รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ ประจำปีงบประมาณ 2546
โครงการวิจัยย่อยลำดับที่ 14 เรื่อง
การประเมินประสิทธิภาพสำหรับโครงข่าย TCP/IP ผ่านดาวเทียม
(Performance Evaluation via satellite TCP/IP Networks)

1. ผู้รับผิดชอบโครงการ รศ.ดร. ประสิทธิ์ ทีฆพุฒิ

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาและวิเคราะห์หาแนวทางการประเมินประสิทธิภาพของระบบสื่อสารดาวเทียม รวมถึงการเพิ่มประสิทธิภาพของการสื่อสารดาวเทียม

3. ขอบเขตของงานวิจัย
   1. ศึกษาและวิเคราะห์รูปแบบปัจจุบันของการสื่อสารผ่านดาวเทียมที่มีการนำเสนอ
   2. ศึกษาปัญหาและแนวทางแก้ไขที่เกิดขึ้นในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมในปัจจุบัน
   3. ออกแบบเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองการทำงานของระบบ
   4. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการจำลองผลที่ได้จากโปรแกรม

4. ส่วนงานที่ได้ดำเนินการไปแล้ว
   1. ศึกษาภาพโดยรวมของปัญหาที่เกิดขึ้นและวิธีการแก้ไขของการใช้ transport protocol ในการสื่อสารข้อมูลผ่านดาวเทียม
      - ปัญหาจากความผิดพลาดของการเชื่อมโยง
      - ปัญหาจาก slow start
      - ปัญหาจาก bandwidth asymmetry
      - ปัญหาของ real-time application
   2. ศึกษาการทำ congestion avoidance
   3. ศึกษาการควบคุมความคับคั่งเพิ่มเติมโดยการใช้วิธี Explicit congestion notification ซึ่งเป็นการใช้ค่าใน IP header packet บอกว่าสภาพความคับคั่งเป็นอย่างไร หากระบบเกิดความคับคั่งอย่างมากก็จะหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการสูญหายของกลุ่มข้อมูลโดยไม่จำเป็นได้
   4. ศึกษาอัลกอริทึมที่ใช้ในการควบคุมความคับคั่งของเครือข่าย
   5. วิเคราะห์ประสิทธิภาพของ TCP/IP เมื่อขนาดวินโดว์มีค่าต่างๆกัน พบว่าเมื่อวินโดว์มีขนาดใหญ่ขึ้นจะทำให้ throughput ดีขึ้น แต่เปอร์เซ็นต์การพัฒนาจะลดลงเนื่องจากการเพิ่มขนาดวินโดว์จะไปลดเวลาของ slow start ลง แต่จะไม่มีผลกับช่วง congestion avoidance
   6. ศึกษาโปรแกรม network simulator บนระบบปฏิบัติการ Linux เพื่อใช้ในการศึกษาและ simulate ในงานวิจัย

5. ส่วนงานที่จะดำเนินการต่อไป

1. ศึกษาการบอกความแตกต่างระหว่างความผิดพลาดที่เกิดจากความคับคั่งและความผิดพลาดที่เกิดจากความผิดพลาดในการเชื่อมโยง เนื่องจากในงานวิจัยส่วนใหญ่จะสมมติให้ความผิดพลาดเกิดจากความคับคั่ง แต่ในความเป็นจริงนั้นส่วนใหญ่แล้วจะเกิดจากความผิดพลาดในการเชื่อมโยงมากกว่า ซึ่งถ้าสามารถบอกได้ว่าความผิดพลาดนั้นเกิดจากสาเหตุใดก็จะทำให้แก้ไขได้อย่างถูกต้องและจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้นด้วย
2. ศึกษาการใช้ network simulator เพิ่มเติมต่อไปและนำมาประยุกต์ใช้ในจำลองการทดลองเพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ดียิ่งขึ้น
3. ศึกษา Space Communication Protocol Standard Transport Protocol (SCPS-TP) เพื่อนำมาใช้และปรับปรุงการบอกความแตกต่างระหว่างความผิดพลาดที่เกิดจากความคับคั่งและความผิดพลาดที่เกิดจากความผิดพลาดในการเชื่อมโยงให้ดียิ่งขึ้น
4. หาวิธีการและสร้างแบบจำลองที่จะบอกความแตกต่างระหว่างความผิดพลาดที่เกิดจากความคับคั่งและความผิดพลาดที่เกิดจากความผิดพลาดในการเชื่อมโยง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เนื้อหา

1. ความเป็นมา

ชนิดของดาวเทียม

แบ่งตามลักษณะการโคจรจากพื้นโลกเป็น Low Earth Orbit (LEO), Medium Earth Orbit (MEO) และ ดาวเทียมค้างฟ้า (Geostationary Earth Orbit (GEO)) ซึ่งแต่ละชนิดจะโคจรห่างจากพื้นโลกและมีค่าเวลาไปกลับ (Round Trip time) (RTT) โดยมีรายละเอียดดังนี้ :-

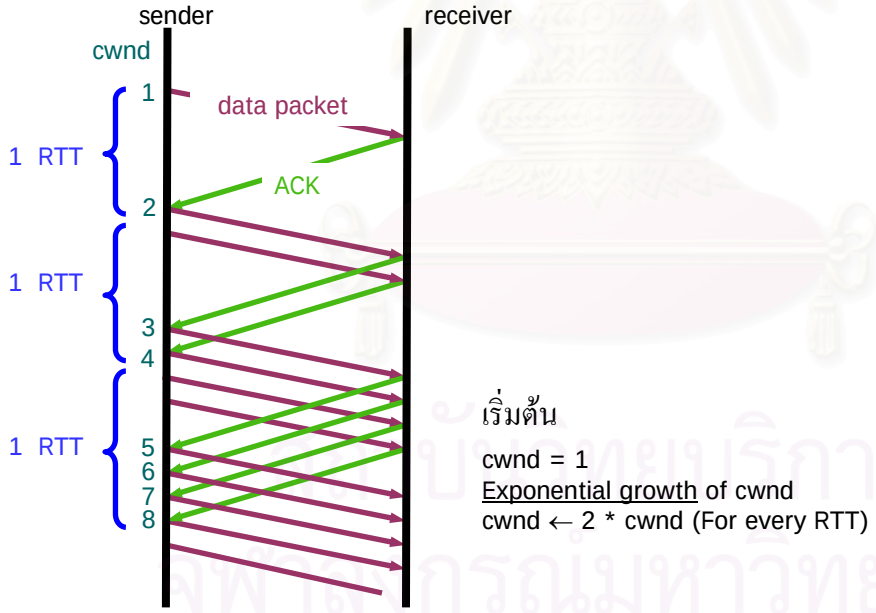
1. Low-Earth Orbit (LEO) มีเวลาไปกลับ (RTT) ประมาณ 0.05 วินาที
2. Medium-Earth Orbit (MEO) มีเวลาไปกลับ (RTT) ประมาณ 0.25 วินาที
3. Geostationary-Earth Orbit (GEO)โคจรห่างจากโลกประมาณ 36,000 กิโลเมตรและมีเวลาไปกลับ (RTT) ประมาณ 0.55 วินาที

ปัญหาในปัจจุบันของระบบ TCP/IP กับระบบดาวเทียม

ในปัจจุบันปัญหาการสื่อสารผ่านดาวเทียมมีดังนี้

1. Slow Start อัลกอริทึม

Slow Start อัลกอริทึม ใช้ในการเริ่มของการเชื่อมต่อระบบ โดยเริ่มต้นจะให้ congestion window $(cwnd)$ มีค่าเท่ากับ 1 หลังจากได้รับ acknowledge เครื่องส่งจะเพิ่ม congestion windowในทุกๆ 2 เท่าของช่วงเวลาไปกลับ ดังแสดงในรูปด้านล่าง

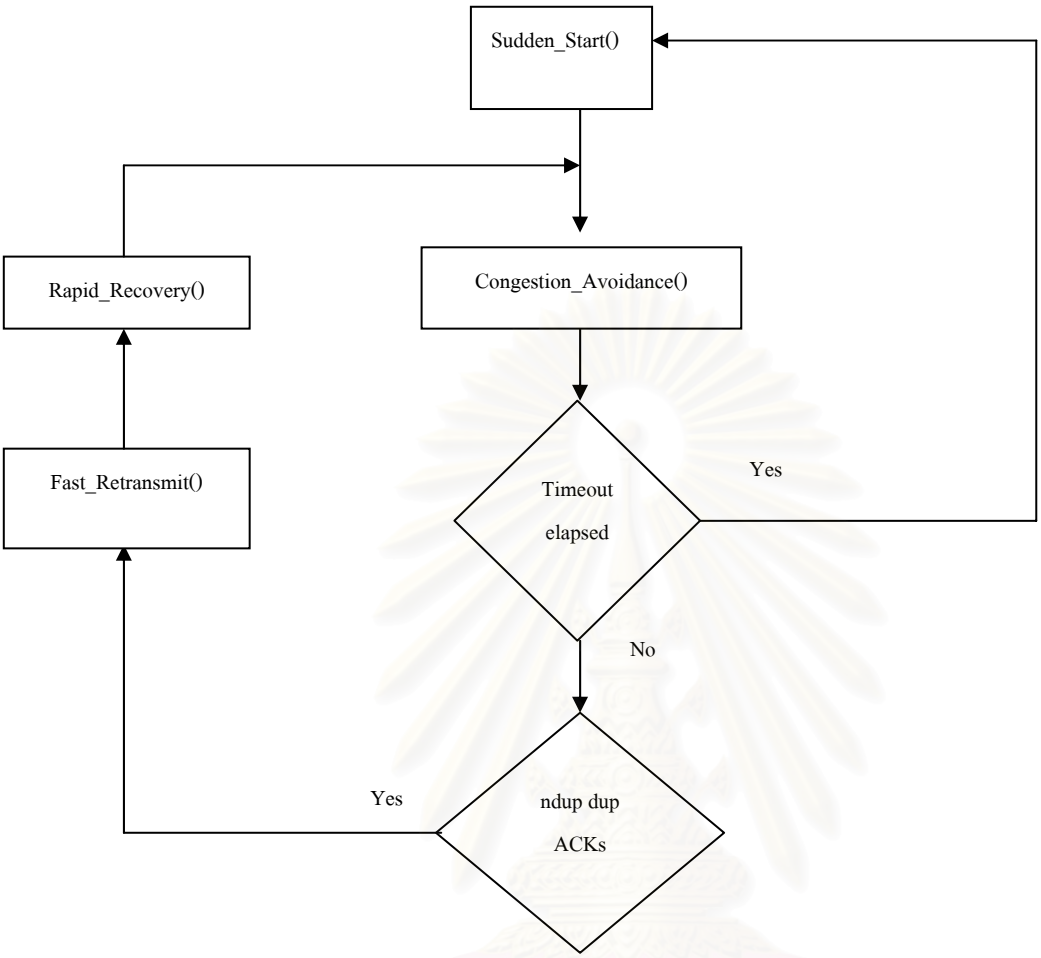


2. ข้อมูลสูญหายเนื่องจากระบบมีความคับคั่ง

อัลกอริทึมที่ใช้แก้ปัญหาดังกล่าวมีดังนี้

- Sudden Start
- Congestion Avoidance
- Fast Retransmit
- Rapid Recovery

โดยอัลกอริทึมต่างๆ มีหลักการทำงานดังนี้



รูปที่ 1.1 ไดอะแกรมของ TCP-Peach# อัลกอริทึม

รายละเอียดของอัลกอริทึมต่างๆ มีดังนี้

1. Slow Start อัลกอริทึม

การเริ่มต้นของการเชื่อมต่อ เครื่องส่งจะส่ง Slow Start อัลกอริทึม เพื่อที่จะทราบว่ามีแบนด์วิดท์เพียงพอหรือไม่ เวลาที่ใช้ดังนี้

$$t_{SlowStart} = RTT * \left(1 + \log_2 B * RTT/l\right) \qquad (1\text{-}1)$$

เมื่อ RTT คือเวลาไปกลับในการส่งข้อมูล (Round Trip time)(วินาที), B คืออัตราข้อมูล (บิตต่อวินาที) และ l คือความยาวเฉลี่ยของแพ็กเกตในหน่วยบิต ปกติจะเท่ากับ 1 กิโลไบต์ มีค่าเท่ากับ 8 กิโลบิต [1]

1.1 Dummy segments

Dummy segments คือข้อมูลส่วนความสำคัญต่ำสร้างโดยเครื่องส่งโดยการทำสำเนาข้อมูลที่ส่งสุดท้ายด้วยเหตุนี้จึงไม่ได้นำข้อมูลใหม่ไปยังผู้รับ

เครื่องส่งใช้ dummy segments ในการทดสอบว่าระบบยังมีเส้นทางในการส่งหรือไม่ถ้าเส้นทางนั้นคับคั่ง จะทำการทิ้งส่วนที่เป็น dummy segments และการส่ง dummy segments ไม่ได้มีผลกระทบในการลดวิสัยสามารถ (Throughput) ของระบบ และถ้า

หากเส้นทางไม่คับคั่ง dummy segments จะถูกส่งไปถึงยังเครื่องรับ เครื่องส่งจะใช้หนึ่งบิตหรือมากกว่า ในส่วนที่ไม่ใช้จาก 6 บิต TCP header เพื่อที่จะแยกแยะระหว่าง dummy segments กับ data segments

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาช่วง Slow Start สำหรับดาวเทียมชนิด LEO, MEO และ GEO

ชนิดของดาวเทียม	RTT (Round-Trip time)	$t_{SlowStart}$ (B = 1 Mb/sec)	$t_{SlowStart}$ (B = 10 Mb/sec)	$t_{SlowStart}$ (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

1.2 โครงสร้างพื้นฐานของระบบสื่อสารดาวเทียม TCP

TCP ในเบื้องต้นถูกพัฒนาเพื่อให้ใช้กับระบบที่มีสายซึ่งอัตราความผิดพลาดของการเชื่อมโยงมีค่าต่ำTransmission 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 ให้มีค่าเป็น 1 segment ซึ่งในระบบดาวเทียม ช่วงเวลา timeout และเริ่ม slow start นี้จะใช้เวลาประมาณหลายวินาทีช่วงเวลานี้วิสัยสามารถจะมีค่าต่ำ [7]

1.3 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) อัลกอริทึม ขึ้นอยู่กับขนาดของคิวเฉลี่ย ในส่วนของเครื่องรับจะส่ง ECN กลับไปยังเครื่องส่งโดยผ่านทาง TCP ACKs เครื่องส่งจะตอบสนองต่อ ECN หนึ่งครั้งต่อเวลาไปกลับ (Round Trip Time) (RTT)

ข้อได้เปรียบของ ECN คือ ในกรณีของเกิดความคับคั่งมีขนาดไม่มากนักจะไม่มีแพ็กเกตสูญหาย และทำให้สามารถบอกข้อมูลความคับคั่งของระบบได้มากขึ้นทำให้สามารถปรับเปลี่ยนอัตราการส่งระหว่างเครื่องส่งกับเครื่องรับทำให้ลดการเชื่อมต่อระบบใหม่ในกรณีที่แพ็กเกตสูญหาย ซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากในระบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมเนื่องจากในระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมนั้นมี long propagation delay มาก

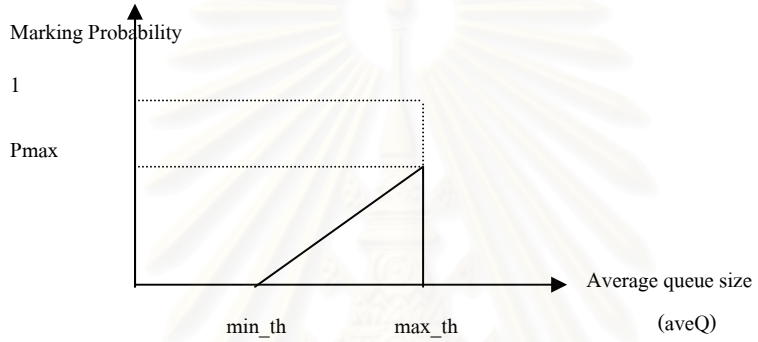
ในปัจจุบัน ECN ใช้ 2 บิตใน IP header (บิตที่ 6 และ บิตที่ 7 ใน TOS (Type of Service)) ซึ่งแต่เดิม ECN ได้กำหนดการควบคุมไว้เป็นสองระดับดังตารางที่ 2[4]

ตารางที่ 1.2 เส้นทางตอบสนองความคับคั่งโดยทำสัญลักษณ์ที่บิต CE และ ECT

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

1.4 Random Early Detection (RED) อัลกอริทึม

Random Early Detection อัลกอริทึมจะคำนวณขนาดคิวเฉลี่ยเมื่อขนาดของคิวเฉลี่ยมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนดไว้ จะทำการทิ้งแพ็กเกตซึ่งค่าความน่าจะเป็นจะเป็นฟังก์ชั่นของขนาดคิวเฉลี่ย [4]



รูปที่ 1.2 Random Early Detection อัลกอริทึม

$\max_th = 2 * \min_th$

$P\max$ มีค่าประมาณ 0.1

$aveQ = (1 - wq) * aveQ + wq * \text{int}\, anQ$

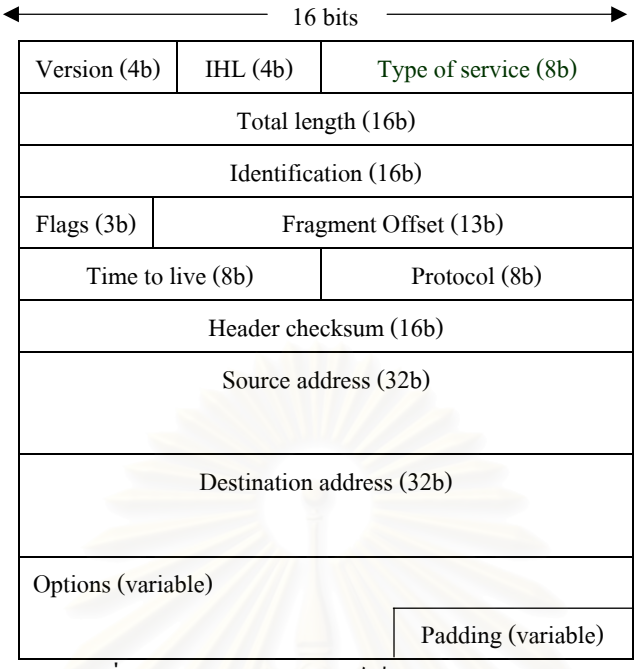
เมื่อ wq คือ weighting factor $0.002 \le wq \le 0.0042$

1.5 Fast Retransmit อัลกอริทึม

การตรวจสอบข้อมูลสูญหายจะสมมติให้ข้อมูลสูญหายเนื่องจากความคับคั่ง และจะตรวจสอบโดยเครื่องส่งแจ้งว่าได้รับ acknowledged 3 ครั้งที่เหมือนกันจะเริ่มต้นของ Fast Retransmit อัลกอริทึม และจะเริ่มให้ $cwnd$ มีค่าเท่ากับ 1

1.6 รูปแบบของอินเทอร์เน็ตโพรโทคอล

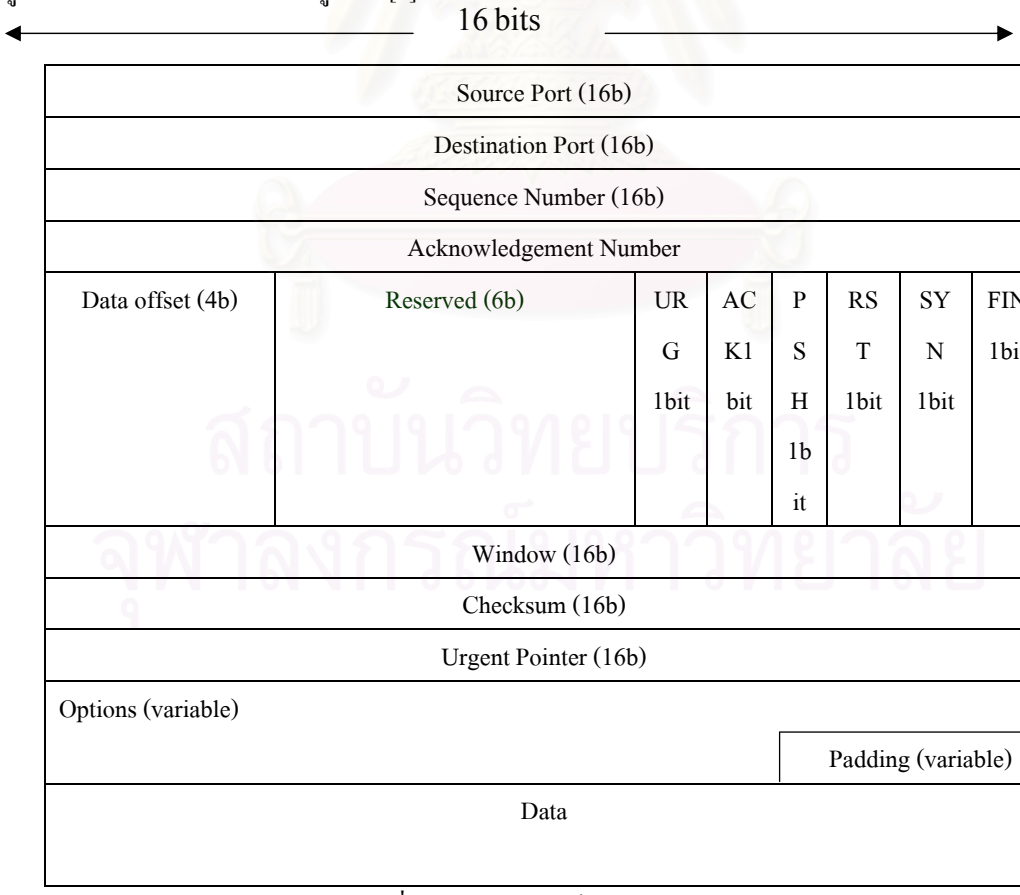
รูปแบบของอินเทอร์เน็ตโพรโทคอลดังแสดงในรูปที่ 2 [5]



รูปที่ 1.3 รูปแบบของอินเทอร์เน็ตโปรโตคอล(Ipv4)

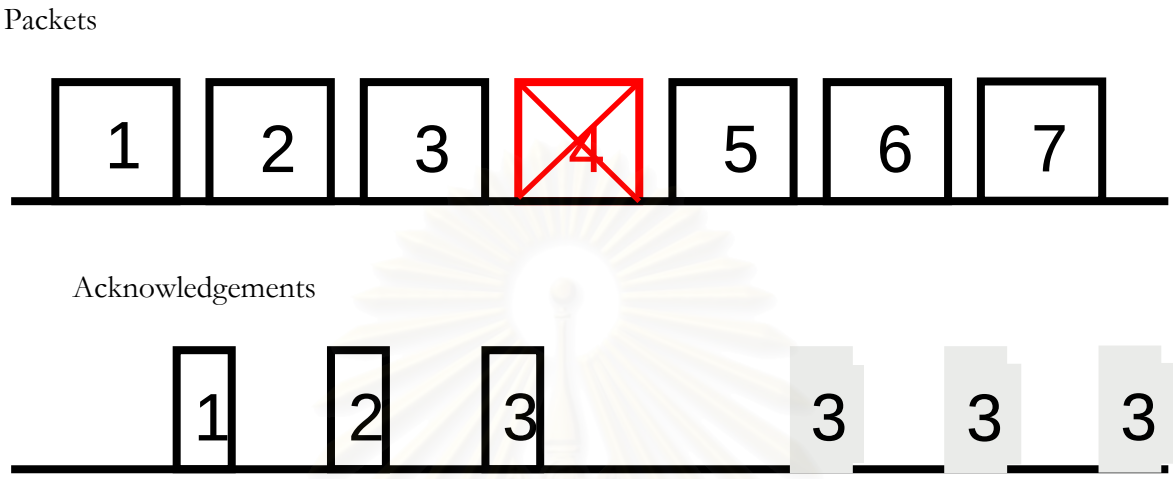
1.7 โครงสร้างแพ็กเกตของ TCP

รูปแบบของแพ็กเกตดังแสดงในรูปที่ 3 [5]



รูปที่ 1.4 โครงสร้างแพ็กเกตของ TCP

สมมติว่าการสูญหายของข้อมูลเป็นตัวบ่งบอกความคับคั่ง การสูญหายของข้อมูลตรวจสอบจากการได้รับ acknowledgement ซ้ำกัน 3 ครั้ง



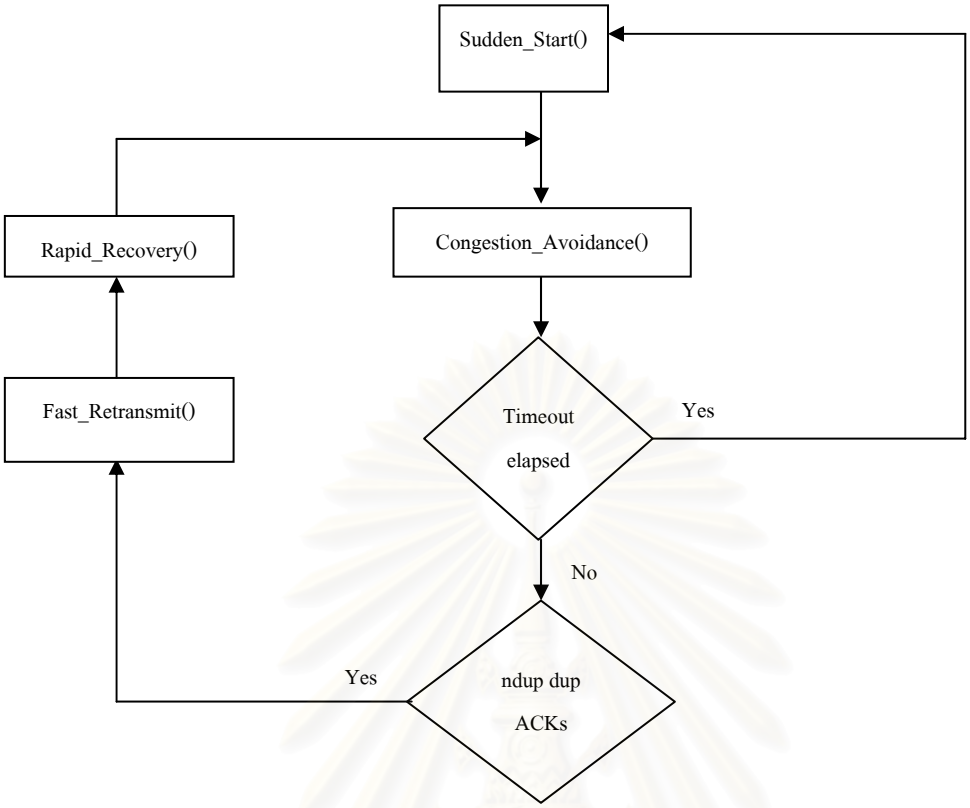
จากรูปจะสมมติว่าแพ็กเกตที่ 4 ข้อมูลสูญหาย จะพบว่าจะได้รับ acknowledgement ของแพ็กเกตที่ 3 ซ้ำกัน 3 ครั้ง

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

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 อัลกอริทึม และ Fast Retransmit & Rapid Recover อัลกอริทึม หลักการทำงานดังรูปที่ 2.1

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.1 ไดอะแกรมของ TCP-Peach# อัลกอริทึม

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

2.1 Sudden Start อัลกอริทึม

Sudden Start อัลกอริทึมใช้ในการเริ่มต้นการเชื่อมโยงระบบโดยการส่งร่วมกันกับ Dummy Segments ซึ่งเป็นส่วนข้อมูลความสำคัญต่ำเพื่อเป็นการหยั่งสภาวะของระบบซึ่งจะมีผลทำให้ Congestion Window เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้สามารถใช้ทรัพยากรของระบบได้อย่างรวดเร็วและเต็มที่

Dummy Segments คือข้อมูลส่วนความสำคัญต่ำสร้างโดยเครื่องส่งโดยการทำสำเนาข้อมูลที่ส่งสุดท้ายด้วยเหตุนี้จึงไม่ได้นำข้อมูลใหม่ไปยังผู้รับ

เครื่องส่งจะใช้ Dummy Segments ในการทดสอบว่าระบบยังมีเส้นทางในการส่งหรือไม่ถ้าเส้นทางนั้นคับคั่ง จะทำการทิ้งส่วนที่เป็น Dummy Segments แต่ถ้าหากเส้นทางไม่คับคั่ง Dummy Segments จะถูกส่งไปถึงยังเครื่องรับ เครื่องส่งจะใช้หนึ่งบิตหรือมากกว่า ในส่วนที่ไม่ใช้จาก 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 ในทุก ๆ

$$\tau = RTT/rwnd \qquad (2\text{-}1)$$

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

รายละเอียดของ Sudden Start อัลกอริทึมมีดังนี้

Sudden_Start()

$cwnd = 1;$

$\tau = RTT/rwnd;$

Send (Data_Segment);

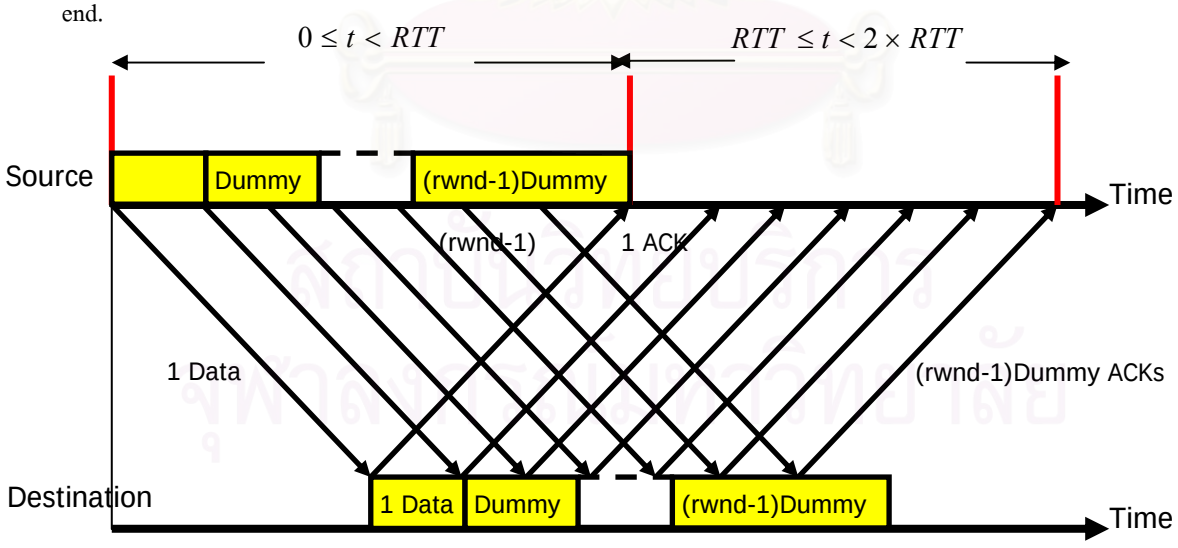
For $(i = 1\ to\ rwnd - 1);$

wait $(\tau);$

send (Dummy_Segment);

end;

end.



รูปที่ 2.2 การส่งแพ็กเกตในช่วงเริ่มต้นของการเชื่อมโยงระบบ

จากรูปสามารถอธิบายในรายละเอียดได้ดังนี้

สมมติการเชื่อมต่อที่เวลา $t = 0$

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

ที่เวลานี้ Acknowledge Segments สุดท้ายซึ่งเกิดจากการส่ง Dummy Segments มาถึงยังเครื่องส่ง และเครื่องส่งจะเข้าสู่ช่วง Congestion Avoidance

จากการจำลองดังกล่าวสามารถหาวิสัยสามารถของระบบได้จาก

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

เมื่อ $Throughput$ คือ วิสัยสามารถของระบบ (packets/sec)

$cwnd$ คือ ขนาด Congestion Window ที่เวลาต่าง ๆ (packets)

RTT คือ เวลาไปกลับมีหน่วยเป็น (sec)

a. **ปัญหาข้อมูลสูญหายเนื่องจากเส้นทางคับคั่ง**

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

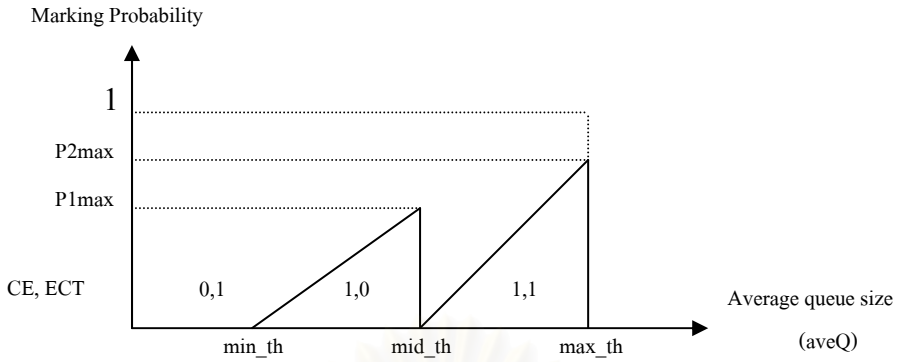
Multi levels Explicit Congestion Notification (MECN)

ใช้การบอกความคับคั่งหลายระดับทำให้สามารถบอกความคับคั่งได้ 4 ระดับ โดยมีรายละเอียดในแต่ละส่วนดังต่อไปนี้

2.2.1 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
แพ็กเกตสูญหาย		ระบบคับคั่ง



รูปที่ 2.3 การทำสัญลักษณ์ที่เราเตอร์

ค่าเริ่มต้นของ RED อัลกอริทึม [9], [11]

$$P1\max, P2\max \approx 0.1 \quad (2\text{-}3) \qquad \min_th \approx 5 \quad (2\text{-}4)$$

$$mid_th = 2 \times \min_th \quad (2\text{-}5)$$

$$\max_th = 2 \times mid_th \quad (2\text{-}6)$$

$$aveQ = (1 - wq) \times aveQ + wq \times \text{int}\, anQ \quad (2\text{-}7)$$

ใน NS Simulator จะกำหนดให้ค่า $wq = 0.002$ เป็นค่าเริ่มต้น

2.2.2 การป้อนกลับจากเครื่องรับไปยังเครื่องส่ง

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

ตารางที่ 2.2 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
แพ็กเกตสูญหาย		ระบบคับคั่ง

2.2.3 การตอบสนองของเครื่องส่ง

เครื่องส่งตอบสนองกับสถานะความคับคั่งของระบบโดยการคูณขนาด Congestion Window ด้วยตัวแปร α โดยจะวิเคราะห์ค่าของตัวแปร α เป็นสองกรณี

ตารางที่ 2.3 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 $\alpha_3 = 50\%$

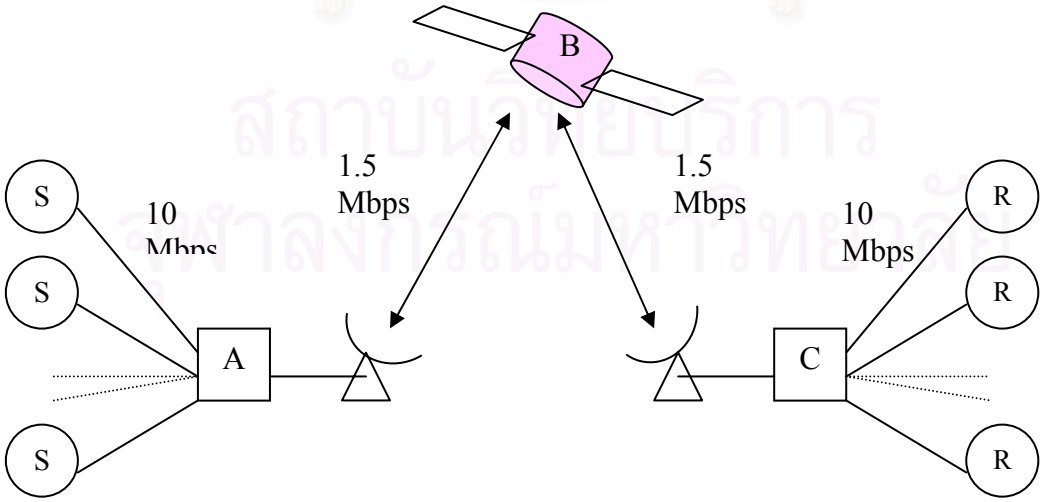
การใช้ Fast Retransmit อัลกอริทึมเมื่อเกิดข้อมูลสูญหาย ในช่วงที่เกิดข้อมูลสูญหายระบบจะทำการลด Congestion Window ลงครึ่งหนึ่ง เมื่อช่วง Fast Retransmit และ Rapid Recovery อัลกอริทึมหลังจากนั้นจะวนกลับเข้าสู่ช่วง Congestion Avoidance อีกครั้งหนึ่ง ดังรูปที่ 3.1

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

ใช้ Rapid Recovery อัลกอริทึมแทน Fast Recovery อัลกอริทึม ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อแก้ปัญหาเนื่องจากการเชื่อมโยงระบบผิดพลาด

2.3 รูปแบบจำลองการทดลอง

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



รูปที่ 2.4 การจำลองการทดลองระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม

กำหนดให้สถานะของระบบโดยมีเครื่องส่ง 10 เครื่อง (S1…S10) 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 (R1…R10) โดยมีอัตราการเชื่อมโยง 10 Mbps

กำหนดให้เครื่องส่งแต่ละเครื่องเป็นอิสระต่อกันในการเพิ่มขนาดหรือลดขนาด Congestion Window

2.3.1 Sudden Start

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

2.3.2 Congestion Avoidance

กำหนดให้สถานะของระบบโดยเครื่องส่ง S1…S10 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 R1…R10 โดยมีอัตราการเชื่อมโยง 10 Mbps และมีเวลาหน่วง 4 ms

กำหนดให้เครื่องส่งมีเวลาไปกลับต่างกัน โดยเริ่มจาก 272 ms และเพิ่ม 10 ms ในทุกๆ เครื่องส่งดังนั้น เวลาไปกลับจะมีค่าดังนี้ 272, 282,…,362 ms

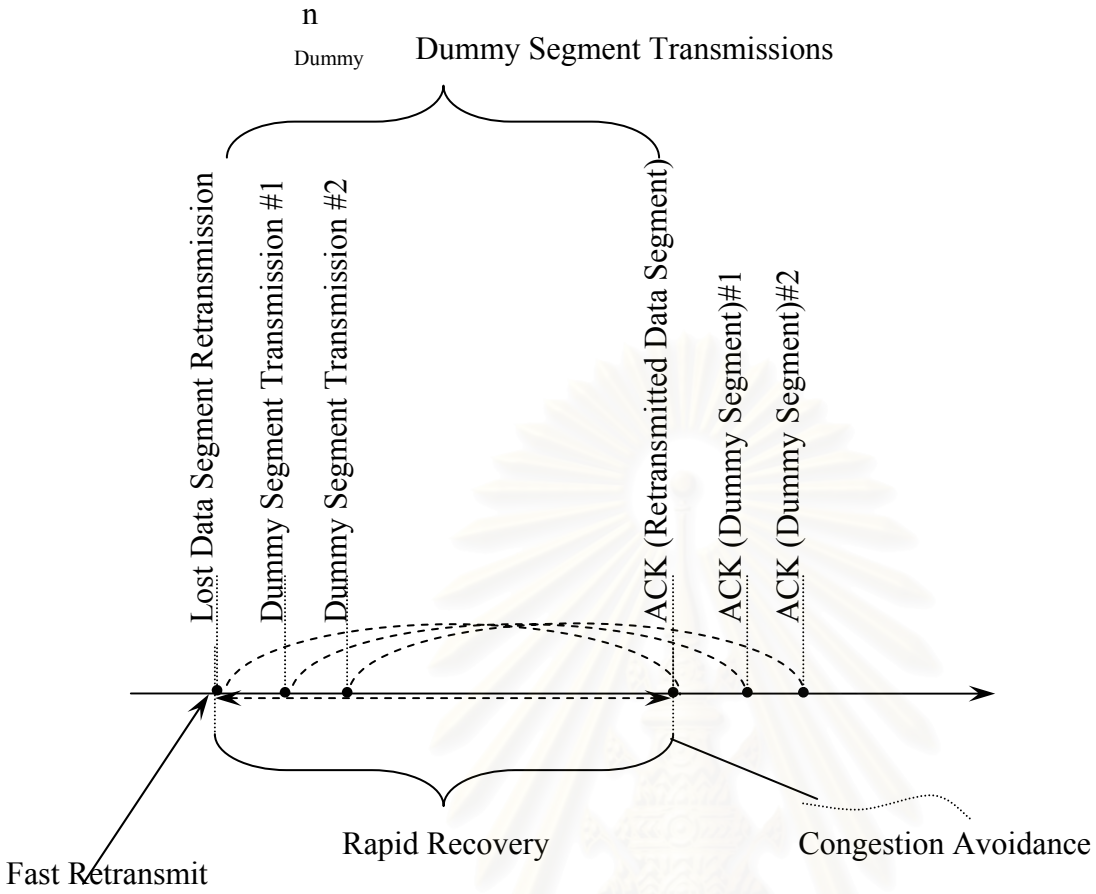
การบอกความคับคั่งหลายระดับ (MECN) เพื่อทำการวิเคราะห์ Instantaneous Queue และ Average Queue เทียบกับ ค่า Threshold ($\min_th$, mid_th และ $\max_th$) และการปรับค่า α_x Congestion Window $(cwnd)$ กับตัวแปรต่างๆ ที่มีผลกระทบและอัตราการส่งข้อมูลเพื่อให้สามารถลดการเกิดความคับคั่งซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการเชื่อมโยงระบบ

2.3.3 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 2.5 การทำงานของ Fast Retransmit & Rapid Recovery อัลกอริทึม

3. 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] ดร. ประสิทธิ์ ทีฆพุฒิ, “การสื่อสารดาวเทียม,” วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย