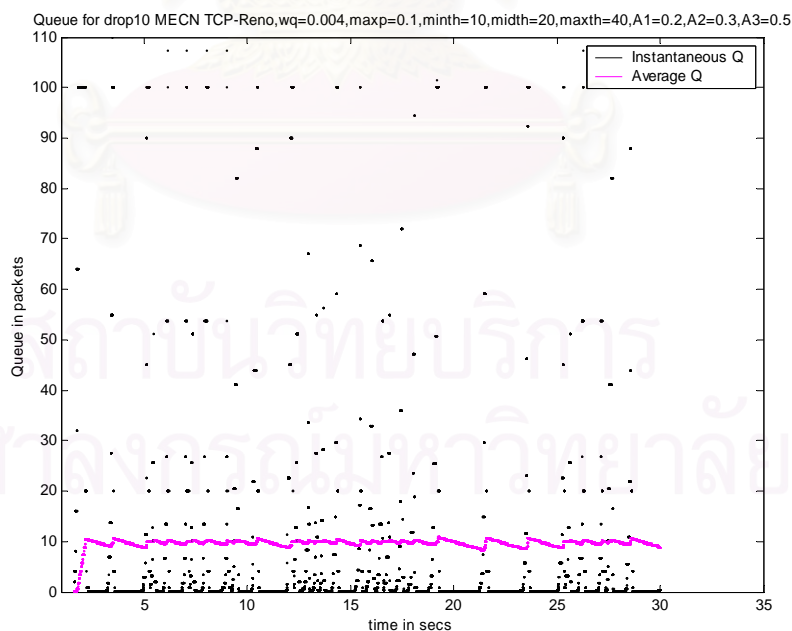
รูปที่ 4.14 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.002$, $\max_p = 0.1$, $\min_th = 5$, $\text{mid_th} = 10$, $\max_th = 20$, $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.3$, $\alpha_3 = 0.5$



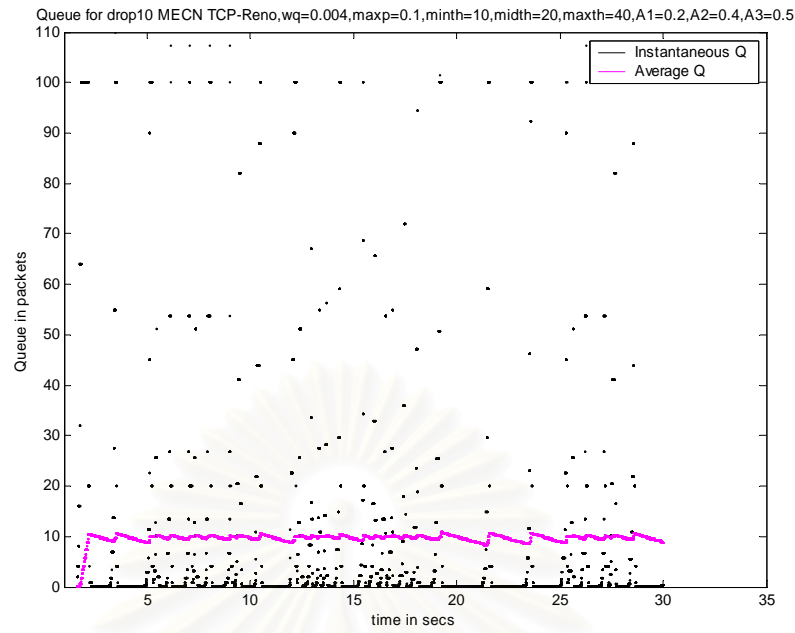
รูปที่ 4.15 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.002$, $\max_p = 0.1$, $\min_th = 5$, $\text{mid_th} = 10$, $\max_th = 20$, $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.4$, $\alpha_3 = 0.5$



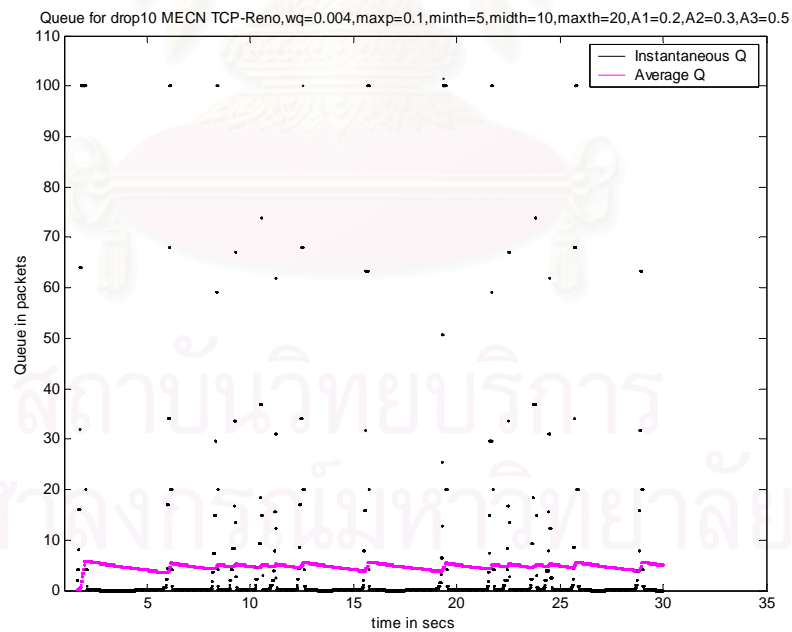
รูปที่ 4.16 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.002$, $\max_p = 0.1$, $\min_{th} = 10$, $\text{mid}_{th} = 20$, $\max_{th} = 40$, $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.4$, $\alpha_3 = 0.5$



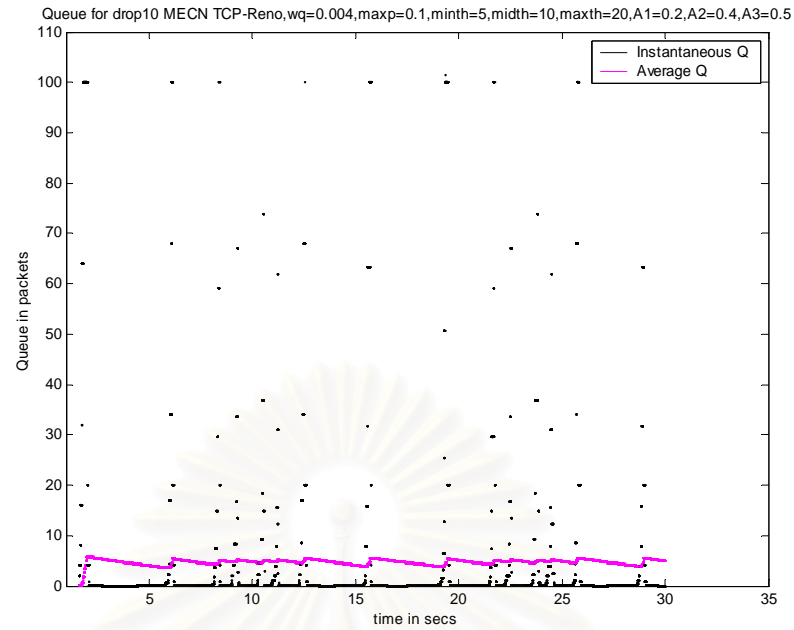
รูปที่ 4.17 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.004$, $\max_p = 0.1$, $\min_{th} = 10$, $\text{mid}_{th} = 20$, $\max_{th} = 40$, $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.3$, $\alpha_3 = 0.5$



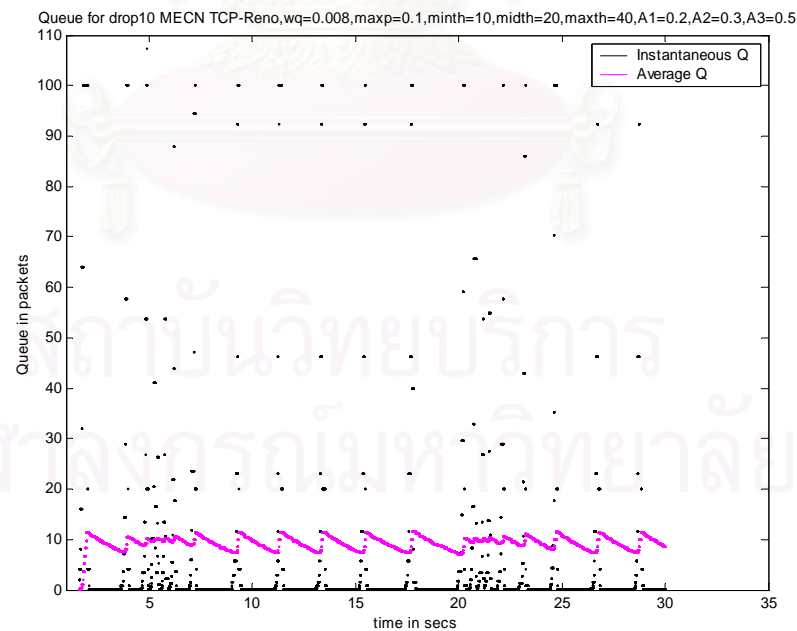
รูปที่ 4.18 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.004$, $\max_p = 0.1$, $\min_th = 10$,
 $\text{mid_th} = 20$, $\max_th = 40$, $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.4$, $\alpha_3 = 0.5$



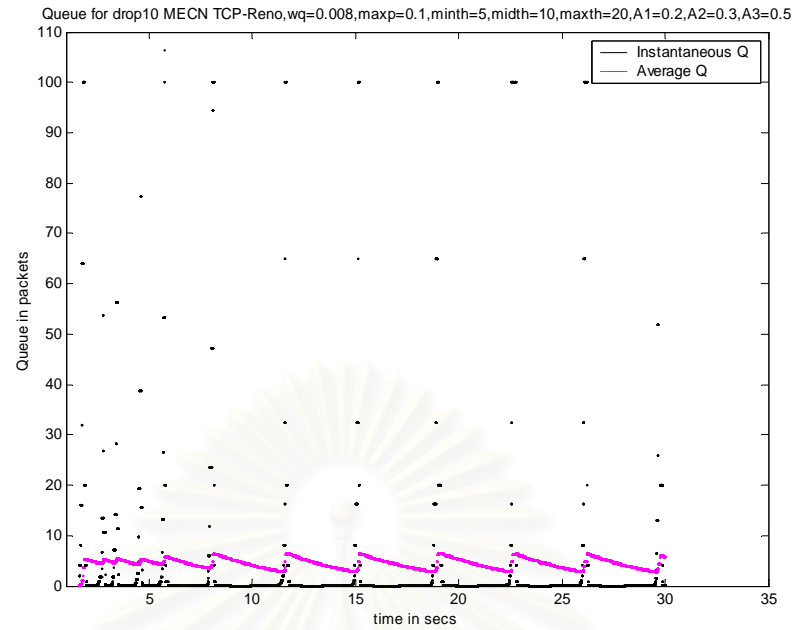
รูปที่ 4.19 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.004$, $\max_p = 0.1$, $\min_th = 5$,
 $\text{mid_th} = 10$, $\max_th = 20$, $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.3$, $\alpha_3 = 0.5$



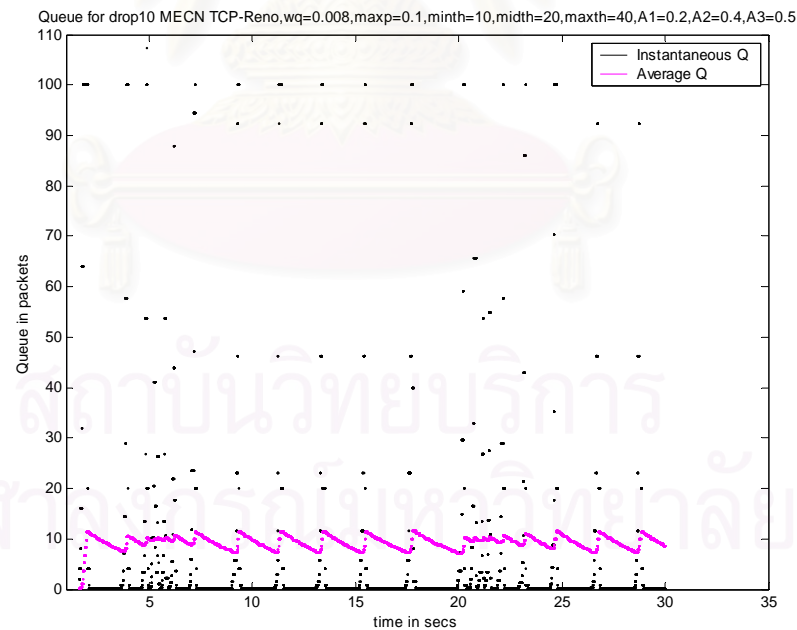
รูปที่ 4.20 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.004$, $max_p = 0.1$, $min_th = 5$,
 $mid_th = 10$, $max_th = 20$, $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.4$, $\alpha_3 = 0.5$



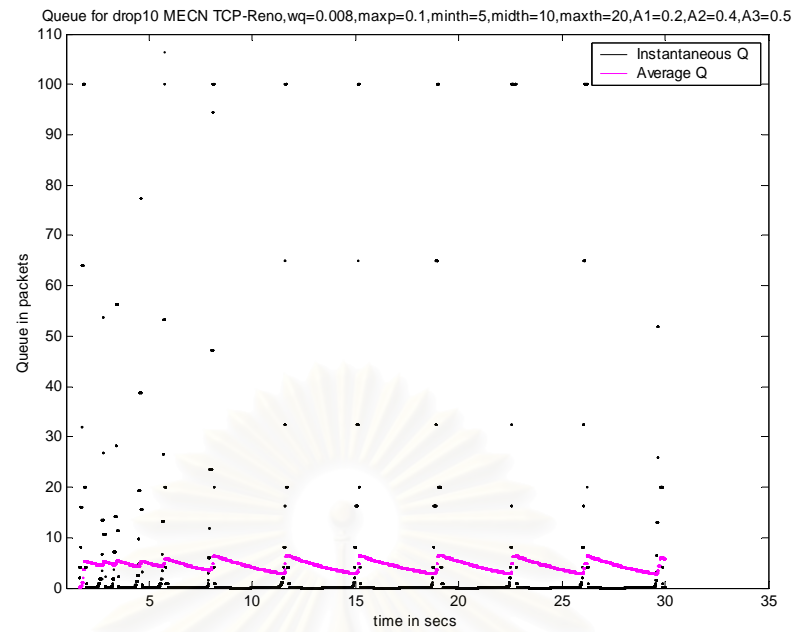
รูปที่ 4.21 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.004$, $max_p = 0.1$, $min_th = 10$,
 $mid_th = 20$, $max_th = 40$, $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.3$, $\alpha_3 = 0.5$



รูปที่ 4.22 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.008$, $max_p = 0.1$, $min_th = 5$,
 $mid_th = 10$, $max_th = 20$, $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.3$, $\alpha_3 = 0.5$



รูปที่ 4.23 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.008$, $max_p = 0.1$, $min_th = 10$,
 $mid_th = 20$, $max_th = 40$, $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.4$, $\alpha_3 = 0.5$



รูปที่ 4.24 คิวสำหรับ MECN TCP-Reno เมื่อ $wq = 0.008$, $\max_p = 0.1$, $\min_{th} = 5$,
 $\text{mid}_{th} = 10$, $\max_{th} = 20$, $\alpha_1 = 0.2$, $\alpha_2 = 0.4$, $\alpha_3 = 0.5$

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากผลการทดลองสามารถสรุปในส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

1. Sudden Start อัลกอริทึม จากการทดลองพบว่าการใช้ Dummy Segment มีผลทำให้สามารถเพิ่ม Congestion Window ได้เร็วกว่า Slow Start อัลกอริทึม กล่าวคือ Sudden Start อัลกอริทึมสามารถเพิ่ม Congestion Window ภายในเวลาสองเท่าของเวลาไปกลับ (RTT) ในขณะที่เดียวกัน Slow Start อัลกอริทึมจะเพิ่ม Congestion Window เป็นสองเท่าในทุกๆ ของเวลาไปกลับ (RTT) และเนื่องจากการเพิ่มขนาดของ Congestion Window ทำให้วิสัยความสามารถของระบบเพิ่มขึ้น

จากการจำลองการทดลองไม่ได้คำนึงถึงการแย่งชิงการส่งข้อมูลของเครื่องส่งแต่ละเครื่อง ซึ่งอาจทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลทำให้ข้อมูลสูญหาย มีผลทำให้วิสัยความสามารถที่ได้อาจมีค่าลดลงและอาจไม่เป็นไปตามผลการทดลองที่ได้นำเสนอในรูปแบบที่ 4.5

การใช้ Dummy Segments มีประโยชน์และสามารถใช้ทรัพยากรของระบบได้อย่างเต็มที่ซึ่งจะมีผลในช่วงการเชื่อมโยงระบบใหม่ใน Sudden Start และ Fast Retransmit & Rapid Recovery อัลกอริทึม

2. Congestion Avoidance อัลกอริทึม ใช้แก้ปัญหาในส่วนของการเกิดความคับคั่งของเส้นทาง โดยมีการส่งข้อมูลสถานะของระดับความคับคั่งให้กับเครื่องส่งรับรู้และปรับค่า Congestion Window และอัตราการส่งข้อมูลก่อนที่จะเกิดความคับคั่งจนทำให้ข้อมูลสูญหาย การใช้ wq มีค่ามากจะทำให้ลดการหน่วงเวลาของระบบ แต่จะทำให้ระบบขาดเสถียร เพราะค่า Average Queue Size ($aveQ$) จะแกว่งตัวในช่วงที่กว้างมาก

จากการใช้ Multi Level Explicit Congestion Notification (MECN) ทำให้ระบบสามารถลดความคับคั่งลงได้โดยการส่งข้อมูลสถานะของความคับคั่งของระบบให้เครื่องส่งรับรู้และสามารถปรับค่า Congestion Window เพื่อปรับอัตราการส่งให้เหมาะสมกับสภาวะความคับคั่งของระบบ ก่อนที่ข้อมูลสูญหายเนื่องจากความคับคั่ง

3. Fast Retransmit & Rapid Recovery อัลกอริทึม สามารถใช้แก้ปัญหาเนื่องจากการเชื่อมโยงระบบผิดพลาดและมีผลทำให้เพิ่มวิสัยความสามารถของระบบเนื่องจากการใช้ Dummy Segments

จากผลการทดลองผลการใช้อัลกอริทึมทั้ง 3 ส่วน สามารถเพิ่มวิสัยความสามารถของระบบและลดการเกิดความคับคั่ง แต่ในการจำลองการทดลองในบางส่วนยังขาดการคำนึงถึงสภาพของการใช้งานจริง เช่นการแย่งชิงกันของเครื่องส่งในช่วงการใช้ Sudden Start อัลกอริทึม ทำให้อาจเกิดปัญหาการชนกันของข้อมูลอาจทำให้เกิดข้อมูลสูญหายในช่วงนี้ได้ การใช้งานจริงอาจต้องทดลองตัวแปรต่างๆ ก่อนใช้งานจริง แต่เนื่องจากยังมีอัลกอริทึมอื่นๆ ที่สามารถใช้ในการแก้ปัญหาของระบบซึ่งอัลกอริทึมหนึ่งอาจจะเหมาะสมกับระบบหนึ่ง แต่อาจไม่เหมาะสมกับระบบอื่นๆ ซึ่งในปัจจุบันได้มีนักวิจัยได้เสนออัลกอริทึมต่างๆ เพื่อใช้ในการแก้ปัญหา ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงเป็นส่วนและแนวทางหนึ่งในการศึกษาและพัฒนาวิธีการในการควบคุมความคับคั่งในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม

ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานที่ควรได้รับการศึกษาหรือพัฒนาต่อไปในอนาคต

1. การจำลองระบบที่มีความแตกต่างกันในจำนวนการเครื่องส่งและเครื่องรับ
2. การศึกษาของสถานะของการใช้งานจริงซึ่งอาจมีการแย่งชิงกันส่งข้อมูลระหว่างเครื่องส่งต่าง ๆ
3. การศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของอัตราความผิดพลาดของข้อมูล (Bit Error Rate) กับการแก้ปัญหาของความคับคั่ง
4. การศึกษาตัวดาวเทียม ระบบภายในตัวดาวเทียมซึ่งสามารถทำการวิจัยและพัฒนาในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] Ian F. Akyildiz, Giacomo Morabito, Sergio Palazzo, "TCP-Peach: A New Congestion Control Scheme for Satellite IP Networks," *IEEE/ACM Transactions On Networking*, vol. 9, No. 3, June 2001.
- [2] Craig Partridge and Timothy J. Shepard, "TCP/IP Performance over Satellite Links," *IEEE Network*, September/October 1997.
- [3] Ian F. Akyildiz, Giacomo Morabito, Sergio Palazzo, "Research Issues for Transport Protocols in Satellite IP Networks," *IEEE Personal Communications*, June 2001.
- [4] Arjan Durresi, Mukundan Sridharan, Chunlei Liu, Mukul Goyal, Raj Jain, "Congestion Control using Multilevel Explicit Congestion Notification in Satellite Networks," *Computer Communications and Networks 2001, Proceedings Tenth International Conference*, Page(s):403-408, 2001.
- [5] Tarek N. Saadawi, Mostafa H. Ammar with Ahmed El Hakeem, "Fundamental of Telecommunication Networks," *John Wiley & Sons, Inc.*, Page(s) : 337-338 and 349-350, 1994.
- [6] David D. Clark and Wenjia Fang, "Explicit Allocation of Best-Effort Packet Delivery Service," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 6, No. 4, August 1998.
- [7] Thomas R. Henderson and Randy H. Katz, "Transport Protocols for Internet-Compatible Satellite Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, No. 2, February 1999.
- [8] Sally Floyd, "TCP and Explicit Congestion Notification," *Computer Communication Review*, vol. 24, No. 5, October 1994, pp. 10-23.
- [9] Sally Floyd and Van Jacobson, "Random Early Detection gateways for Congestion Avoidance," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 1, No. 4, August 1993, pp. 397-413.
- [10] K. Ramakrishnan and S. Floyd, "A Proposal to add Explicit Congestion Notification (ECN) to IP," *RFC2481*, January 1999.
- [11] Sally Floyd, Ramakrishna Gummadi, and Scott Shenker, "Adaptive RED: An Algorithm for Increasing the Robustness of RED's Active Queue Management," AT&T Center for Internet Research at ICSI, August 1, 2001.
- [12] ดร. ประสิทธิ์ ทีฆพุดิ, "การสื่อสารดาวเทียม," วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์
- [13] ดร. ลัญจนกร วุฒิสัทติกุลกิจ, "โครงข่ายอินเทอร์เน็ตและโพรโทคอลที่ซีพี/ไอพี", สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายชูพงษ์ ชลพนารักษ์ เกิดวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2516 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2539 หลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีได้เข้าทำงานในบริษัทเอกชน หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในภาคปลาย ปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย