

อัลกอริทึมการจัดเส้นทางแบบรีเลย์สำหรับดาต้าแกรมทราฟฟิกในโครงข่ายดาวเทียมวงโคจรต่ำ



นางสาวพิมพ์ิกา เจตนะจิตร

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-53-2883-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RELAY-BASED ROUTING ALGORITHM FOR DATAGRAM TRAFFIC IN LEO
SATELLITE NETWORKS



Ms. Pimpika Chettanachit

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-53-2883-9

4570731121 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORDS: ROUTING ALGORITHM / THROUGHPUT / END-TO-END DELAY

PIMPIKA CHETTANACHIT : RELAY-BASED ROUTING ALGORITHM FOR
DATAGRAM TRAFFIC IN LEO SATELLITE NETWORKS. THESIS ADVISOR : ASSOC.
PROF. DR.PRASIT TEEKAPUT, Ph.D. 71 pp. ISBN 974-53-2883-9.

This thesis proposes the method of routing algorithm via satellite networks to improve routing algorithm in LEO satellite networks. LEO satellite has a high mobility, frequently changing topology and potentially sparse and intermittent connectivity. Therefore, we have to carefully select the next hop to prevent efficiency decreasing in the system. The main issue in routing is the next hop selection process, hoping that the physical movement of nodes in the network will eventually create an opportunity to forward messages to some other node and having less delay. In routing decision, we take into consideration of congestion level in link to avoid end-to-end delay increasing from source to destination. Moreover, we apply multipath routing in this thesis to take an alternate route to the destination. However, the number of next hop candidate nodes must be carefully chosen to prevent flooding within the network.

Simulation results by using NS-2 Simulator in the system using proposed routing method with LEO and GEO satellite networks, and varying number of transmitting node and processing delay, show that it has a better end-to-end delay and throughput than the system using centralized routing method.

Department..... Electrical Engineering.....

Field of study..... Electrical Engineering.....

Academic year..... 2005.....

Student's signature..... *Pimpika Chettanachit*.....

Advisor's signature..... *P. Teekaput*.....

Co-advisor's signature.....

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ประสิทธิ์ ที่มพวุฒิจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาข้อแนะนำ วิธีการแก้ปัญหาตลอดจนแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยโทรคมนาคม ซึ่งเป็นสถานที่ทำวิจัย รวมถึงเพื่อน รุ่นพี่และรุ่นน้องทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือในการให้ข้อคิดเห็น และคำแนะนำต่างๆ ในการเรียนรวมถึงการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณ โครงการวิจัยร่วมภาครัฐและเอกชนที่ได้ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เช่น อุปกรณ์เพื่อทำการวิจัยตลอดจนทุนอุดหนุนการวิจัย ทำให้การดำเนินการวิจัยมีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ได้มอบความรัก ความอบอุ่น และกำลังใจ ตลอดมา ตลอดจนพี่ๆ ของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนเสมอ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 ภาพรวมของวิทยานิพนธ์.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ประเภทของดาวเทียม.....	5
2.2 การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียม.....	10
2.3 โพรโตคอลการจัดเส้นทาง (Routing Protocol).....	16
2.4 การจัดเส้นทางแบบรีเลย์โดยใช้การสอบถาม (Interrogation-Based Relay Routing).....	17
2.5 การใช้งาน โปรแกรม Network Simulator (NS) บนระบบปฏิบัติการ Windows.....	23
2.6 โพรโตคอลแอคซอกใน NS.....	31
2.7 การจำลองผลและเปรียบเทียบผลการจำลองที่ใช้ โพรโตคอลแอคซอกแบบต่างๆ กัน.....	33
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	38
3.1 อัลกอริทึมการจัดเส้นทางของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	38
3.2 แบบจำลองโพรโตคอลของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	42
3.3 การนำ NS-2 มาใช้ในการจำลองผล.....	44
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	46
4.1 การส่งโดยให้จุกรับส่งอยู่ภายในทวีปเดียวกัน.....	48

บทที่

4.2 การส่งโดยให้มีจุดรับส่งอยู่ต่างทวีปกันแต่อยู่ในซีกโลกเหนือเหมือนกัน.....51

4.3 การส่งโดยให้มีจุดรับส่งอยู่ต่างทวีปกันและอยู่คนละซีกโลกกัน.....56

4.4 การส่งโดยให้มีจุดรับส่งอยู่ตามที่ต่างๆ ทั่วโลก.....59

4.5 การวิเคราะห์ค่าวิสัยสามารถจากการส่งโดยให้โน้ตรับส่งอยู่ตามที่ต่างๆ ทั่วโลก.... 62

5 สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ..... 66

รายการอ้างอิง..... 68

ภาคผนวก..... 69

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 71



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างพารามิเตอร์ของดาวเทียมวงโคจรต่ำในการจำลองผล.....	25
4.1 พารามิเตอร์ขององค์ประกอบของระบบดาวเทียม LEO.....	47
4.2 ความแตกต่างของเวลาและเปอร์เซ็นต์การลดลงของเวลาระหว่าง การจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลางและการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก ในการส่งข้อมูลจากนิวยอร์กไปยังปารีส.....	55
4.3 ความแตกต่างของเวลาและเปอร์เซ็นต์การลดลงของเวลาระหว่าง การจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลางและการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก ในการส่งข้อมูลจากนิวยอร์กไปยังซิดนีย์.....	59
4.4 ความแตกต่างของเวลาและเปอร์เซ็นต์การลดลงของเวลาระหว่าง การจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลางและการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก ในการส่งข้อมูล โดยให้โนดอยู่ตามเมืองต่างๆ ทั่วโลก.....	62

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
1.1	โครงข่าย Ad hoc Space Network (ASN).....1
2.1	การจัดเรียงตัวแบบ π และการจัดเรียงตัวแบบ 2π ตามลำดับ.....7
2.2	ตัวอย่างของการมองเห็นกันของดาวเทียม.....9
2.3	การใช้การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียม.....11
2.4	การขยายความครอบคลุมของระบบ.....12
2.5	การเพิ่มมุมเงยที่น้อยที่สุด (minimum elevation angle) ของสถานีภาคพื้นดิน.....13
2.6	ตัวอย่างการใช้การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียมครอบคลุมสหรัฐอเมริกา.....14
2.7	เครือข่ายครอบคลุมทั่วโลก.....15
2.8	ตัวอย่างการส่งต่อข้อมูลแบบรีเลย์.....18
2.9	ช่วงเวลาของการเชื่อมโยง.....20
2.10	ตัวอย่างการจัดเรียงตัวของดาวเทียม LEO.....26
2.11	ระบบพิกัดทรงกลมที่ใช้ใน โหนดดาวเทียม.....27
2.12	ส่วนประกอบสำคัญของอินเตอร์เฟสโครงข่ายดาวเทียม.....28
2.13	การคำนวณรูปแบบโครงสร้างของโครงข่ายของการจัดเส้นทางแบบศูนย์กลาง.....29
2.14	การกระจายตารางการจัดเส้นทาง.....30
2.15	การคำนวณเส้นทางของโหนด.....31
2.16	ขนาดวินโดว์ของ TCP โดยใช้โปรโตคอล DSDV และ เริ่มส่งแพ็คเกจสัญญาณ TCP ที่เวลา 10 วินาที.....33
2.17	ขนาดวินโดว์ของ TCP โดยใช้โปรโตคอล DSDV และ เริ่มส่งแพ็คเกจสัญญาณ TCP ที่เวลา 12 วินาที.....34
2.18	ขนาดวินโดว์ของ TCP โดยใช้โปรโตคอล AODV.....34
2.19	ขนาดวินโดว์ของ TCP โดยใช้โปรโตคอล AODV และให้มีค่าวินโดว์มากที่สุด จำนวนมากๆ.....35
2.20	ขนาดวินโดว์ของ TCP โดยใช้โปรโตคอล DSR.....36
2.21	ขนาดวินโดว์ของ TCP โดยใช้โปรโตคอล TORA.....36
3.1	การทำงานของ การเลียงเส้นทางที่คับคั่ง.....40
3.2	การทำงานของ การจัดหาเส้นทางอีกครั้ง.....41
3.3	การทำงานของ ตัวกระทำการจัดเส้นทาง.....42

รูปที่

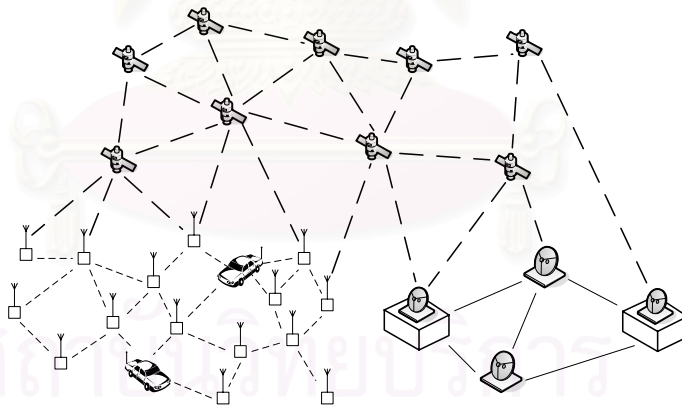
3.4	อัลกอริทึมของเร้าเตอร์.....	43
3.5	การนำ linked list มาใช้ใน NS-2.....	44
3.6	โครงสร้างของโนดดาวเทียม.....	45
3.7	รายละเอียดของโครงสร้างการเก็บข้อมูลอินเทอร์เน็ตเฟสของโครงข่าย.....	46
4.1	ผลการจำลองกรณีที่ 1 จากนิวยอร์กไปยังลอสแอนเจลิส.....	49
4.2	ผลการจำลองกรณีที่ 2 จากนิวยอร์กไปยังลอสแอนเจลิส.....	50
4.3	ผลการจำลองกรณีที่ 3 จากนิวยอร์กไปยังลอสแอนเจลิส.....	51
4.4	ผลการจำลองกรณีที่ 1 จากนิวยอร์กไปยังปารีส.....	52
4.5	ผลการจำลองกรณีที่ 2 จากนิวยอร์กไปยังปารีส.....	53
4.6	ผลการจำลองกรณีที่ 3 จากนิวยอร์กไปยังปารีส.....	54
4.7	ผลการจำลองกรณีที่ 1 จากนิวยอร์กไปยังซิดนีย์.....	56
4.8	ผลการจำลองกรณีที่ 2 จากนิวยอร์กไปยังซิดนีย์.....	57
4.9	ผลการจำลองกรณีที่ 3 จากนิวยอร์กไปยังซิดนีย์.....	58
4.10	ผลการจำลองเมื่อมีคู่โนดเป็น 10 คู่.....	59
4.11	ผลการจำลองเมื่อมีคู่โนดเป็น 25 คู่.....	60
4.12	ผลการจำลองเมื่อมีคู่โนดเป็น 50 คู่.....	61
4.13	ค่าวิสัยสามารถเทียบกับการประวิงเวลาแบบประมวลผล เมื่อมีโนดรับส่งอยู่ที่ต่างๆ ทั่วโลก และมีคู่โนดเป็น 10 คู่.....	63
4.14	ค่าวิสัยสามารถเทียบกับการประวิงเวลาแบบประมวลผล เมื่อมีโนดรับส่งอยู่ที่ต่างๆ ทั่วโลก และมีคู่โนดเป็น 25 คู่.....	63
4.15	ค่าวิสัยสามารถเทียบกับการประวิงเวลาแบบประมวลผล เมื่อมีโนดรับส่งอยู่ที่ต่างๆ ทั่วโลก และมีคู่โนดเป็น 50 คู่.....	64
4.16	ค่าวิสัยสามารถเทียบกับการจำนวนคู่โนด ที่การประวิงเวลาแบบประมวลผลเป็น 26 มิลลิวินาที.....	65
4.17	ค่าวิสัยสามารถเทียบกับการจำนวนคู่โนด ที่การประวิงเวลาแบบประมวลผลเป็น 40 มิลลิวินาที.....	65

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในอนาคตมีแนวโน้มการใช้เทคโนโลยีทางด้านดาวเทียมมากขึ้น ซึ่งเทคโนโลยีทางดาวเทียมนี้มีรูปแบบการเคลื่อนที่ของดาวเทียมที่ไม่สามารถคาดเดาได้ ในระบบการสื่อสารทางดาวเทียมจะมีการจัดเรียงตัวของดาวเทียมต่างๆ ทำให้มีลักษณะโครงข่ายที่มีรูปแบบต่างๆ กันมารวมกันเป็นระบบข้อมูลแบบรวม (integrated organic information system) [1] ซึ่งสามารถเรียกระบบนี้ได้ว่า Ad hoc Space Network (ASN) ดังแสดงในรูปที่ 1.1 โดยโหนดของ ASN นี้จะทำงานโดยอัตโนมัติด้วยความสามารถในการประมวลผลของข้อมูล โหนดมีความสามารถติดต่อสื่อสารกันเองได้ โดยใช้การเชื่อมโยงแสงความเร็วสูง (high speed optical links) หรือ การเชื่อมโยงทางความถี่วิทยุ (radio frequency links) เพื่อให้ได้เส้นทางไปยังจุดหมายปลายทางที่ต้องการ



รูปที่ 1.1 โครงข่าย Ad hoc Space Network (ASN)

คุณสมบัติของดาวเทียม ASN และโครงข่าย ASN ที่มีส่วนสำคัญในการออกแบบโปรโตคอลการจัดการเส้นทาง (routing protocol) ในระบบที่ใช้ดาวเทียม ASN คือ โหนด ASN มีความจุการส่งข้อมูลสูงมาก และข้อมูลมักจะมีรูปแบบที่ไม่ได้มีการบีบอัดเพื่อหลีกเลี่ยงการสูญหาย จะเห็นได้ว่าขนาด

ข้อมูลที่ส่งจะมีขนาดใหญ่มาก ซึ่งสิ้นเปลืองเวลาในการส่งข้อมูลมาก นอกจากนี้โครงข่ายดาวเทียม ASN ยังมีรูปแบบของโครงสร้างดาวเทียมที่มีความหลากหลาย ทนทาน และสามารถปรับเปลี่ยนได้มาก [2] และเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงแบบโครงสร้างบ่อย ระยะทางระหว่างโหนดห่างกันมาก และมีการเชื่อมต่อเป็นพักๆ โหนดใน ASN จึงไม่สามารถใช้ข้อมูลการจัดเส้นทางแบบคงตัวหรือแบบคำนวณไว้ล่วงหน้าแล้วได้ จากที่กล่าวมานี้ จะเป็นสิ่งที่จำเป็นสำหรับการหาเส้นทางที่มีประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล

โดยใน [5] ได้มีการใช้แบบแผนการจัดเส้นทางแบบรีเลย์ (relay-based routing scheme) สำหรับโครงข่ายดาวเทียม โดยโหนดจะเก็บข้อมูลเอาไว้ช่วงหนึ่งจนกว่าโหนดจะสามารถส่งข้อมูลต่อไปได้ ในการใช้การจัดเส้นทางแบบรีเลย์โดยการสอบถาม (interrogation-based relay routing) นั้น โหนดจะสอบถามข้อมูลโครงสร้างของโครงข่ายและความจุของโหนดรอบๆ ซึ่งจะช่วยให้ได้การเลือกเส้นทางที่เหมาะสม เรื่องสำคัญที่ต้องพิจารณาในทางทำการจัดเส้นทางแบบรีเลย์โดยการสอบถาม คือ กระบวนการเลือกโหนดถัดไป ซึ่งยากที่จะตัดสินใจว่าจะเลือกส่งต่อข้อมูลให้โหนดใด ถ้ามีรูปแบบโครงสร้างของโครงข่ายแบบมีการเปลี่ยนแปลง (dynamic topology) และมีความแตกต่างกันในการเรียงตัวของดาวเทียม ในการที่จะทำให้การเลือกเส้นทางมีประสิทธิภาพดี ดาวเทียมจะต้องติดตามตำแหน่งของโหนดข้างเคียงและโหนดอื่นๆ ด้วย และเมื่อโหนดเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กัน ไม่จำเป็นว่าจะต้องส่งต่อข้อมูลไปให้ยังอีกโหนด มันอาจจะไม่ส่งต่อข้อมูลไปให้และรอโอกาสต่อไปที่จะส่งต่อ แต่ในงานวิจัยที่ผ่านมาไม่ได้มีการพิจารณาระดับความคับคั่งของการเชื่อมโยง ซึ่งอาจส่งผลให้มีการประวิงเวลาจากต้นทางไปปลายทางที่สูงขึ้นได้

โครงข่ายวิทยานិพนธ์นี้จึงมีจุดประสงค์ที่จะปรับปรุงวิธีการจัดหาเส้นทางในการส่งข้อมูลของการสื่อสารดาวเทียมในระบบวงโคจรต่ำ โดยมีการพิจารณาระดับความคับคั่งของการเชื่อมโยง และหลีกเลี่ยงการใช้การเชื่อมโยงที่มีระดับความคับคั่งมากๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่าย นอกจากนี้ยังมีการเลือกใช้เส้นทางหลายเส้นทาง ซึ่งจะช่วยให้มีความแน่นอนที่จะให้ข้อมูลไปถึงปลายทางได้มากขึ้น แต่ก็ยังต้องมีความระมัดระวังในการเลือกจำนวนเส้นทางที่จะใช้ด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์การจัดการจัดหาเส้นทางในการส่งข้อมูลของการสื่อสารดาวเทียม
2. เพื่อพัฒนาและปรับปรุงวิธีการจัดหาเส้นทางในการส่งข้อมูลของการสื่อสารดาวเทียมในระบบวงโคจรต่ำ ซึ่งจะช่วยให้ได้เส้นทางในการส่งข้อมูลที่มีการประวิงเวลาที่ต่ำ

และหลีกเลี่ยงการใช้การเชื่อมโยงที่เกิดความคับคั่งบนโครงข่าย ส่งผลให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพที่ดี

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. นำเสนอการค้นหาเส้นทางแบบรีเลย์และแบบต่างๆ บนการสื่อสารดาวเทียม โดยมี การนำวิธีการหลีกเลี่ยงการใช้เส้นทางที่คับคั่งมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้ระบบมี ประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น
2. ปรับปรุงวิธีการจัดหาเส้นทางในการส่งข้อมูลของการสื่อสารดาวเทียมในระบบวง โจรต่ำ ให้ได้เส้นทางในการส่งข้อมูลที่มีการประวิงเวลาที่ต่ำ
3. เขียนโปรแกรมเพื่อจำลองการทำงานของระบบ
4. วิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้จากการจำลองผลที่ได้จากโปรแกรม

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาระบบสื่อสารดาวเทียม และปัญหาที่พบในปัจจุบัน
 - 1.1 ศึกษาวิธีการในการค้นหาเส้นทางแบบต่างๆ ของระบบ
 - 1.2 ศึกษาอัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางของระบบดาวเทียม
 - 1.3 ศึกษาวิธีการบอกความระดับความคับคั่งในการเชื่อมโยง
2. นำอัลกอริทึมต่าง ๆ มาใช้ ปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรเพื่อทดลองให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และปรับปรุงพัฒนาอัลกอริทึมในการค้นหาเส้นทางจากงานวิจัยที่มีอยู่เดิม
3. เขียนโปรแกรมจำลองการทำงานของระบบ
4. วิเคราะห์ผลที่ได้
5. เปรียบเทียบและสรุปผล
6. สรุปรวบรวมและจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ทราบปัญหาและการวิเคราะห์การหาเส้นทางในการส่งต่อข้อมูลในระบบสื่อสารดาวเทียม
2. ได้อัลกอริทึมในการหาเส้นทางในการส่งต่อข้อมูลในระบบการสื่อสารดาวเทียม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้ดียิ่งขึ้น
3. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวิธีการค้นหาเส้นทางในการส่งต่อข้อมูลในงานวิจัยต่อไป

1.6 ภาพรวมของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งออกเป็น 5 บท บทที่ 1 จะเป็นบทนำ บทที่ 2 จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม ดาวเทียม การเชื่อมโยงระบบ โปรโตคอล การจัดสรรเส้นทาง บทที่ 3 จะกล่าวถึงแนวคิดในการดำเนินการวิจัย เสนอวิธีแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น การสร้างแบบจำลองเพื่อทดลองระบบสื่อสารผ่านดาวเทียมและแนวความคิดที่จะใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ส่วนในบทที่ 4 จะเป็นส่วนของผลการทดลองที่ได้จากการปรับค่าตัวพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการประวิงเวลาของระบบ โดยทำการทดลองจากแนวความคิดในการจำลองระบบจากบทที่ 3 และในบทที่ 5 จะเป็นส่วนสรุปและอภิปรายข้อเสนอแนะข้อคิดเห็นตลอดจนแนวทางในการพัฒนาวิธีการและอัลกอริทึมต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดและทฤษฎี

2.1 ประเภทของดาวเทียม

ดาวเทียมที่ใช้สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ ดาวเทียมค้างฟ้า (GEO) และ ดาวเทียมวงโคจรต่ำ (LEO) ดาวเทียมทั้งสองนี้มีความสูง ความเร็วในการโคจร และการประวิงเวลาการแพร่ (propagation delay) ต่างกัน

2.1.1 ดาวเทียมค้างฟ้า (Geostationary Earth Orbit - GEO)

ดาวเทียม GEO เป็นดาวเทียมที่มีตำแหน่งคงที่เมื่อเทียบกับโลก มีความสูง 35,000 กิโลเมตร และอยู่ที่แนวเส้นศูนย์สูตร ดาวเทียมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับโลกหมุนรอบตัวเอง ข้อดี-ข้อเสียของดาวเทียม GEO มีดังนี้

ดาวเทียมประเภทนี้มีข้อดี 3 ข้อหลักคือ มีตำแหน่งของดาวเทียมคงที่ ทำให้การสื่อสารกับดาวเทียมสามารถทำได้ง่าย นอกจากนี้เนื่องจากดาวเทียมใช้แสงอาทิตย์เป็นพลังงาน จึงควรให้ได้รับแสงอาทิตย์เป็นเวลานาน การใช้ดาวเทียมประเภทนี้จะทำให้โลกจะบังแสงอาทิตย์เพียงเล็กน้อยเท่านั้น และสุดท้ายคือ ดาวเทียมครอบคลุมพื้นที่โลกได้มาก ทำให้ส่งข้อมูลได้โดยใช้เพียงเสาเดียว

แต่ดาวเทียมประเภทนี้มีข้อเสียคือ มีการประวิงเวลาการแพร่ (propagation delay) มาก และมีพื้นที่เหลือน้อย ปัจจุบันดาวเทียม GEO แต่ละดวงต้องอยู่ห่างจากกัน 3 องศา และสุดท้ายคือ จากการที่เทคโนโลยีดาวเทียมนี้มีมานานแล้ว จึงมีการใช้งานมากทำให้มีแบนด์วิดธ์น้อยลงสำหรับสถานีภาคพื้นดิน

การประวิงเวลาของดาวเทียม GEO

$$\begin{aligned}
 D_{End-to-End} = & \left(A_1 + \frac{L}{B_1} + P \right) \\
 & + 2 * (N - 1) * \left(\frac{A_1}{2} + D + \frac{L}{B_2} + I \right) \\
 & + \left(A_3 + D + \frac{L}{B_1} + P \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

โดยที่ $D_{End-to-End}$ คือการประวิงเวลารวม (end-to-end delay) N คือจำนวนฮอป A_1 คือการประวิงเวลาจากสถานีพื้นฐานไปยังการเข้าถึงดาวเทียม ($A_1 = 50$ มิลลิวินาที) A_2 คือการประวิงเวลาจากดาวเทียมไปยังการเข้าถึงดาวเทียม A_3 คือการประวิงเวลาจากดาวเทียมไปยังการเข้าถึงสถานีพื้นฐาน ($A_3 = 1$ มิลลิวินาที) B_1 คืออัตราบิตสำหรับพื้นดินไปยังการเชื่อมโยงดาวเทียม ($B_1 = 1.5$ Mbps) B_2 คืออัตราบิตสำหรับ ISL H คือความสูง ($H = 35,000$ กิโลเมตร) P คือการประวิงเวลาการแพร่ของ GSL ($I = 128.6$ มิลลิวินาที) I คือการประวิงเวลาการแพร่ของการเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียมและพื้นดิน D คือการประวิงเวลาแบบประมวลผล (processing delay) ของโนคหรือดาวเทียม และ L คือความยาวของข้อมูล ($L = 512$ ไบต์)

จากสมการสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ส่วนแรก แสดงเวลาที่ใช้ในการเข้าถึงดาวเทียม การส่งข้อมูลและการแพร่ไปยังดาวเทียม ส่วนที่สอง แสดงเวลาของฮอปจากดาวเทียมดวงหนึ่งไปยังอีกดวงหนึ่ง ซึ่งประกอบด้วย การประวิงเวลาแบบประมวลผล, การประวิงเวลาในการเข้าถึงฮอปถัดไป (next hop access delay), การประวิงเวลาในการส่งข้อมูล (transmission delay) และการประวิงเวลาการแพร่ ส่วนสุดท้าย แสดงการประวิงเวลาแบบประมวลผล, การประวิงเวลาการเข้าถึงสถานีภาคพื้นดิน (ground station access delay), การประวิงเวลาในการส่งข้อมูลและการประวิงเวลาการแพร่

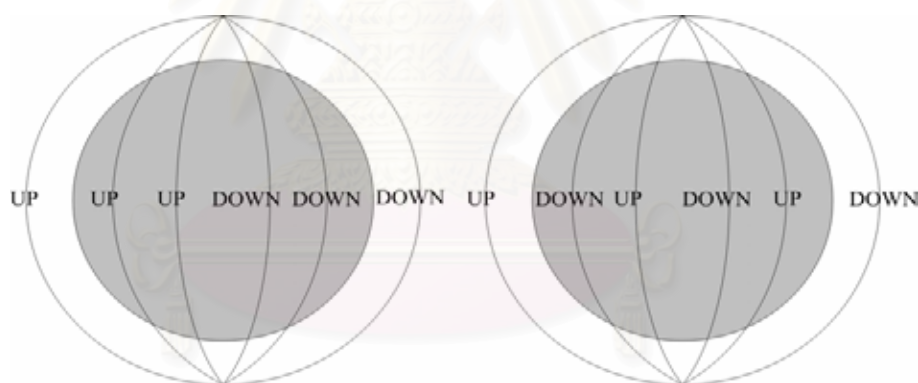
2.1.2 ดาวเทียมวงโคจรต่ำ (Low Earth Orbit - LEO)

ขณะที่ดาวเทียม LEO จะมีความเร็วมากกว่า ความสูงและการประวิงเวลาการแพร่ต่ำกว่าดาวเทียม GEO มาก ดาวเทียม LEO มีระยะทางจากโลกน้อยกว่าดาวเทียม GEO มีความสูง 1,500 กิโลเมตร โดยจากการสังเกตจากสถานีพื้นโลกแล้วจะเห็นดาวเทียม LEO เพียง 10 นาที

ถึงแม้ว่าดาวเทียม LEO จะมีการประวิงเวลาการแพร่ที่น้อยมาก แต่มีข้อเสียคือจะต้องใช้ดาวเทียมจำนวนมากเพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมทั่วโลก เช่น Iridium ต้องใช้ดาวเทียม 66 ดวง และ Teledesic [2] ใช้ดาวเทียม 288 ดวง ส่วนคุณสมบัติข้ออื่นๆ มีดังต่อไปนี้

ดาวเทียม LEO วงโคจรของดาวเทียมนี้อยู่ในแนวเหนือ-ใต้ คุณสมบัติอีกอย่างหนึ่งคือความเอียงของระนาบโคจร [4] ระนาบวงโคจรที่เอียง 90 องศาเป็นวงโคจรแบบขั้วโลก [5] ดาวเทียม LEO มีพื้นที่ครอบคลุมน้อยกว่าดาวเทียม GEO จึงต้องใช้ดาวเทียมจำนวนมากเพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมทั่วโลก [6]

การจัดเรียงตัวของดาวเทียม LEO สามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบคือ การจัดเรียงตัวแบบ π ครึ่งหนึ่งของโลกดาวเทียมจะเคลื่อนที่ไปทางทิศใต้ และอีกครึ่งหนึ่งดาวเทียมจะเคลื่อนที่ไปทางทิศเหนือ อีกแบบหนึ่งคือ การจัดเรียงตัวแบบ 2π ดาวเทียมที่อยู่ระนาบติดกันจะเคลื่อนที่ไปในทิศตรงข้ามกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 cross-seam [7] เป็นจุดที่ดาวเทียมที่ระนาบติดกันเคลื่อนที่ไปทิศทางตรงข้ามกัน ซึ่งการจัดเรียงแบบแรกจะมี cross-seam อยู่ 2 ที่



รูปที่ 2.1 การจัดเรียงตัวแบบ π และการจัดเรียงตัวแบบ 2π ตามลำดับ

ข้อเสียของดาวเทียม LEO คือ มีความเร็วในการเคลื่อนที่สูงและมีรูปแบบโครงข่ายแบบไดนามิก ทำให้มีการจัดเส้นทางได้ลำบากเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงข่ายบ่อย นอกจากนี้การสื่อสารข้าม cross-seam ทำได้ยาก [7] เนื่องจากมีการเคลื่อนที่ผ่านกันเร็วมาก

การประวิงเวลาของดาวเทียม LEO

$$\begin{aligned}
 D_{End-to-End} = & \left(A_1 + \frac{L}{B_1} + P \right) \\
 & + (N - 1) * \left(A_2 + D + \frac{L}{B_2} + I \right) \\
 & + \left(A_3 + D + \frac{L}{B_1} + P \right)
 \end{aligned} \tag{2}$$

โดยที่ $A_1 = 50$ มิลลิวินาที, $A_2 = 5$ มิลลิวินาที, $A_3 = 1$ มิลลิวินาที, $B_1 = 1.5$ Mbps, $B_2 = 155$ Mbps, $H = 1,350$ กิโลเมตร, $I = 7.5$ มิลลิวินาที, $P = 4.5$ มิลลิวินาที และ $L = 512$ ไบต์

สมการที่สองนี้มีส่วนแตกต่างจากสมการแรกคือ เทอมที่สอง นั่นคือ ดาวเทียมแบบ LEO มีการเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียม โดยไม่จำเป็นต้องใช้สถานีภาคพื้นดิน และมีการเข้าถึงระหว่างดาวเทียม แทนการเชื่อมโยงระหว่างภาคพื้นดินกับดาวเทียม

แต่ถ้าจะแบ่งตามลักษณะการโคจรจากพื้นโลก จะสามารถแบ่งได้ดังนี้

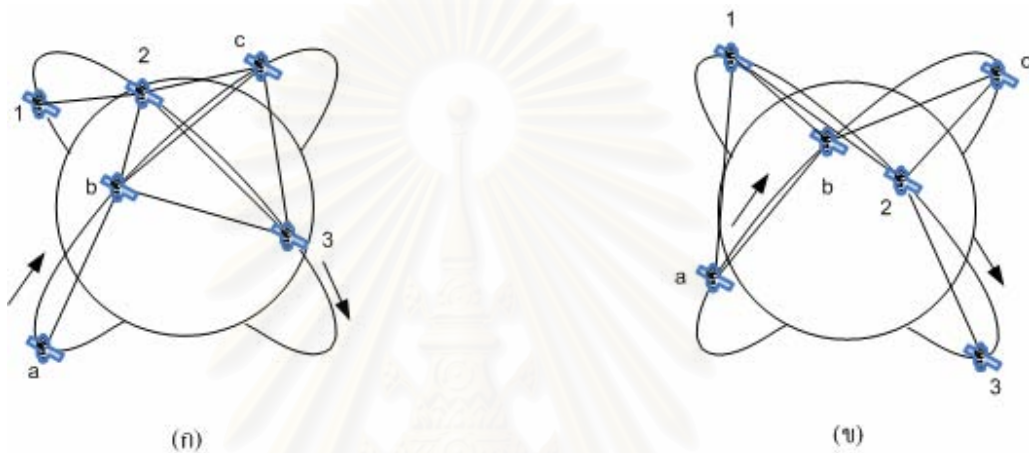
- 2.1.1 ดาวเทียมวงโคจรต่ำ (Low-Earth Orbit, LEO) โคจรห่างจากโลกประมาณ 2,000 - 700 กิโลเมตรและมีเวลาไปกลับ (RTT) ประมาณ 0.05 วินาที คาบการโคจรรอบโลกประมาณ 100 - 127 นาที
- 2.1.2 วงโคจรกลาง (Medium-Earth Orbit, MEO) โคจรห่างจากโลกประมาณ 10,000 กิโลเมตรและมีเวลาไปกลับ (RTT) ประมาณ 0.25 วินาที
- 2.1.3 ดาวเทียมค้างฟ้า (Geostationary-Earth Orbit, GEO) โคจรห่างจากโลกประมาณ 36,000 กิโลเมตรและมีเวลาไปกลับ (RTT) ประมาณ 0.55 วินาที คาบการโคจรรอบโลกประมาณ 24 ชั่วโมง ซึ่งจะมีความเร็วสัมพัทธ์เทียบกับโลกเป็นศูนย์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สนใจการส่งผ่านข้อมูลในการสื่อสารผ่านดาวเทียมวงโคจรต่ำเนื่องจาก

1. ดาวเทียมวงโคจรต่ำจะมีขนาดเล็กกว่าดาวเทียมค้างฟ้า จึงมีน้ำหนักน้อยกว่า ทำให้กำลังส่งและกำลังที่ใช้ในการโคจรน้อยกว่าดาวเทียมค้างฟ้า
2. ระดับความสูงที่ต่ำกว่า จะทำให้มีเวลาประวิงการแพร่กระจาย (propagation delay) น้อยกว่าดาวเทียมค้างฟ้า

แต่เนื่องจากดาวเทียมในวงโคจรต่ำจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง จึงทำให้มีการเชื่อมโยงมีการขาดหายไปบ้างเป็นพักๆ และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโครงข่ายบ่อย ดังนั้น ในการส่งผ่านข้อมูลจึงจำเป็นที่จะต้องเลือกโหนดหรือดาวเทียมที่จะส่งต่อข้อมูลไปให้อย่างระมัดระวัง

การจัดการความเป็นไปได้ทางภูมิศาสตร์ของดาวเทียมทั้งหมดจะคำนวณได้จากข้อมูลกลุ่มดาวเทียม [4] ดังเช่นตัวอย่างในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของการมองเห็นกันของดาวเทียม

รูปที่ 2.2 (ก) จะเห็นได้ว่าดาวเทียม 'b' และ 'c' จะเห็นดาวเทียม '3' แต่หลังจากนั้นมันจะไม่เห็นกัน เช่นเดียวกับกับรูปที่ 2.2 (ข) ดาวเทียม 'a' และ 'b' จะเห็นดาวเทียม '1' ซึ่งในรูปที่ 2.2 (ก) มันจะไม่เห็นกัน

ในการหาเมตริกซ์ในการมองเห็น (visibility matrix) โดยใช้ความสามารถในการเห็นกันระหว่างดาวเทียม ซึ่งจะใช้ข้อมูลเกี่ยวกับตำแหน่งและความสูงของดาวเทียม ในเมตริกซ์นี้มีส่วนประกอบ (i,j) ซึ่งเป็นดาวเทียม i และ j ที่เห็นกันในช่วงขณะนั้นและจะทำให้สามารถกำหนดการเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียม i และ j ได้ และการเคลื่อนที่ของดาวเทียมวงโคจรต่ำภายในวงโคจรเป็นแบบรายคาบ ตารางการกำหนดการเชื่อมโยงจะเก็บอยู่ในดาวเทียมแต่ละดวง เมื่อมีการเปลี่ยนสถานะการเชื่อมโยงของดาวเทียมก็จะมี การปรับเปลี่ยน ซึ่งจะ เป็นไปตามตารางที่กำหนดการเชื่อมโยงของดาวเทียม นั้น

2.2 การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียม

การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียมสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.2.1 การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียม GEO กับดาวเทียม LEO (GEO-LEO) หรือเรียกว่า Inter-Orbital Links (IOL)

การเชื่อมโยงประเภทนี้ ใช้เพื่อติดตั้งรีเลย์อย่างถาวรผ่านดาวเทียม GEO ระหว่างสถานีภาคพื้นดินและดาวเทียมในวงโคจรต่ำที่ความสูง 500 - 1000 กิโลเมตร

2.2.2 การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียม GEO ด้วยกัน (GEO-GEO)

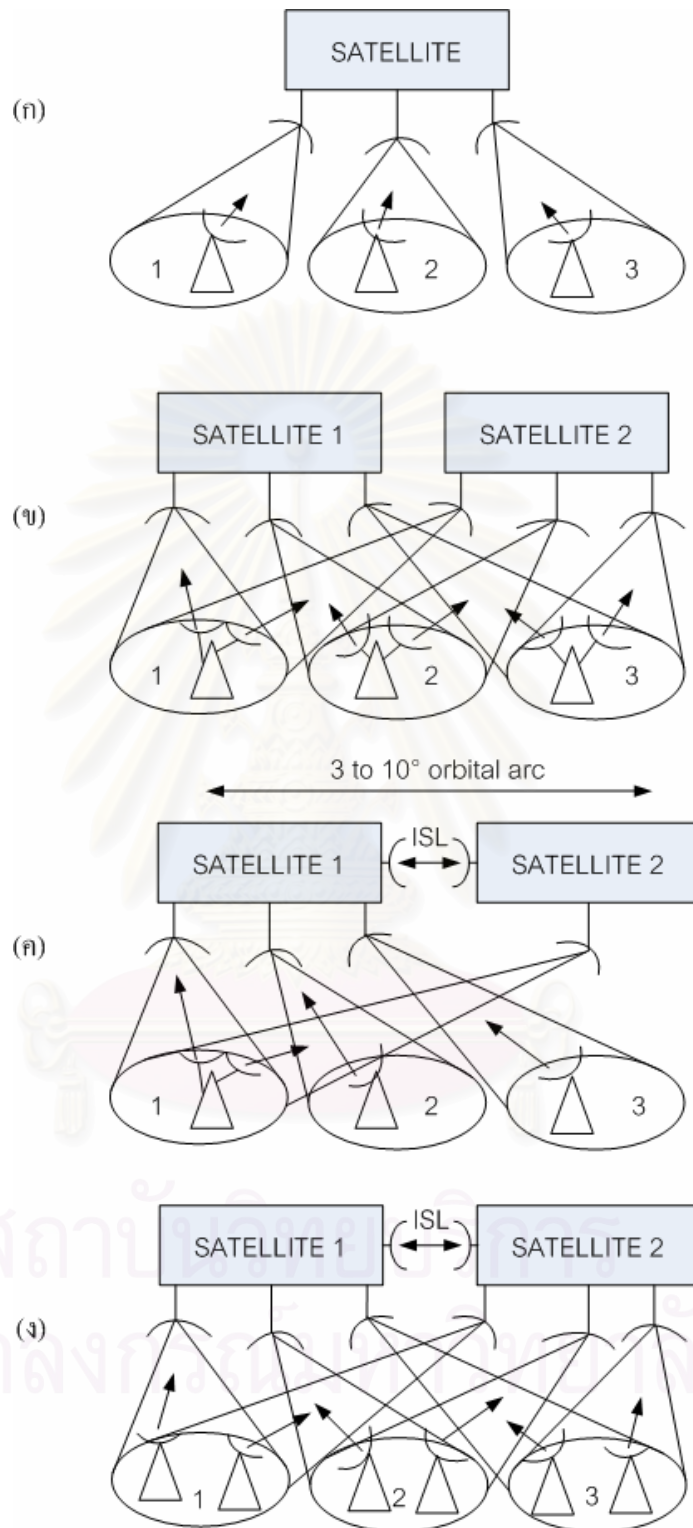
ประโยชน์ของการเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียม GEO ด้วยกันมีดังนี้

2.2.2.1 เพื่อเพิ่มความจุของระบบ

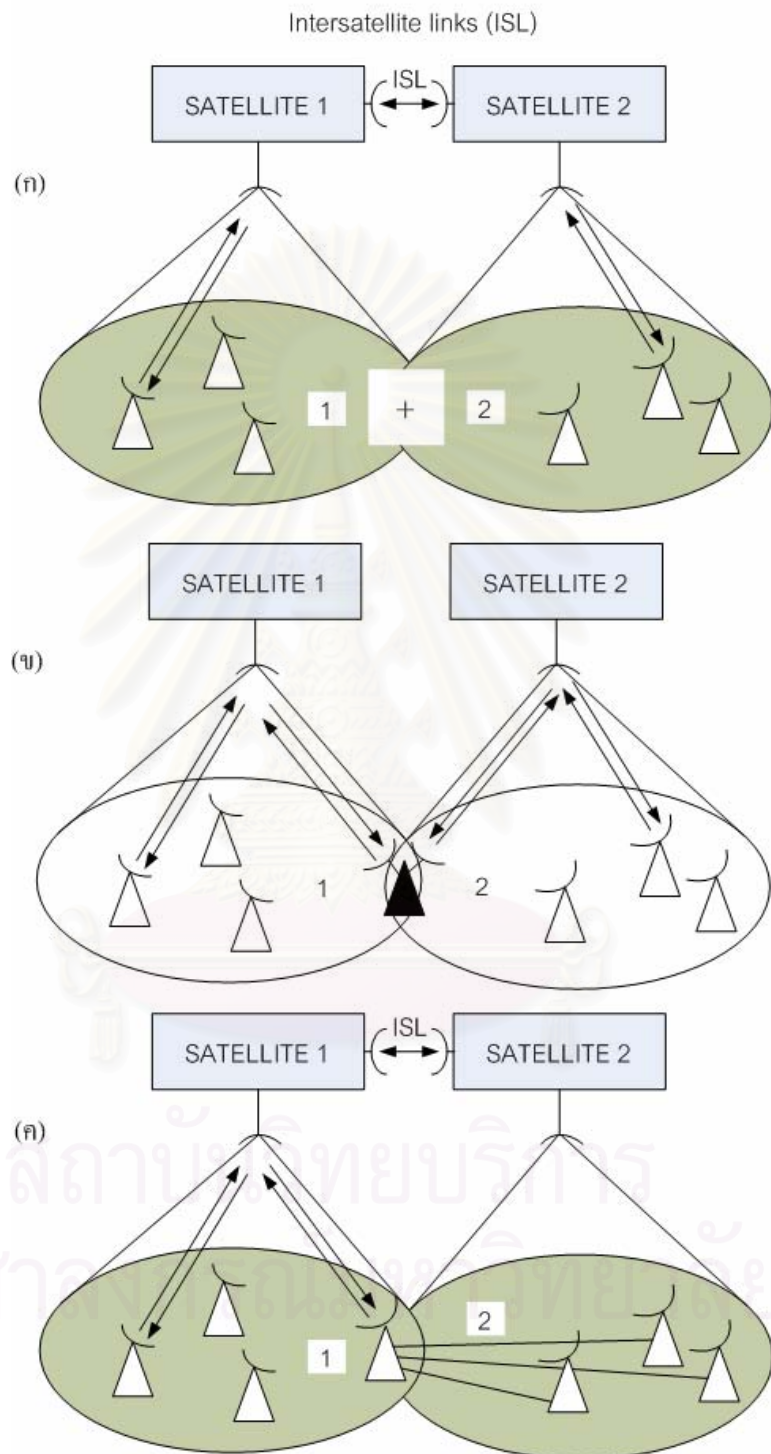
พิจารณามัลติบีมของโครงข่ายดาวเทียม ในกรณีของดาวเทียม 3 บีม ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) เมื่อมีความต้องการทราฟฟิกมากขึ้น ความจุของดาวเทียมจะมีไม่พอ จึงต้องใช้ดาวเทียมอีกดวงเพื่อเพิ่มความจุ โดยให้มีสายอากาศ 2 อัน แต่ละอันจะชี้ไปยังดาวเทียมแต่ละดวง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข) ถ้าในบริเวณที่ 1 มีปริมาณทราฟฟิกมาก จะมีการเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียมเพื่อรองรับปริมาณทราฟฟิกที่มากเกินไป ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ค) หรือแยกสถานีออกเป็น 2 สถานี แต่ละสถานีมีสายอากาศเพียงอันเดียวและติดต่อกับดาวเทียมเพียงดวงเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ง) และการเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียมจะใช้รองรับทราฟฟิกระหว่าง 2 สถานี

2.2.2.2 ขยายความครอบคลุมของระบบ

การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียมสามารถให้สถานีภาคพื้นดิน 2 โครงข่ายเชื่อมต่อระหว่างกันได้และรวมความครอบคลุมของดาวเทียมทั้ง 2 ดวง ดังรูปที่ 2.4 (ก) หรือเชื่อมต่อกันโดยติดตั้งสถานีภาคพื้นดินที่มีสายอากาศ 2 อันในส่วนที่มีความครอบคลุมร่วมกัน ดังรูปที่ 2.4 (ข) หรือเชื่อมต่อโดยโครงข่ายภาคพื้นดินจากสถานีหนึ่งไปยังสถานีหนึ่งในอีกโครงข่าย ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ค)



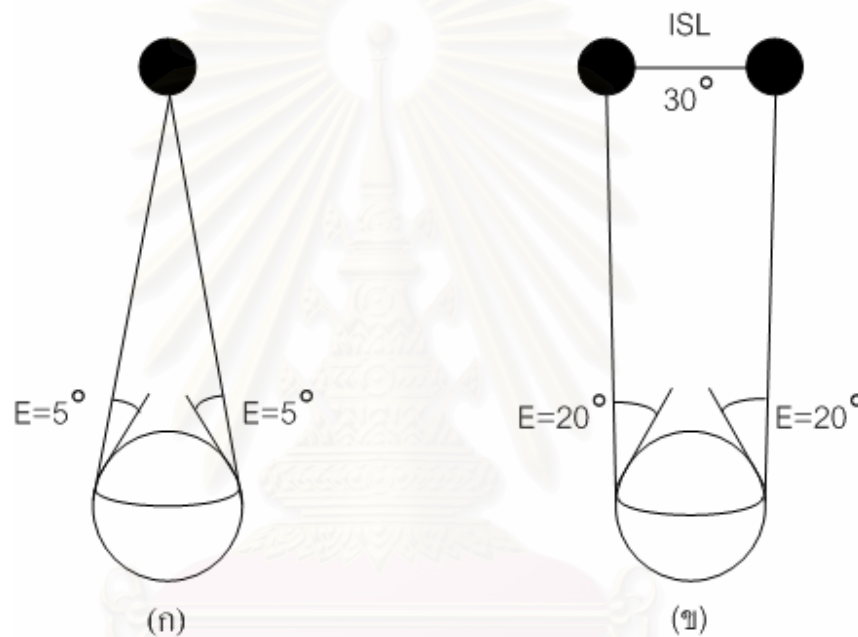
รูปที่ 2.3 การใช้การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียม



รูปที่ 2.4 การขยายความครอบคลุมของระบบ

2.2.2.3 เพิ่มมุมเงยที่น้อยที่สุด (minimum elevation angle) ของสถานีภาคพื้นดิน

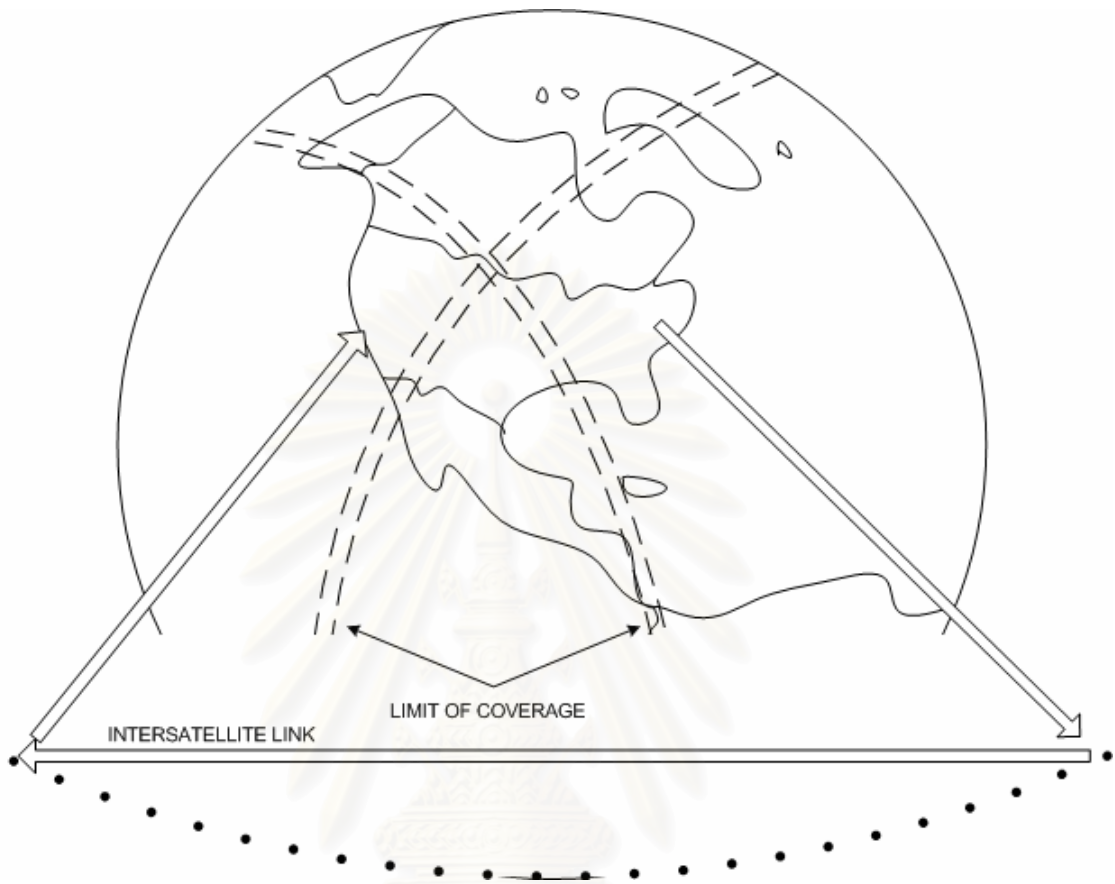
การเชื่อมต่อระยะไกลโดยใช้ดาวเทียมเพียงดวงเดียวนั้นจะมีมุมเงย (elevation angle) ที่เล็กมาก ซึ่งทำให้เกิดการลดลงของอัตราขยาย (gain) ของสถานีที่รับ และทำให้มีความเสี่ยงในการแทรกสอดของภาคพื้นดินเพิ่มขึ้นได้ แต่ถ้าใช้การเชื่อมโยงผ่านดาวเทียม 2 ดวง ก็จะเพิ่มมุมเงยขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การเพิ่มมุมเงยที่น้อยที่สุด (minimum elevation angle) ของสถานีภาคพื้นดิน

2.2.2.4 การลดข้อจำกัดบนตำแหน่งของวงโคจร

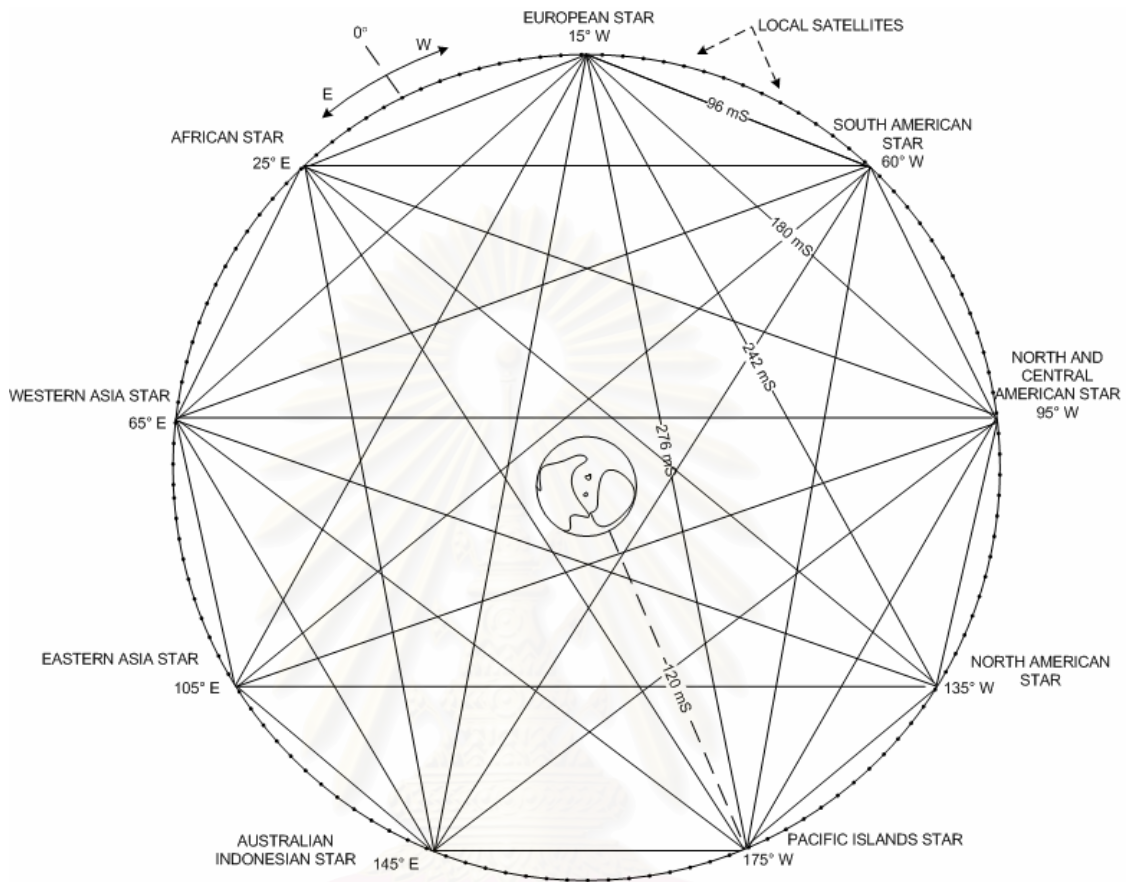
การขัดแย้งเรื่องตำแหน่งวงโคจรของดาวเทียมนั้นสามารถแก้ไขได้จากความต้องการใช้ดาวเทียมเพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่บริการและการต้องหลีกเลี่ยงการรบกวนในการติดตั้ง จึงได้ใช้การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียมขึ้นเพื่อลดการขัดแย้งนี้ ตัวอย่างของการใช้การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียมครอบคลุมสหรัฐอเมริกาแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ตัวอย่างการใช้การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียมครอบคลุมสหรัฐอเมริกา

2.2.2.5 เครือข่ายครอบคลุมทั่วโลก

รูปที่ 2.7 แสดงการออกแบบเครือข่ายครอบคลุมทั่วโลกโดยใช้ดาวเทียมค้างฟ้า 9 ดวง (STAR satellites) สำหรับการสื่อสารทั่วโลก และมีการติดตั้งดาวเทียมในพื้นที่โดยเชื่อมต่อกับดาวเทียม GEO ทั้ง 9 ดวงนี้โดยการใช้การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียมแบบภายในพื้นที่



รูปที่ 2.7 เครือข่ายครอบคลุมทั่วโลก

2.2.3 การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียม LEO ด้วยกัน (LEO-LEO)

จากประโยชน์ของดาวเทียม LEO และความคับคั่งของดาวเทียม GEO ที่เพิ่มขึ้น จึงมีการพัฒนาดาวเทียมขึ้นโดยมีการใช้การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียม ซึ่งจะลดข้อเสียทางด้านช่วงเวลาการสื่อสารที่จำกัดของดาวเทียมและช่วงการครอบคลุมที่เล็กของดาวเทียม LEO ลงในโครงข่ายที่ใช้ดาวเทียมจำนวนมาก เช่น IRIDIUM เป็นต้น

2.3 โพรโทคอลการจัดเส้นทาง (Routing Protocol)

ในการใช้การจัดเส้นทางแบบใช้ตาราง (table-driven routing) เหมาะที่จะใช้สำหรับโครงข่ายที่คงตัวหรือกึ่งคงตัว ในกรณีที่ใช้ในโครงข่ายดาวเทียมวงโคจรต่ำนี้ จะสามารถใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อมีกลุ่มของโหนดที่คงตัว ซึ่งโหนดเหล่านี้มีวงโคจรที่คงตัว แต่อย่างไรก็ตาม การที่โหนดอยู่ห่างกันมากและมีการเชื่อมต่อเป็นช่วงๆ จะทำให้การใช้การจัดเส้นทางแบบใช้ตารางใช้ได้ไม่ดีนัก นอกจากนี้ การปรับปรุงตารางการจัดเส้นทาง (routing table) จะได้รับผลกระทบจากการสื่อสารและการคำนวณโอเวอร์เฮด (overhead) สำหรับรูปแบบโครงสร้างของโครงข่ายที่มีการเปลี่ยนแปลงบ่อยๆ โครงข่ายดาวเทียมแต่ละแบบจะมีคุณสมบัติแตกต่างกัน ซึ่งข้อแตกต่างของโครงข่ายดาวเทียมวงโคจรต่ำทางการค้าและโครงข่ายดาวเทียมแอดฮอก ได้กล่าวไว้ใน [5]

โพรโทคอลการหาเส้นทางในโครงข่ายดาวเทียมแบบแอดฮอก แบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ โพรแอกทีฟ (proactive) และ รีแอกทีฟ (reactive)

1. วิธีการแบบโพรแอกทีฟ (Proactive Routing Protocol)

แต่ละโหนดในโครงข่ายจะเก็บเส้นทางที่สั้นที่สุดของทุกโหนดไว้ในตารางการจัดเส้นทาง (routing table) โดยการแลกเปลี่ยนข้อมูลการจัดเส้นทาง (routing information) กับโหนดข้างเคียง แต่ข้อมูลที่ได้นั้นจะใช้ได้ไม่นานเนื่องจากโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างบ่อย และการที่โหนดอยู่ห่างกันมาก จะมีการเชื่อมต่อเป็นช่วงๆ ทำให้วิธีนี้ใช้ได้ไม่ดีนัก ตัวอย่างของวิธีการนี้คือ DBF (Distributed Bellman-Ford) [6] และ DSDV (Destination-Sequence Distance Vector) [7]

2. วิธีการแบบรีแอกทีฟ (Reactive Routing Protocol)

เนื่องจากโครงข่ายมีการเปลี่ยนโครงสร้างเกิดขึ้น วิธีการนี้จะมีประสิทธิภาพดีกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการสร้างกระบวนการจัดหาเส้นทางขึ้นจากความต้องการในการใช้งาน แต่กระบวนการนี้จะขึ้นอยู่กับความความสามารถในการเข้าถึงของโหนดปลายทาง ดังนั้น วิธีการนี้อาจจะไม่มีประสิทธิภาพได้เมื่อโหนดอยู่ห่างกันมาก และมีการเชื่อมต่อเป็นช่วงๆ นอกจากนี้แล้ว วิธีการนี้จะได้รับผลกระทบจากการประวิงเวลามากๆ และการควบคุมปริมาณทราฟฟิกมากเกินไปตามการหาเส้นทางจากความต้องการ ตัวอย่างของวิธีการนี้คือ DSR (Dynamic Source Routing) [8] และ AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) [9]

2.4 การจัดเส้นทางแบบรีเลย์โดยใช้การสอบถาม (Interrogation-Based Relay Routing)

โปรโตคอลการจัดเส้นทางที่ได้กล่าวไปแล้วไม่สามารถแก้ปัญหาโครงข่ายดาวเทียมได้มากพอดังนั้น จึงนำการจัดเส้นทางแบบรีเลย์ มาใช้เนื่องจากโนดถัดไปอาจจะไม่สามารถส่งต่อข้อมูลได้ในทันที โนดจะต้องเก็บข้อมูลไว้จนกว่าจะสามารถส่งต่อไปได้

ปัจจัยสำคัญของการจัดเส้นทางแบบรีเลย์คือการเก็บข้อมูลแบบ *on-the-fly* (โนดจะต้องเก็บข้อมูลไว้ได้ชั่วคราว) และเทคนิคที่ใช้ในการส่งต่อข้อมูล

2.4.1 วิธีการพื้นฐาน

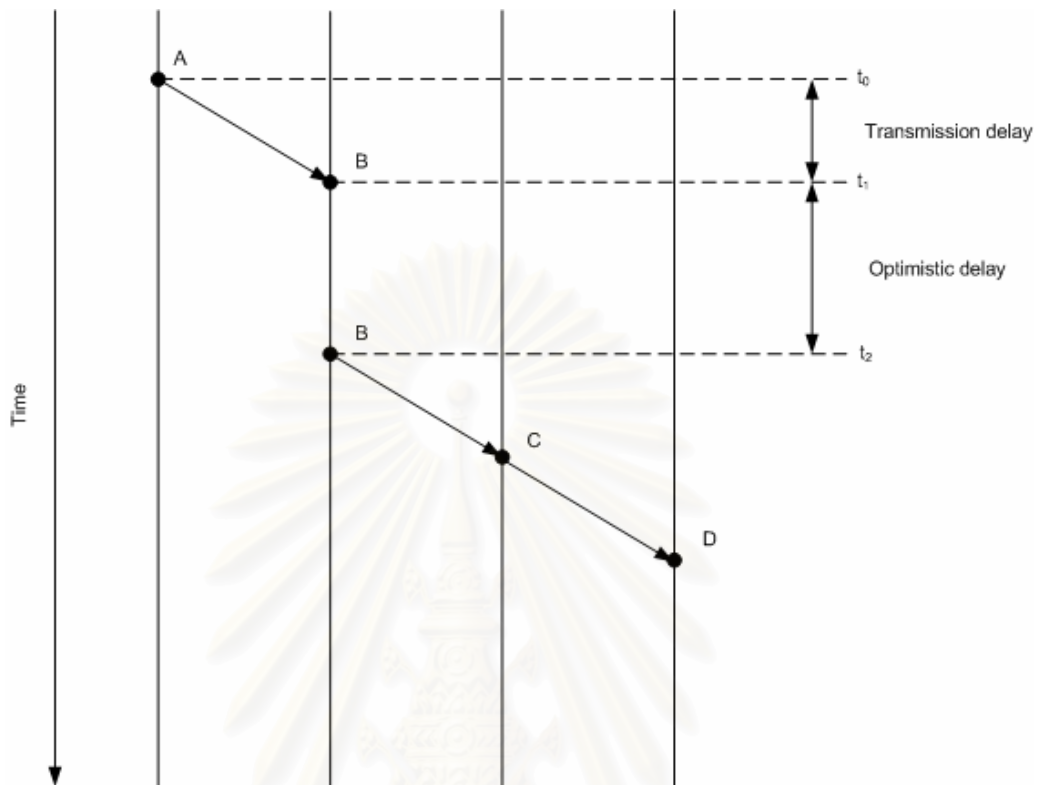
แบบแผนการส่งต่อข้อมูลในโครงข่ายไร้สาย สามารถแบ่งตามระยะเวลาที่ข้อมูลอยู่ในโนดกลางได้เป็น 2 ประเภท [10] ดังนี้

2.4.1.1 การส่งต่อแบบ pessimistic (pessimistic forwarding) ในกรณีที่โนดกลางไม่มีโนดถัดไป ข้อมูลจะถูกทิ้งไปทันที

2.4.1.2 การส่งต่อแบบ optimistic (optimistic forwarding) ในกรณีที่โนดกลางไม่มีโนดถัดไป ข้อมูลจะสามารถอยู่ในโนดกลางได้ช่วงเวลานึง โดยหวังว่าจะมีการเคลื่อนที่ของโนดในโครงข่ายและทำให้มีโอกาสที่จะส่งต่อข้อมูลไปยังโนดอื่นได้ การประวิงเวลาที่เกิดขึ้นในช่วงนี้เรียกว่า *optimistic delay* ซึ่งจะทำให้เกิดการประวิงเวลาที่ไม่คาดหวังได้ในการใช้งาน

การแก้ปัญหาในการจัดหาเส้นทางสำหรับโครงข่ายดาวเทียมแบบแอดฮอก จะทำให้ได้เส้นทางที่มีการประวิงเวลาน้อยที่สุด

ตัวอย่าง - A, B, C, D เป็น โนดดาวเทียม A เป็นต้นทาง D เป็นปลายทาง B และ C เป็นโนดกลาง โนด A ส่งข้อความไปโนด B ที่เวลา t_0 โนด B รับข้อความจากโนด A มาที่เวลา t_1 แต่โนด B ยังไม่สามารถส่งต่อแพ็คเกจได้ทันทีจึงเก็บข้อมูลไว้ชั่วคราวจนถึงเวลา t_2 เมื่อโนด B พบโนด C โนด B จะส่งต่อข้อความให้โนด C และโนด C จะส่งต่อให้โนด D ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างการส่งต่อข้อมูลแบบรีเลย์

คุณสมบัติของการส่งต่อข้อมูลแบบรีเลย์ก็คือ ไม่จำเป็นต้องมีเส้นทางทั้งหมดจากต้นทางไปปลายทางที่เวลาใดๆ แต่จะคิดถึงเส้นทางเสมือนที่ข้อมูลจะถูกส่ง และจะมีบางการเชื่อมโยงของเส้นทางเสมือนเท่านั้นที่จะถูกใช้ที่เวลานั้นๆ

2.4.2 กระบวนการในการเลือกโหนดถัดไป

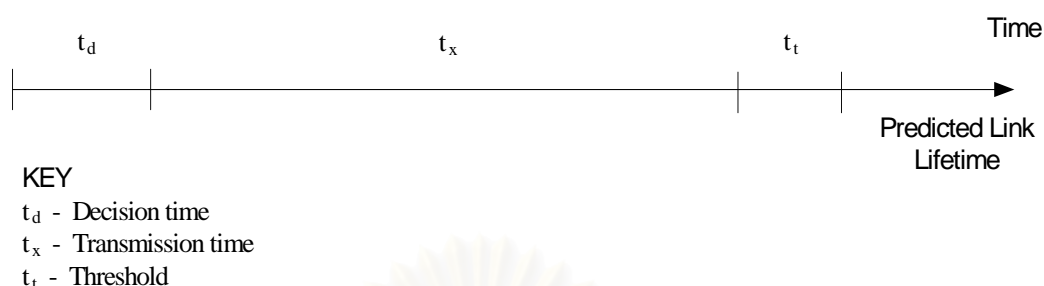
ในการจัดเส้นทางแบบรีเลย์นั้น โหนดอาจจะต้องมีการเก็บข้อมูลไว้นาน เนื่องจากดาวเทียมมีระยะห่างจากกันมาก ซึ่งถ้าเลือกเส้นทางได้ไม่ดีก็จะยิ่งทำให้ประสิทธิภาพของระบบแย่ลง การเลือกเส้นทางไม่ดีจะทำให้ข้อมูลไปไม่ถึงปลายทางได้ ซึ่งในการเลือกโหนดถัดไป โหนด A จะต้องรู้การเชื่อมต่อกับโหนดข้างเคียงทั้งในปัจจุบันและอนาคตของมันเป็นเองและของโหนดข้างเคียงอื่นๆ ด้วย ซึ่ง “look-ahead” จะมีความสำคัญสำหรับการเลือกเส้นทางในเค้าโครงของการจัดเส้นทางแบบรีเลย์ รัศมีการทำ look-ahead ยิ่งมากจะทำให้เส้นทางยิ่งใกล้เคียงกับเส้นทางทั้งหมดมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โหนด A จะส่งข้อมูลไปโหนด D โหนด A จะขอ

ข้อมูลของโหนด B ก่อนว่าโหนด B สามารถส่งข้อมูลไปที่โหนด D ได้หรือไม่ ซึ่งถ้าได้โหนด A ก็จะส่งข้อมูลไปให้โหนด B โดยจะสมมติว่า ไม่ว่าสถานะปัจจุบันของโหนด B จะเป็นอย่างไร อีกไม่นานโหนด B ก็อาจจะเป็นโหนดข้างเคียงของโหนด D หรือเป็นโหนดถัดไปของโหนดข้างเคียงของโหนด D ได้ ซึ่งจะทำให้ข้อมูลไปถึงโหนดปลายทาง D ได้ ไม่ว่าโหนด B จะรู้เส้นทางไปยังโหนด D หรือไม่ โหนด A ก็จะต้องรู้สถานะของโหนด B ว่า โหนด B รู้เส้นทางไปยังปลายทางหรือไม่ ซึ่ง look-ahead นี้จะทำให้โหนด A มีความยุ่งยากในการหาเส้นทางน้อยลง

เมื่อดาวเทียม 2 ดวงเข้ามาใกล้กัน มันจะเริ่มกระบวนการซักถามเพื่อที่จะแลกเปลี่ยนข้อมูลวงโคจรและการหาเส้นทาง โหนดจะใช้ข้อมูลนี้ในการเลือกโหนดถัดไป หลังจากที่โหนด A เลือกโหนด B เป็นโหนดถัดไปแล้ว โหนด A จะส่ง 'forwarding request' ไปยังโหนด B โดยหวังว่าโหนด B จะยังคงสามารถส่งต่อไปยังโหนดปลายทางได้ และโหนด A จะสร้างสมมติฐานว่า ในกรณีที่แพ็คเกจไปไม่ถึงปลายทาง อาจมีสาเหตุจากสถานะของโหนด B เปลี่ยนแปลงไประหว่างที่มีการเจรจาหรือขณะส่งข้อมูลกัน ซึ่งถ้าสถานะของโหนด B เปลี่ยนแปลงไป โหนด A ก็จะต้องเลือกโหนดอื่นเป็นโหนดถัดไปแทน ซึ่งโหนด A จะรู้สถานะของข้อมูลได้โดย โหนด A จะได้รับ 'positive acknowledgement' จากโหนด D หรือไม่ได้รับ 'negative acknowledgement' จากโหนดกลางภายในช่วงเวลาที่กำหนดไว้

2.4.3 แนวทางแก้ปัญหาสำหรับ look-ahead

ถ้าดาวเทียม 2 ดวงมีการเชื่อมโยงต่อกัน (ISL) แค่ในระยะเวลาสั้นๆ โหนดจะใช้ข้อมูลของวงโคจรในการทำนายช่วงเวลาที่การเชื่อมโยงนั้นอยู่ได้ ช่วงเวลาของการเชื่อมโยงเป็นระยะเวลามากสุดของระยะเวลาในการเลือกโหนดถัดไปดังแสดงในรูปที่ 2.9 ช่วงเวลาที่การเชื่อมโยงนั้นอยู่ได้นั้นจะคำนวณได้จากข้อมูลของวงโคจร ถ้า τ_x เป็นเวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล โหนดควรจะเลือกโหนดถัดไปภายในเวลา τ_d ซึ่งถ้าหมดช่วงเวลา threshold τ_t แล้ว ISL จะไม่มีการเชื่อมโยงต่อกัน



รูปที่ 2.9 ช่วงเวลาของการเชื่อมโยง

ในการเลือกโนดถัดไป โหนดจะต้องหาศักยภาพของโนดต่างๆ และเลือกโนดที่ดีที่สุดแล้วส่งข้อมูลไปยังโนดนั้น ในการเลือกโนดจะขึ้นอยู่กับเมตริกซ์ต่างๆ ดังนี้

- ตำแหน่งระยะห่างและข้อมูลของวงโคจรของโนด
- แบนด์วิดธ์ของ ISL ไปยังโนด
- ความสัมพันธ์ของความเร็วและการเคลื่อนที่ของโนดระหว่าง 2 โหนด
- ความใกล้เคียง (vicinity) ของโนดกับดาวเทียมดวงอื่นและสถานีภาคพื้นดิน
- ความสามารถของดาวเทียม
- เวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล

จากตัวอย่างที่แล้ว โหนด B อาจจะได้เป็นโนดที่ดีที่สุดของโนด A แต่โนด A อาจจะได้รับข้อมูลไว้แล้วรอโนด C เข้ามาใกล้ ถ้าโนด C เป็นโนดที่ดีที่สุด โหนด A สมควรที่จะปล่อยให้โอกาสที่จะส่งผ่านโนด B ให้ผ่านไป แต่ถ้าโนด B เป็นโอกาสที่ดีที่สุด จะถือว่าโนด A มีการเลือกที่ไม่มีประสิทธิภาพ ทำให้โนด A อาจจะไม่มีโอกาสที่จะส่งต่อได้อีกนานมาก ในกรณีนี้ โหนด A ต้องตัดสินใจว่ามันควรจะส่งเมื่อยังมีโอกาสส่งหรือไม่หรือจะรอจนกว่าจะมีโอกาสที่ดีกว่าซึ่งอาจจะมาเร็วหรือช้าก็ได้ ในกรณีที่โนดส่งข้อมูลเมื่อยังมีโอกาสที่จะส่งนั้น มันจะเลือกโดยต้องดูช่วงเวลา timeout ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงโครงข่าย ในกรณีที่โครงข่ายห่างกันมากๆ โหนดจะยกเลิกการส่งข้อมูล และจะได้ผลกระทบจากกระบวนการค้นหาเส้นทาง ซึ่งวิธีการที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับเมตริกซ์ต่างๆ ที่กล่าวไปแล้ว

2.4.4 วิธีการที่จะได้ข้อมูลของโนดข้างเคียงมา

ข้อมูลวงโคจรและการหาเส้นทางมีการแลกเปลี่ยนได้ 2 วิธีคือ

2.4.4.1 โนดอาสาที่จะบอกข้อมูลของมันเป็นเองกับโนดอื่นๆ (วิธีการบอกตำแหน่ง, beaconing)

2.4.4.2 โนดตอบรับโนดอื่นๆ ที่ถามข้อมูลมา (วิธีการสอบถาม, interrogation)

ในวิธีโพรแอ็คทีฟ เช่น วิธีการบอกตำแหน่ง แต่ละโนดจะส่งข่าวสารบีคอน (beacon message) อย่างสม่ำเสมอ (เหมือนกับ hello message แต่เป็นข้อมูลวงโคจรและการหาเส้นทาง) เพื่อแสดงตนและปรับความสัมพันธ์กับโนดอื่นอย่างสม่ำเสมอ วิธีการคล้ายๆ กันนี้ใช้ใน Associativity Based Routing (ABR) [11] ในที่นี้ความสัมพันธ์คือ ระยะทาง ช่วงเวลา ความเสถียรของการเชื่อมต่อของโนด และความสัมพันธ์ของโนดกับโนดข้างเคียงที่เปลี่ยนไปเมื่อโนดเคลื่อนที่เข้าหรือออก

วิธีการบอกตำแหน่ง จะไม่มีประสิทธิภาพมากนักในกรณีที่โนดทำการบอกตำแหน่งเป็นประจำ และโนดอื่นไม่มีการใช้ข่าวสารบีคอน แต่ในการใช้วิธีการสอบถามนี้ โนดจะไม่ส่ง hello message เลยนอกจากจะเริ่มต้นการเชื่อมต่อของโนด 2 โนด หลังจากที่เริ่มแล้วจะเริ่มการจัดเส้นทางแบบรีเลย์โดยใช้วิธีการสอบถาม ต่อไปเพื่อแลกเปลี่ยนข้อมูลวงโคจรและการจัดเส้นทางระหว่างโนดกันในรูปแบบของ ‘การสอบถาม’ และ ‘การตอบสนอง’ และอาจจะมีการส่งข้อมูลต่อไปหรือไม่ก็ได้ วิธีการนี้จะคล้ายกับ on-demand หรือโพรโตคอลการจัดเส้นทางแอดฮอคแบบรีแอ็คทีฟ (reactive ad hoc routing protocol) แต่แทนที่จะจัดหาเส้นทางทั้งหมด โนดจะพยายามเอาข้อมูลเกี่ยวกับโนดข้างเคียงและโนดถัดไปของโนดข้างเคียงในขณะนั้นมากกว่า (one hop look-ahead)

ข้อมูลที่ได้มาจะเอาไปใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางและอาจจะเป็นข้อมูลที่ถูกรับไว้ใช้งานในบริเวณนั้นชั่วคราวและสามารถแบ่งให้กับโนดอื่นได้ตามต้องการ

2.4.5 ข่าวดสารการควบคุม

กระบวนการซักถามข้อมูลมีอยู่ในตัวกระทำการจัดเส้นทางที่ใช้งานที่ดาวเทียม ซึ่งแลกเปลี่ยนข่าวดสารการควบคุม เพื่อสอบถามและตัดสินใจในการส่งต่อข้อมูล ในการทำการสอบถามของตัวกระทำการจัดเส้นทางได้ปรับ KQML (Knowledge Query and Manipulation Language) ใน [12] มาใช้เป็นข่าวดสารการควบคุม ในตัวกระทำการจัดเส้นทาง เช่น

1. Informative performatives (*tell, deny, untell*) โหนดจะใช้ข่าวดสารการควบคุมนี้ เมื่ออาสาที่จะบอกข้อมูลของมันให้โนดอื่นรู้
2. Query performatives (*ask-one, ask-all, ask-if, evaluate*) โหนดจะใช้ข่าวดสารการควบคุมนี้ เมื่อต้องการข้อมูลจากโนดใ้ๆ ข้อมูลนี้อาจมีรูปแบบข้อมูลง่ายๆ เป็นเมตริกซ์ (*ask-one, ask-all, ask-if*) หรือมีความซับซ้อนที่ต้องหาเป็นค่า (*evaluate*) ซึ่งอาจเป็นสูตรที่หาค่าว่าเครื่องรับสามารถเป็นโนดถัดไปได้หรือไม่
3. Response performatives (*reply, sorry*) ใช้เพื่อตอบสนองข่าวดสารการควบคุมของการสอบถาม การตอบกลับอาจเป็นการยืนยัน การปฏิเสธ หรือการแนะนำก็ได้ ขึ้นอยู่กับสถานะปัจจุบันและข้อมูลของโนด
4. Networking performatives (*register, unregister, forward, broadcast*) ใช้เพื่อจัดการการทำงานของโครงข่ายที่เกี่ยวข้อง เช่น เมื่อการจัดเรียงของดาวเทียมต่างกันอาจจะเป็นดาวเทียมกลุ่มเดิมแต่มีรูปร่างเปลี่ยนไป ดาวเทียมอาจจะบันทึกตัวมันเองเป็นกลุ่มเฉพาะเมื่อโนดเคลื่อนที่ระหว่างการจัดเรียงของดาวเทียมต่างกัน มันอาจจะใช้ข่าวดสารการควบคุม เพื่อเข้าร่วมหรือไม่เข้าร่วมกับกลุ่ม แต่ถ้าแสดงเป็น *broadcast* และ *forward* จะใช้สำหรับแพร่ข้อมูล
5. Capability-definition performatives (*advertise, subscribe*) ตรงกันข้ามกับ pull model (reactive approach) โหนดสามารถยื่นข้อมูลของมัน (proactive approach) แทนที่จะรอการร้องขอมา โหนดที่เปลี่ยนที่ใหม่อาจจะแจ้งการอยู่ที่นั่นและความสามารถของมันให้โนดอื่นรู้จนมันเป็นโนดที่มีศักยภาพในการหาเส้นทาง บางโนดสามารถบอกรับแทนโนดอื่นได้จนมันเกิดการปรับปรุงได้เป็นระยะๆ เกี่ยวกับโนดนั้น

2.4.6 การจัดเส้นทางแบบหลายวิถี (Multipath Routing)

การใช้หลายเส้นทางได้กล่าวไว้ใน [13, 14] นั่นคือ ในกรณีที่เส้นทางไม่สามารถอยู่ได้นานพอ จะสามารถใช้การค้นหาเส้นทางหลายเส้นทาง ในการเลือกใช้เส้นทางอื่นได้ ในกรณีนี้เมื่อโหนดต้นทางพบเส้นทางและสามารถหาได้มากกว่าเส้นทางเดียวแล้ว มันจะเก็บเส้นทางทั้งหมดไว้ในหน่วยความจำเส้นทางเพียงชั่วคราวและเลือกใช้เส้นทางที่ดีที่สุด เมื่อเส้นทางแรกไม่สามารถใช้ได้ ก็จะเลือกใช้เส้นทางอื่น

ในโครงข่ายดาวเทียม มีดาวเทียมที่อยู่ห่างกันมากและมีการเชื่อมต่อเป็นพักๆ มันมีโอกาสที่ข้อมูลอาจจะไม่ถึงปลายทางได้ถ้าเลือกโหนดเพียงโหนดเดียว การค้นหาเส้นทางหลายเส้นทางจะเป็นประโยชน์โดยการเลือกหลายโหนดในการส่งต่อข้อมูล แต่ก็ต้องระวังในการเลือกจำนวนโหนด เนื่องจากอาจเกิดการใช้โครงข่ายที่มากเกินไปได้

2.5 การใช้งานโปรแกรม Network Simulator (NS) บนระบบปฏิบัติการ (Windows)

ในการจำลองผลของโปรโตคอลการจัดเส้นทางที่ได้มีการปรับปรุงใหม่นั้นจะต้องทดสอบบนตัวจำลอง (simulator) ก่อนที่จะนำไปทดสอบบนอุปกรณ์การใช้งานจริงได้ ซึ่งตัวจำลองที่ใช้ในการจำลองโปรโตคอลการจัดเส้นทางบนโครงข่ายแอดฮอกคือ NS-2 ซึ่ง NS เป็นตัวจำลองเหตุการณ์แบบไม่ต่อเนื่อง (discrete event simulator) ซึ่งจะรองรับการจำลองของ TCP การจัดเส้นทาง และโปรโตคอลมัลติคาสต์ (multicast protocol) บนโครงข่ายทั้งแบบมีสายและไร้สาย

NS เป็นตัวจำลองที่ทำงานโดยสคริปต์ OTCL (OTCL script driven simulator) มีส่วนประกอบของโครงข่ายที่เป็น C++ เช่น โปรโตคอลของโครงข่าย ตัววัดเวลา และโครงสร้างโครงข่าย เป็นต้น เพื่อที่จะให้ผู้ใช้งานสร้างสถานการณ์จำลองโครงข่ายได้ง่าย

NS-2 แตกต่างจาก NS-1 คือ

1. มีวัตถุ (object) ที่ซับซ้อนน้อยกว่า
2. อินเทอร์เฟซ โครงแบบ (configuration interface) เป็น Otcl (object oriented ของ Tcl)
3. อินเทอร์เฟซกับตัวแปลภาษา Otcl (Otcl interpreter) แยกจากตัวจำลองหลัก

NS เป็นตัวจำลอง object oriented ที่เขียนใน C++ มีตัวแปลภาษา Otcl เป็น frontend ตัวจำลองรองรับคลาสแบบลำดับชั้น (class hierarchy) ใน C++ (compiled hierarchy) และคลาสแบบลำดับชั้นใน Otcl (interpreted hierarchy) คลาสลำดับชั้นทั้งสองนี้มีความสัมพันธ์กัน

2.5.1 ภาพรวมของแบบจำลองดาวเทียม

ในการจำลองโครงข่ายดาวเทียมต้องมีรายละเอียดการจำลองคุณสมบัติความถี่ของคลื่นวิทยุ (radio frequency characteristics) อินเตอร์เฟส, เฟดดิ้ง, ปฏิกริยาต่อกันของโปรโตคอล และ ผลกระทบของวงโคจรในลำดับที่สอง (second-order orbital effect) อย่างไรก็ตามในการศึกษาคุณลักษณะพื้นฐานของโครงข่ายดาวเทียมอาจจะตัดลักษณะบางส่วนออกไป

2.5.2 ดาวเทียม LEO

พารามิเตอร์ในการจัดเรียงตัวของดาวเทียมมีดังนี้

- การจัดเรียงตัวขั้นพื้นฐาน ประกอบด้วย ความสูงของดาวเทียม จำนวนดาวเทียม จำนวนระนาบ จำนวนดาวเทียมต่อระนาบ
- วงโคจร ความเอียงของวงโคจรมีค่าได้ตั้งแต่ 0 - 180 องศา
- การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียม (Intersatellite Links: ISL) สำหรับการเรียงตัวในวงโคจรแบบขั้วโลก สามารถกำหนดอินทราเพลน (intraplane), อินเตอร์เพลน (interplane) และ cross-seam ได้

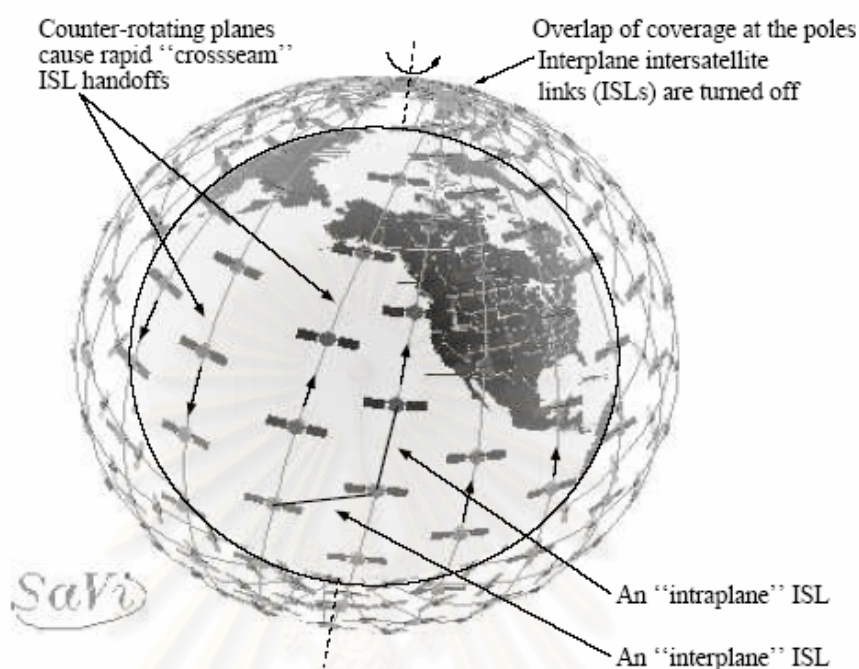
ISL ของอินทราเพลน อยู่ระหว่างดาวเทียมในระนาบเดียวกัน ไม่มีการดีแอ็คทีเวต (deactivate) หรือแฮนด์ออฟ

ISL ของอินเตอร์เพลน อยู่ระหว่างดาวเทียมต่างระนาบกันแต่เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน การเชื่อมโยงนี้จะมีการดีแอ็คทีเวตใกล้กับขั้วโลก และไม่มีการแฮนด์ออฟ

Cross-seam ISL อยู่ระหว่างดาวเทียมต่างระนาบที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกัน
- การเชื่อมโยงระหว่างพื้นโลกกับดาวเทียม (Ground to Satellite Links: GSL) การเชื่อมโยง GSL สำหรับดาวเทียม GEO จะคงตัว ในขณะที่ GSL สำหรับดาวเทียม LEO จะมีการแฮนด์ออฟเป็นช่วงๆ
- มุมเงย (Elevation Mask) คือมุมเงยที่ GSL ยังสามารถใช้งานได้

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างพารามิเตอร์ของดาวเทียมวงโคจรต่ำในการจำลองผล

	Iridium	Teledesic
ความสูง	780 กิโลเมตร	1375 กิโลเมตร
ระนาบ	6	12
จำนวนดาวเทียมต่อระนาบ	11	24
ความเอียงของวงโคจร (องศา)	86.4	84.7
ระยะห่างระหว่างระนาบ (องศา)	31.6	15
ระยะของรอยต่อ (องศา)	22	15
มุมเงย (องศา)	8.2	40
Intrplane phasing	มี	มี
Interplane phasing	มี	ไม่มี
จำนวน ISL ต่อดาวเทียม	4	8
แบนด์วิดธ์ของ ISL	25 Mb/s	155 Mb/s
แบนด์วิดธ์ของการเชื่อมโยงขาขึ้นและขาลง	1.5 Mb/s	1.5 Mb/s
Cross-seam ISL	ไม่มี	มี
ISL latitude threshold (องศา)	60	60



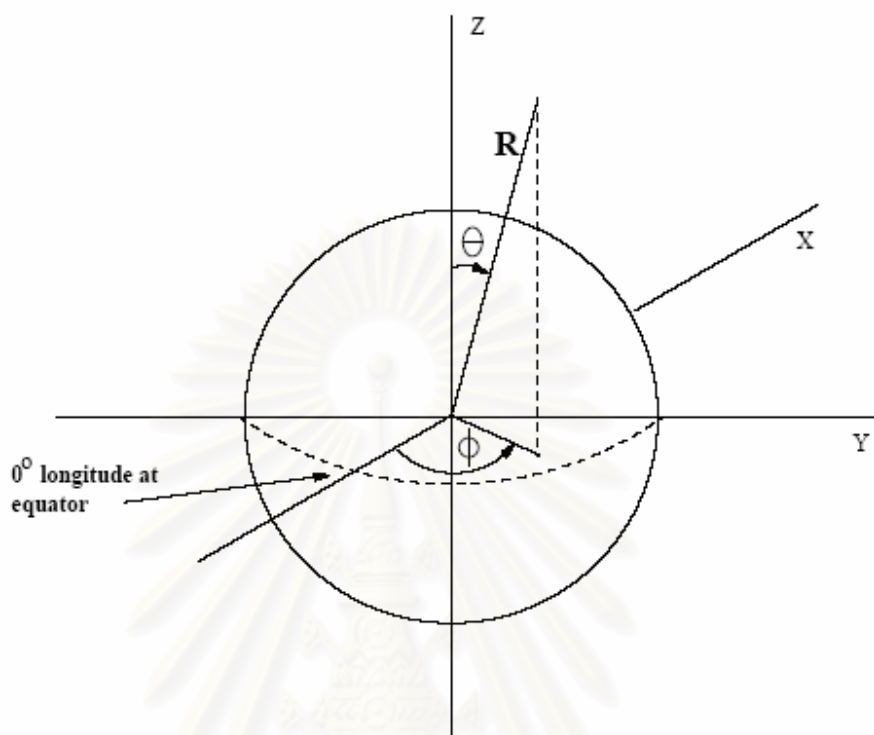
รูปที่ 2.10 ตัวอย่างการจัดเรียงตัวของดาวเทียม LEO

2.5.3 โหนดและตำแหน่ง

ในการจำลองผลมีโนดดาวเทียมอยู่ 2 ประเภทคือ geostationary และ non-geostationary นอกจากนี้ยังมีโนดภาคพื้นดินด้วย ตำแหน่งของดาวเทียมในระบบพิกัดจะอยู่ในฟังก์ชันของเวลาในการจำลองผล ข้อมูลของตำแหน่งนี้จะนำมาใช้หาการประวิงเวลาในการเชื่อมโยง และเวลาที่เหมาะสมในการเสนอข้ออฟ

รูปที่ 2.11 แสดงระบบพิกัดทรงกลมเทียบกับระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ระบบพิกัดมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่โลก และแกน z ทับกับแกนที่โลกหมุน

$(R, \theta, \phi) = (6378\text{km}, 90^\circ, 0^\circ)$ มีค่าเป็น 0° ของเส้นแวงบนเส้นศูนย์สูตร

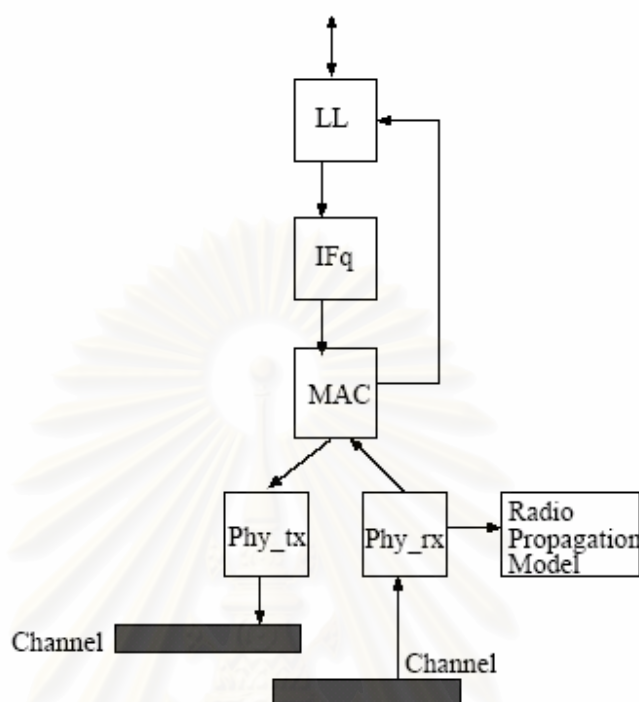


รูปที่ 2.11 ระบบพิกัดทรงกลมที่ใช้ในโนดดาวเทียม

2.5.4 การเชื่อมโยงของดาวเทียม

โนดดาวเทียมแต่ละโนดมีโครงสร้างการเก็บข้อมูลอินเตอร์เฟสของโครงข่ายดาวเทียมมากกว่า 1 อันรูปที่ 2.12 แสดงส่วนประกอบสำคัญของอินเตอร์เฟส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบสำคัญของอินเทอร์เฟซโครงข่ายดาวเทียม

2.5.5 การจัดสรรเส้นทางของดาวเทียม

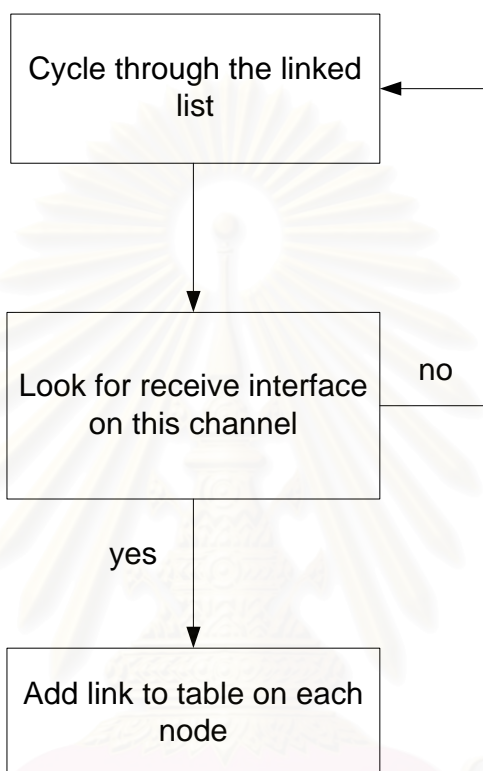
การจัดสรรเส้นทางใน NS ใช้การจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง (centralized routing) ซึ่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบโครงสร้างของโครงข่าย (topology) จะหารูปแบบโครงสร้างของโครงข่ายใหม่แล้วคำนวณเส้นทางใหม่สำหรับทุกโหนด และสร้างตารางการส่งต่อข้อมูลบนแต่ละโหนด ตารางการส่งต่อข้อมูลนี้ประกอบด้วยตัวชี้ซึ่งจะชี้ไปยังการเชื่อมโยงขาออกใดๆ ที่จะนำไปสู่โหนดปลายทาง

2.5.5.1 การคำนวณรูปแบบโครงสร้างของโครงข่าย

ในการคำนวณรูปแบบโครงสร้างของโครงข่าย จะต้องหาข้อมูลความอยู่ใกล้ชิดกันของการเชื่อมโยง (link adjacency) จากโหนดต่างๆ และให้ข้อมูลปัจจุบันของรูปแบบโครงสร้างของโครงข่ายไปยังโหนดต่างๆ นั้นด้วย

การหาความอยู่ใกล้ชิดกัน (adjacency) นั้นทำได้โดยพิจารณา linked list ของโหนดต่างๆ โดยตลอด จากนั้น จึงหาอินเทอร์เฟซขากรับ (receive interface) บนช่องสัญญาณ เมื่อพบ

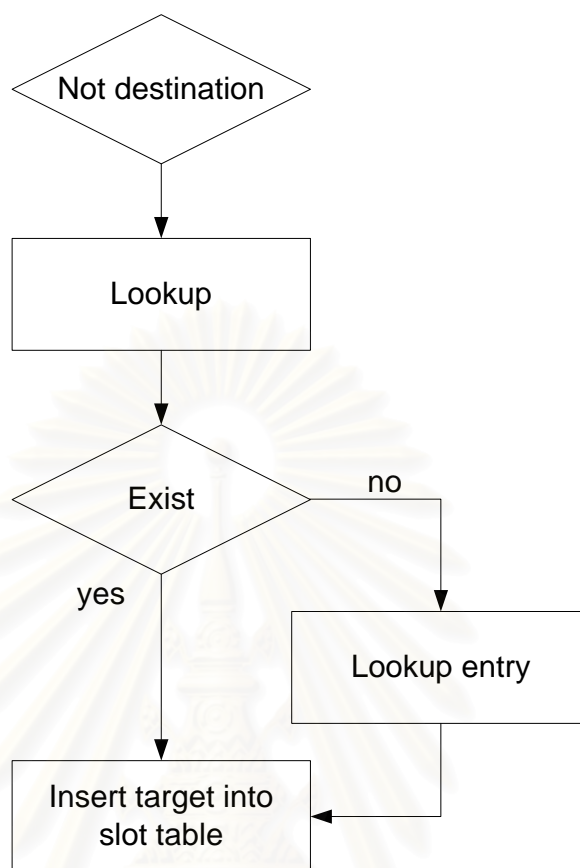
ความสัมพันธ์ของความอยู่ใกล้ชิดกัน (adjacency) แล้ว ให้เพิ่มการเชื่อมโยงนี้ไปยังตารางข้อมูลของแต่ละโหนด การทำงานของการคำนวณรูปแบบโครงสร้างของโครงข่ายแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การคำนวณรูปแบบโครงสร้างของโครงข่ายของการจัดเส้นทางแบบศูนย์กลาง

2.5.5.2 การกระจายตารางการจัดเส้นทาง

ในการกระจายตารางการจัดเส้นทาง เริ่มจากการทำสล็อตของตารางการจัดเส้นทางปัจจุบันให้ว่าง แล้วนำจุดหมายปลายทางมาพิจารณาเส้นทาง และเพิ่มจุดหมายลงในตารางไดอะแกรมการกระจายตารางการจัดเส้นทางแสดงในรูปที่ 2.14

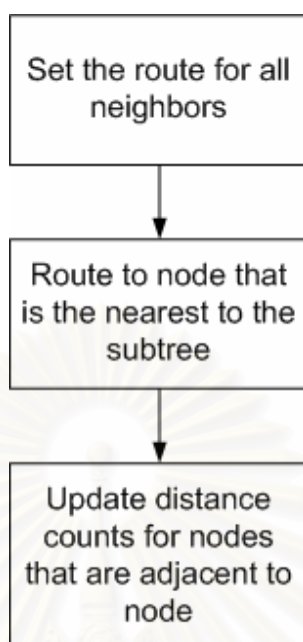


รูปที่ 2.14 การกระจายตารางการจัดเส้นทาง

2.5.5.3 การคำนวณการจัดเส้นทาง

ในการคำนวณเส้นทางสำหรับโหนดต่างๆ สามารถทำได้โดย จัดเส้นทางไปยังโหนดข้างเคียงทั้งหมดก่อน จากนั้นจึงจัดเส้นทางไปยังโหนดที่มีระยะทางใกล้กับ subtree ที่สุด และอัปเดตระยะทาง (distance counts) สำหรับโหนดที่อยู่ใกล้ชิดกับโหนด วิธีการคำนวณเส้นทางของโหนดแสดงในรูปที่ 2.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.15 การคำนวณเส้นทางของโนด

2.5.5.4 ข้อดีและข้อเสียของการจัดเส้นทางแบบศูนย์กลาง

ข้อดีของการจัดเส้นทางแบบศูนย์กลางคือ ถ้าข้อมูล เช่น คุณสมบัติของพารามิเตอร์ ที่เปลี่ยนแปลงไม่บ่อย ข้อมูลต่างๆ นี้จะอยู่ในฐานข้อมูลส่วนกลาง และไม่จำเป็นต้องมีการประกาศ (advertise) ส่วนข้อเสียของการจัดเส้นทางแบบนี้คือ ถ้าต้องการซ่อมแซมเส้นทางอย่างรวดเร็ว จะไม่สามารถเชื่อถือระบบนี้ให้คำนวณเส้นทางที่ล้มเหลวได้ตามต้องการ และสำหรับรูปแบบโครงสร้างของโครงข่ายที่ใหญ่มากจะเสียเวลาในการคำนวณเส้นทางมาก

2.6 โพรโทคอลแอตฮอกใน NS

โพรโทคอลการจัดเส้นทางประเภทต่างๆ ของโครงข่ายแอตฮอก

2.6.1 Destination Sequenced Distance Vector (DSDV)

แต่ละโนดจะมีตารางการจัดเส้นทาง (routing table) และจะกระจายการปรับเปลี่ยนเส้นทางออกไปเป็นช่วงๆ เลขลำดับ (sequence number) จะใช้เพื่อระบุเส้นทางแต่ละเส้น เพื่อแสดงว่าเป็นเส้นทางที่ได้รับการปรับปรุงใหม่แล้ว เส้นทางที่มีเลขลำดับเหมือนกัน เส้นทางที่ดีกว่า คือเส้นทางที่มี

จำนวนฮอปน้อยกว่า ถ้าโหนดตรวจได้ว่ามีเส้นทางที่เสียหาย จำนวนฮอปจะกลายเป็นอนันต์และเลขลำดับจะปรับเปลี่ยนเพิ่มเป็นเลขคู่ (เลขลำดับที่เป็นเลขคู่แสดงถึงเส้นทางที่มีการเชื่อมต่อ)

2.6.2 Ad-hoc On Demand Distance Vector (AODV)

จะไม่มีการเก็บเส้นทางที่ไม่ใช้ไว้ที่โหนด โพรโตคอลจะใช้ข้อความ (message) ในการพบและเก็บการเชื่อมโยง ประกอบด้วย Route Request (RREQs) , Route Replies (RREPs) , Route Errors (RERRs) โดยที่ข้อความเหล่านี้จะใช้โดยกระบวนการบน UDP และ IP header

เมื่อโหนดต้องการหาเส้นทางจะกระจาย RREQ จนกระทั่งมีโหนดที่พบเส้นทางไปยังปลายทางได้ จากนั้นจะส่ง RREP กลับมายังต้นทาง โหนดที่เป็นส่วนหนึ่งของเส้นทางจะให้ข้อมูลการเชื่อมต่อโดยกระจาย hello message ไปยังโหนดข้างเคียง เมื่อโหนดตรวจได้ว่ามีเส้นทางที่ใช้ไม่ได้ก็จะลบเส้นทางนั้นออกไปและส่ง RERR ไปยังโหนดข้างเคียง ถ้าโหนดต้นทางได้รับ RERR มันจะเริ่มส่ง RREQ ใหม่

2.6.3 Dynamic Source Routing (DSR)

โพรโตคอลนี้ใช้กับโครงข่ายที่มีโหนดจำนวนมากและโหนดที่มีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง โพรโตคอลนี้ไม่มีการปรับเปลี่ยนเส้นทางเป็นช่วงๆ ซึ่งทำให้โอเวอร์เฮด (overhead) ในโครงข่ายลดลง โพรโตคอลประกอบด้วยกระบวนการ 2 อย่างคือ

1. การค้นหาเส้นทาง (route discovery)

โหนดต้นทางจะกระจาย RREQ จากนั้นโหนดที่ได้รับ RREQ จะหาว่ามีเส้นทางไปยังปลายทางใน Route Cache หรือไม่

2. การรักษาเส้นทางไว้ (route maintenance)

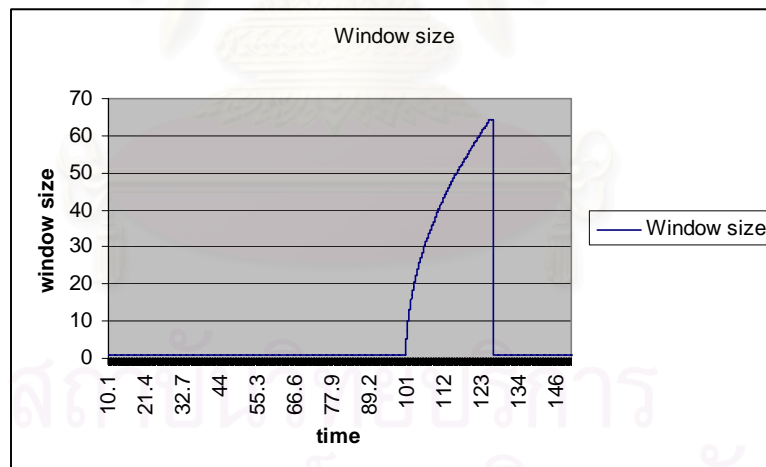
2.6.4 Temporally Ordered Routing Algorithm (TORA)

ในโครงข่ายอาจจะมีเส้นทางมากกว่าเส้นทางเดียวที่ไปถึงยังปลายทางได้ โพรโตคอลนี้ประกอบด้วย 3 ส่วนคือ การสร้างเส้นทาง การรักษาเส้นทางไว้ และการลบเส้นทาง ในการหาเส้นทางจะใช้แพ็คเกจ Query (QRY) และ Update (UPD)

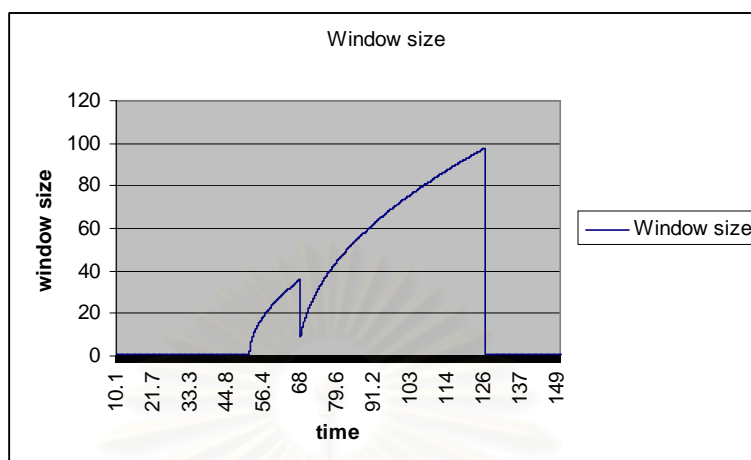
2.7 การจำลองผลและเปรียบเทียบผลการจำลองที่ใช้โปรโตคอลแอดฮอกแบบต่างๆ กัน

2.7.1 TCP บน DSDV

ในการจำลองนี้ได้กำหนดให้มีการเริ่มส่งแพ็คเกจสัญญาณ TCP ที่เวลา 10 วินาที ในช่วงแรกของการจำลองผล โหนดยังอยู่ห่างไกลกันจึงยังไม่สามารถที่จะเชื่อมต่อกันได้ การเชื่อมต่อเริ่มที่เวลา 100 วินาที โหนดจึงเข้ามาอยู่ใกล้กันมากพอที่จะเชื่อมต่อกันได้โดยตรง ผลการจำลองเป็นดังรูปที่ 2.16 แสดงขนาดวินโดว์ของ TCP และเริ่มส่งแพ็คเกจสัญญาณ TCP ที่เวลา 10 วินาที ในรูปที่ 2.17 แสดงขนาดวินโดว์ของ TCP และเริ่มส่งแพ็คเกจสัญญาณ TCP ที่เวลา 12 วินาที ซึ่งจะแตกต่างกันคือเมื่อให้เริ่มส่งที่เวลา 12 วินาที โหนดอยู่ในช่วงที่สามารถเชื่อมต่อกันได้แล้วจึงค่อยส่ง ทำให้มีการส่งโดยผ่านอีกโหนดหนึ่งก่อนจากนั้นที่เวลา 66 วินาที เมื่อโหนดอยู่ใกล้กันมากพอที่จะส่งแพ็คเกจกันตัวเองแล้วจึงมีการเชื่อมต่อโดยตรงแทน ซึ่งขณะที่มีการเปลี่ยนเส้นทาง แพ็คเกจเกิดการสูญหายขึ้นจึงทำให้วินโดว์ลดลง



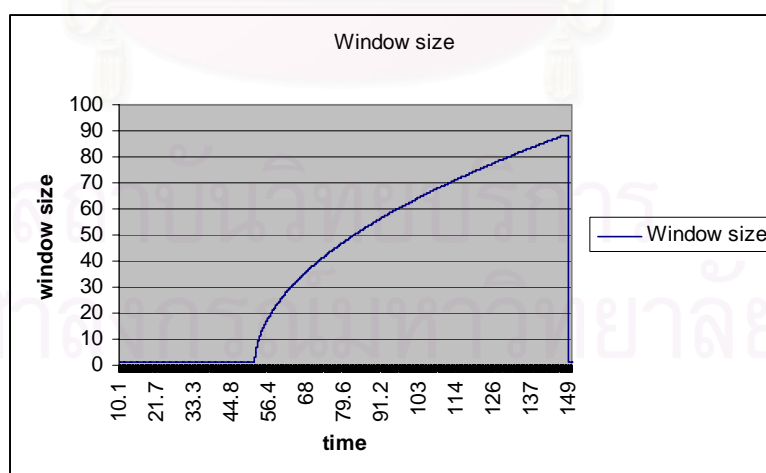
รูปที่ 2.16 ขนาดวินโดว์ของ TCP โดยใช้โปรโตคอล DSDV และเริ่มส่งแพ็คเกจสัญญาณ TCP ที่เวลา 10 วินาที



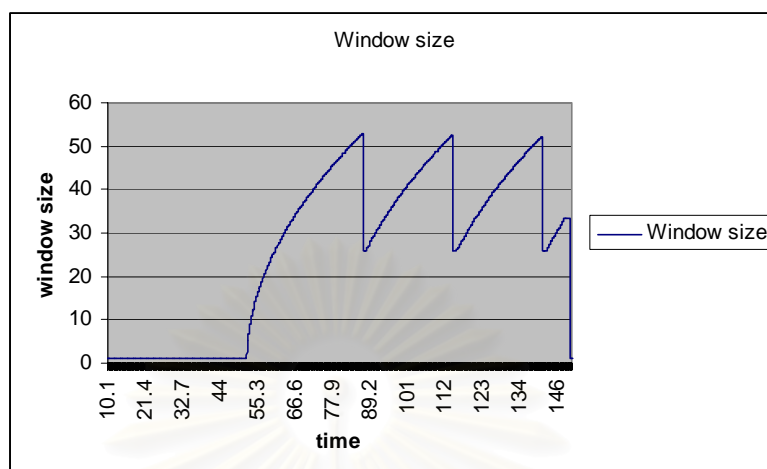
รูปที่ 2.17 ขนาดวินโดว์ของ TCP โดยใช้โปรโตคอล DSDV และเริ่มส่งแพ็คเก็ตสัญญาณ TCP ที่เวลา 12 วินาที

2.7.2 TCP บน AODV

เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนเส้นทางเกิดขึ้นจึงไม่มีการสูญเสียจากการเปลี่ยนเส้นทางขึ้น แต่ขนาดวินโดว์น้อยกว่า DSR เนื่องจากมี round trip time มากกว่าจึงมีการส่งข้อมูลได้น้อยกว่า



รูปที่ 2.18 ขนาดวินโดว์ของ TCP โดยใช้โปรโตคอล AODV



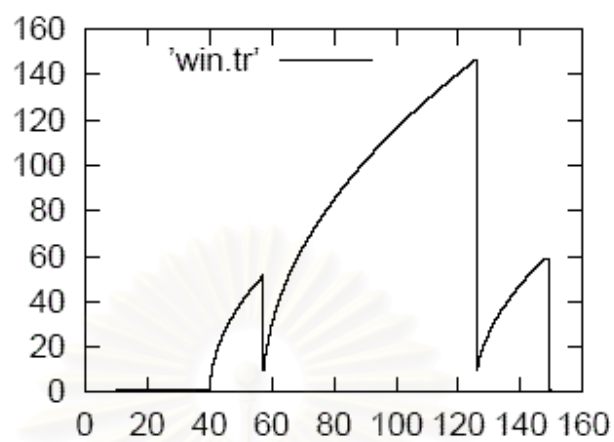
รูปที่ 2.19 ขนาดวินโดว์ของ TCP โดยใช้โปรโตคอล AODV และให้มีค่าวินโดว์มากที่สุดจำนวนมากๆ

การสูญเสียเกิดจากการที่โนดอยู่ห่างกันมากๆ หรือเกิดการเปลี่ยนเส้นทางเกิดขึ้น และเกิดจากบัฟเฟอร์เต็ม ดังนั้น เมื่อให้มีค่าวินโดว์มากๆ จะทำให้เกิดการสูญเสียจากบัฟเฟอร์เต็มได้ดังแสดงในรูปที่ 2.19

2.7.3 TCP บน DSR

การจำลองผลแบ่งได้เป็น 5 ช่วง ช่วงแรกและช่วงสุดท้ายโนดอยู่ห่างไกลกันจึงยังไม่มี การเชื่อมต่อ ช่วงที่ 2 และ 4 จะมีการเชื่อมต่อโดยผ่านโนดอื่น ส่วนช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่โนดต้นทางและปลายทางเชื่อมต่อกันโดยตรง เมื่อเปรียบเทียบกับ DSDV แล้วจะเห็นได้ว่า DSDV ไม่สามารถมีช่วงที่ 4 ได้การเชื่อมต่อจึงสิ้นสุดลงก่อน จำนวนแพ็คเกจ TCP ทั้งหมดจึงน้อยกว่า DSR มาก

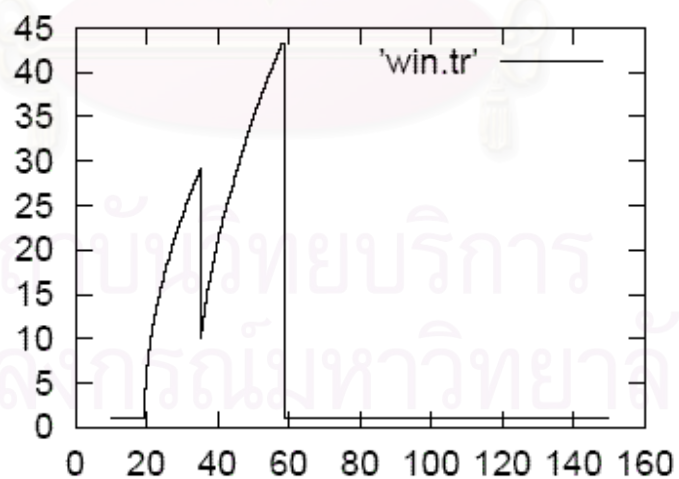
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.20 ขนาดวินโดว์ของ TCP โดยใช้โปรโตคอล DSR

2.7.4 TCP บน TORA

ผลการจำลองการใช้ TORA เป็นดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ขนาดวินโดว์ของ TCP โดยใช้โปรโตคอล TORA

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 อัลกอริทึมการจัดเส้นทางของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

อัลกอริทึมในการจัดเส้นทางจะสร้างเส้นทางต่างๆ กัน ดาวเทียมจะประมวลผลแพ็คเกจอย่างอิสระเพื่อรับรองว่าแพ็คเกจจะส่งต่อไปบนเส้นทางที่มีการประวิงเวลาที่น้อยที่สุด การหาโนดถัดไปของเส้นทางแบ่งได้เป็น 2 ช่วง [15, 16] คือ

3.1.1 การหาทิศทางการส่งต่อข้อมูล

ในส่วนนี้ ใช้เพื่อหาโนดที่จะส่งต่อข้อมูลไป ในการเลือกโนดถัดไปนั้น โนดจะต้องหาศักยภาพของโนดต่างๆ รอบตัวมัน และตัดสินใจเลือกโนดที่ดีที่สุดแล้วส่งข้อมูลไปยังโนดนั้น ซึ่งกระบวนการหาเส้นทางนี้ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น นอกจากนี้แล้วยังได้กำหนดทิศทางในการส่ง โดยจะมีการเก็บข้อมูลและจัดอันดับไว้ว่าเส้นทางใดจะส่งไปได้ดีที่สุด และเส้นทางใดที่ส่งข้อมูลได้ตรงๆ ลงมา

3.1.2 การเลียงเส้นทางที่คับคั่ง

ใช้เพื่อลดผลกระทบจากการเกิดความคับคั่งบนการเชื่อมโยง ในกรณีที่การเชื่อมโยงเกิดความคับคั่งจะทำให้เกิดเวลาประวิงในการจัดคิว (queueing delay) ซึ่งมีผลกระทบต่อเวลาจากต้นทางไปปลายทาง (end-to-end delay) ของแพ็คเกจอย่างมาก และจะทำให้แพ็คเกจที่ส่งต่อไปบนเส้นทางมีการประวิงเวลามาก

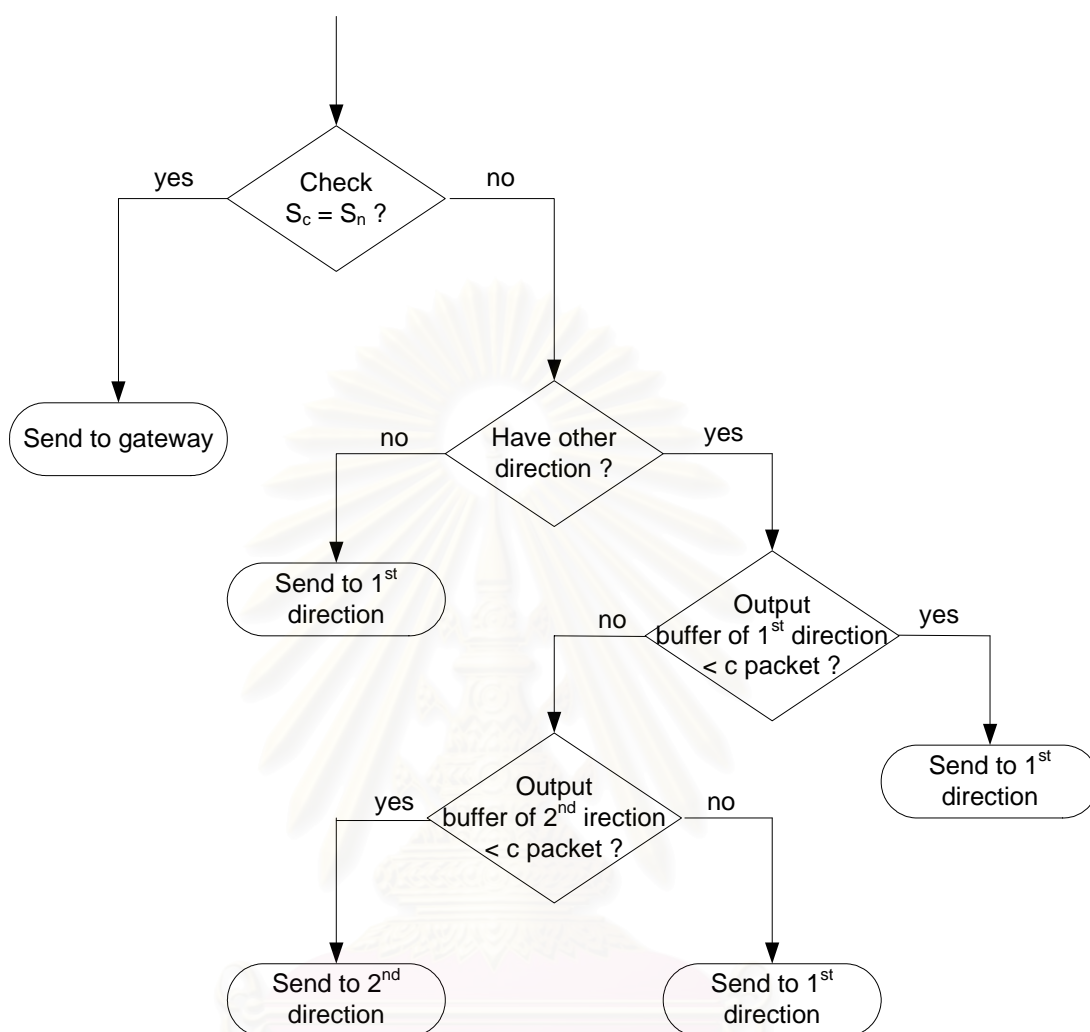
ในการเลือกเส้นทางจะทำในส่วนแรกซึ่งขึ้นกับการหาเวลาประวิงการแพร่กระจาย ดังนั้น จะไม่ได้พิจารณาการเกิดความคับคั่ง ถ้าแพ็คเกจส่งต่อไปโดยไม่ได้คำนึงถึงความคับคั่งในโครงข่ายแล้ว อาจส่งผลให้เกิดการประวิงเวลาจากต้นทางไปปลายทางมากได้ ในส่วนนี้จะเอาเส้นทางที่เลือกไปในส่วนแรกมาพิจารณาใหม่ โดยดูจากระดับของความคับคั่งที่เกิดขึ้นในการเชื่อมโยง

เนื่องจากไม่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกราฟฟิกกันระหว่างดาวเทียม จึงจะพิจารณาระดับความคับคั่งในการเชื่อมโยงได้จากบัฟเฟอร์ทางด้านออก (output buffer) ถ้าโนดถัดไปมีแพ็คเกจที่บัฟเฟอร์

ทางด้านออกจำนวนมากเกินกว่า c แพ็คเกต จะแสดงว่าเกิดความคับคั่งขึ้น หลักการในส่วนนี้คือ ให้ส่งแพ็คเกตไปในทิศทางที่สอง ถ้าในทิศทางแรกที่จะส่งเกิดความคับคั่งขึ้น ซึ่งจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ถ้า $S_c = S_n$ นั่นคือดาวเทียมดวงปัจจุบันเป็นปลายทาง แพ็คเกตจะไม่ส่งต่อไปดาวเทียมข้างเคียง แต่มันจะส่งต่อไปยังเกตเวย์หรือเครื่องรับบนพื้นโลก
2. ถ้าแพ็คเกตไม่มีทิศทางที่สองแล้ว แพ็คเกตจะส่งไปในทิศทางแรกโดยไม่ต้องดูจำนวนแพ็คเกตในบัฟเฟอร์ทางด้านออก
3. ถ้าแพ็คเกตในบัฟเฟอร์ทางด้านออก ของทิศทางแรกมีน้อยกว่า c แพ็คเกตแล้วก็จะส่งไปในทิศทางแรก
4. ถ้าแพ็คเกตในบัฟเฟอร์ทางด้านออก ของทิศทางแรกมีมากกว่า c แพ็คเกตและ แพ็คเกตในบัฟเฟอร์ทางด้านออก ของทิศทางที่สองมีน้อยกว่า c แพ็คเกตแล้วแพ็คเกตจะถูกส่งไปในทิศทางที่สอง แต่ถ้าแพ็คเกตในบัฟเฟอร์ทางด้านออก ของทั้ง 2 ทางมีมากกว่า c แพ็คเกต แพ็คเกตก็จะถูกส่งไปในทิศทางแรก

ผลที่ได้จากส่วนนี้คือ แพ็คเกตจะถูกส่งไปบนเส้นทางที่มีการประวิงเวลาน้อยที่สุด ซึ่งขั้นตอนการทำงานในส่วนนี้สามารถนำมาเขียนเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.1 และในการที่จะแน่ใจได้ว่าในการหาเส้นทางนี้ไม่เป็น loop-free ก็คือแพ็คเกตจะไม่ส่งกลับไปยังดาวเทียมที่ส่งมันมา

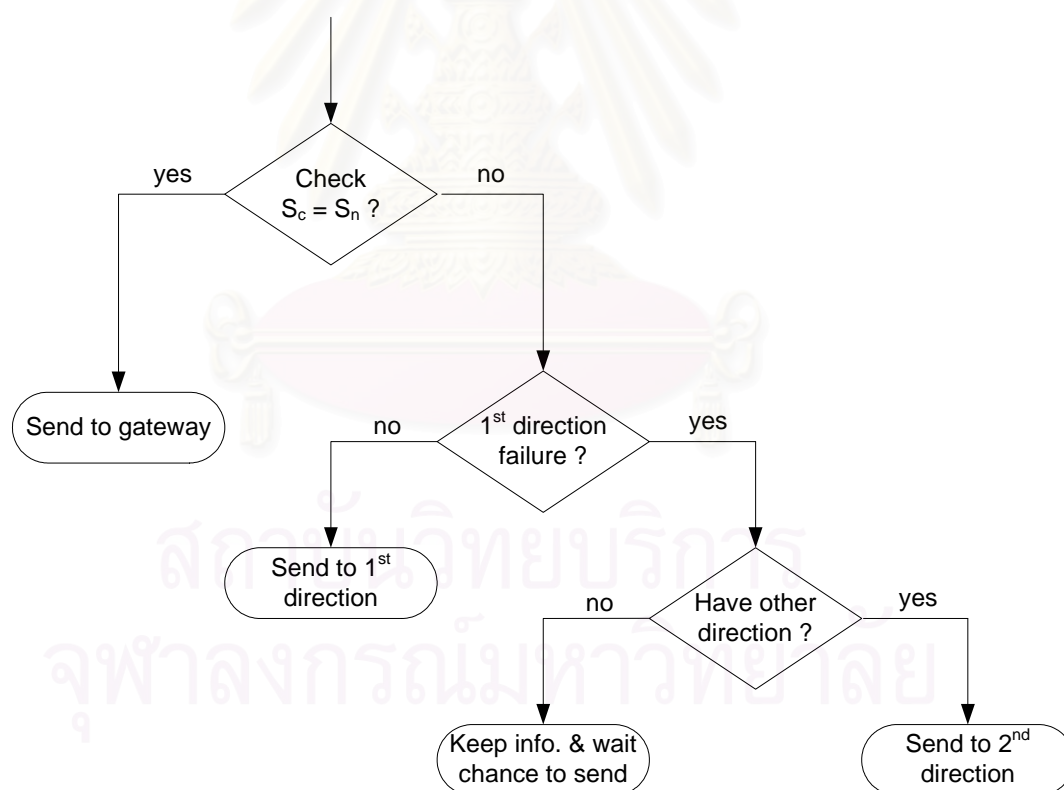


รูปที่ 3.1 การทำงานของการเลียงเส้นทางที่คับคั่ง

การคำนวณหาโนดถัดไปใน 2 ส่วนนี้ใช้สำหรับโครงข่ายที่ดาวเทียมไม่มีการล้มเหลว ในกรณีที่ดาวเทียมเกิดการใช้ไม่ได้หรือล้มเหลวขึ้นนั้นจะต้องเปลี่ยนแปลงขั้นตอนที่กล่าวไว้ โดยจะต้องเบี่ยงแพ็คเกตที่ผ่านดาวเทียมนั้นแทนที่จะละเลยมันไป หรือจะต้องจัดหาเส้นทางอีกครั้ง (reroute) นั่นเอง ในกรณีนี้สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอย่างแรกก็คือ ต้องไม่ทิ้งแพ็คเกตนั้นไป แทนการลดเวลาประวัณการจัดคิว ในการจัดหาเส้นทางอีกครั้ง จะส่งแพ็คเกตไปในทิศทางที่ 2 เมื่อดาวเทียมเกิดล้มเหลวขึ้น ในส่วนของการเลียงเส้นทางที่คับคั่งจะมีโครงสร้างดังนี้

1. ถ้า $S_c = S_n$ นั่นคือดาวเทียมดวงปัจจุบันเป็นปลายทาง ปลายทาง แพ็คเกตจะไม่ส่งต่อไปดาวเทียมข้างเคียง มันจะส่งต่อไปยังเกตเวย์หรือเครื่องรับบนพื้นโลก
2. ถ้าดาวเทียมในทิศทางแรกไม่ล้มเหลวก็จะส่งแพ็คเกตไปในทิศทางนั้น
3. ถ้าดาวเทียมในทิศทางแรกล้มเหลวและมีทิศทางที่สองให้ส่งต่อไปได้ ก็จะถูกส่งต่อไปในทิศทางที่สอง
4. ถ้าดาวเทียมในทิศทางแรกล้มเหลวและไม่มีทิศทางที่สองให้ส่งต่อไปได้ มันจะเก็บข้อมูลไว้เพื่อรอเวลาที่ส่งข้อมูลได้ต่อไป

วิธีการค้นหาเส้นทางอีกครั้งนี้ ทำให้สามารถหาเส้นทางอื่นได้สำหรับการเกิดการล้มเหลวของดาวเทียม แต่มันก็ไม่สามารถที่จะรับประกันได้ว่าเส้นทางที่ได้นั้นจะเป็นเส้นทางที่ดีที่สุด ซึ่งขั้นตอนการทำงานส่วนนี้ในการค้นหาเส้นทางอีกครั้ง สามารถนำมาเขียนเป็นไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 3.2

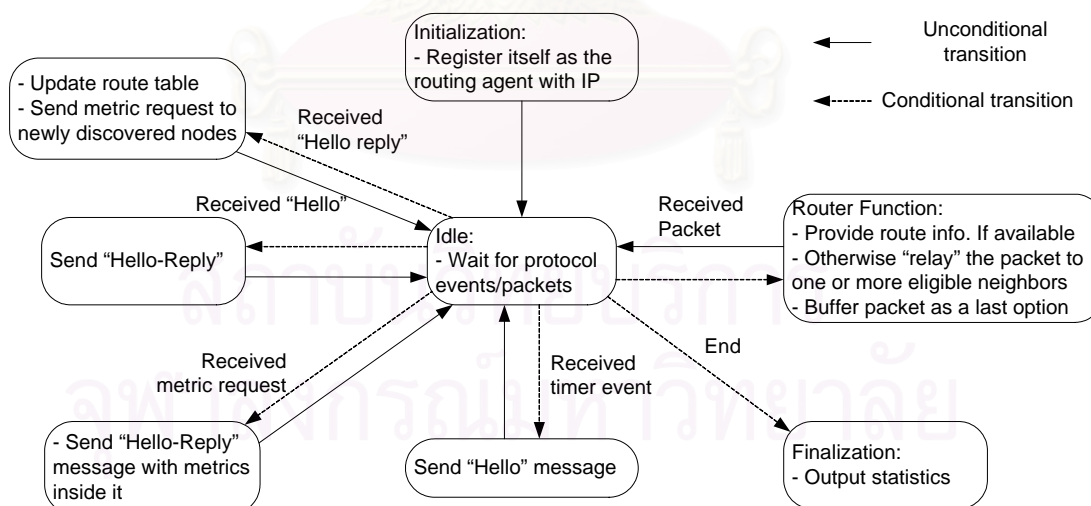


รูปที่ 3.2 การทำงานของการค้นหาเส้นทางอีกครั้ง

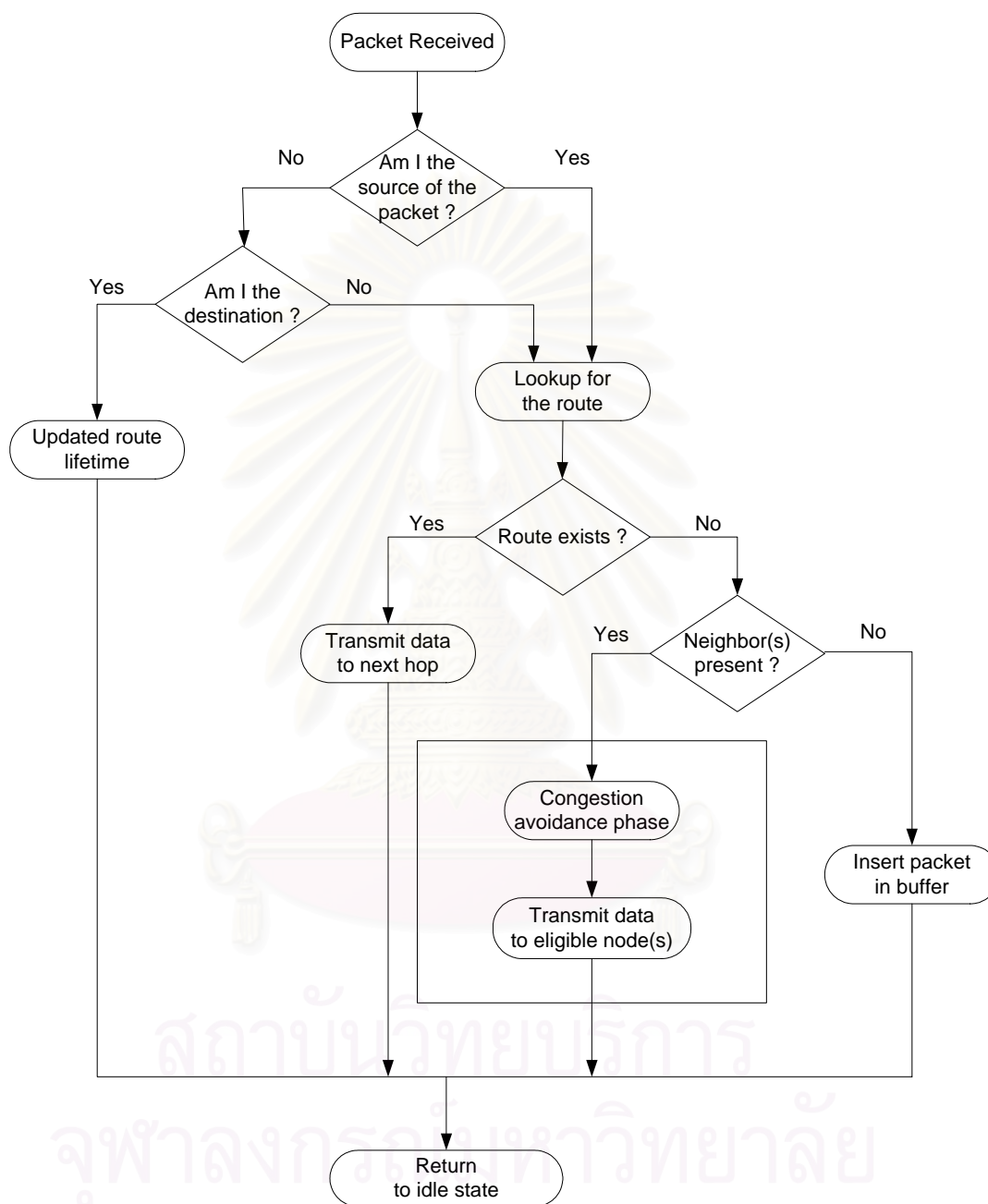
การตัดสินใจที่ทำไปในส่วนก่อนหน้านี้แล้วได้ถูกปรับปรุงใหม่ในส่วนของกรหลักเลี่ยงการเกิดความคับคั่ง ดังนั้น เมื่อพบการเชื่อมโยงที่คับคั่งแล้ว ดาวเทียมที่พบจะส่งแพ็คเกจไปบนการเชื่อมโยงอื่นๆ เมื่อจำนวนแพ็คเกจบนบัพเฟอร์ทางด้านออก ได้เกินกว่าที่กำหนดไว้จำนวน c มันบอกได้ว่ามีความคับคั่งบนการเชื่อมโยงส่วนนั้น ถ้าการเชื่อมโยงในส่วนทิศทางแรกๆ เกิดความคับคั่งขึ้น แพ็คเกจจะถูกส่งไปบนทิศทางที่ 2 เช่นเดียวกันกับการเกิดดาวเทียมล่ม แพ็คเกจที่ส่งไปที่ดาวเทียมนั้นจะถูกส่งไปยังทิศทางที่ 2 ซึ่งถ้าทิศทางที่ 2 ใช้ไม่ได้ แพ็คเกจจะยังคงอยู่ในทิศทางแรก ในทั้ง 2 กรณีนี้ถ้าแพ็คเกจไม่มีทิศทางที่ 2 ที่จะส่งไปได้ แพ็คเกจจะเก็บข้อมูลไว้เพื่อรอเวลาที่ส่งข้อมูลได้ต่อไป

3.2 แบบจำลองโปรโตคอลของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

กลไกตัวกระทำการจัดเส้นทางแสดงในรูปที่ 3.3 และหน้าที่ของการหาเส้นทางแสดงในรูปที่ 3.4 โหนด A กระจาย hello message เป็นช่วงๆ เพื่อที่จะหาโนดข้างเคียงและปรับปรุงข้อมูลสถานะของโนดข้างเคียง เมื่อได้รับการตอบรับกลับมา โหนด A จะส่งข่าวสารการสอบถามเมตริกซ์ (metric request message) ไปยังโนดข้างเคียงและรอเมตริกซ์ข้อมูลที่ตอบกลับมา เมื่อโหนด A ได้รับเมตริกซ์แล้วจะเปรียบเทียบข้อมูลของโนดข้างเคียงกัน และตัดสินใจเลือกเส้นทาง



รูปที่ 3.3 การทำงานของตัวกระทำการจัดเส้นทาง

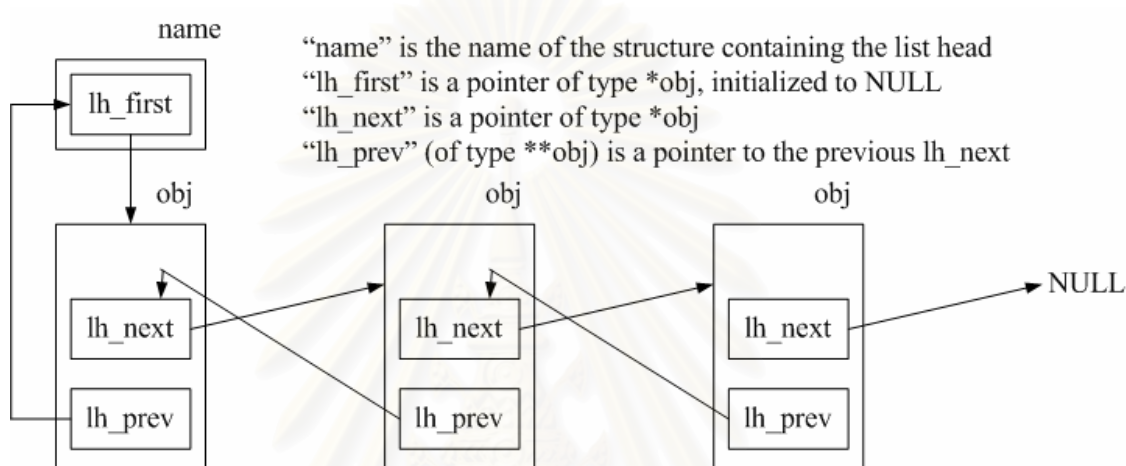


รูปที่ 3.4 อัลกอริทึมของเราเตอร์

3.3 การนำ NS-2 มาใช้ในการจำลองผล

3.3.1 การใช้ linked list

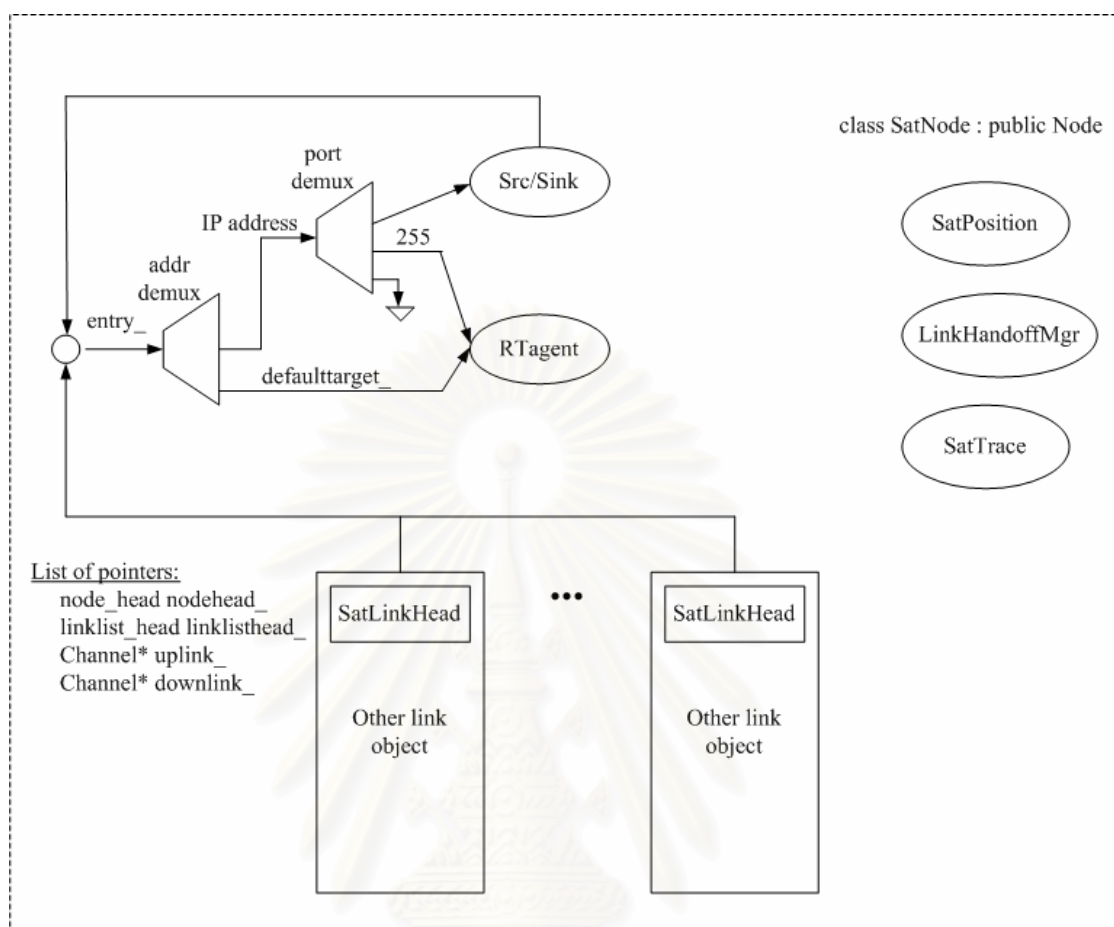
มีการนำ linked list มาประยุกต์ใช้อย่างมากในการปรับการจำลอง การใช้ linked list ใน NS-2 แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การนำ linked list มาใช้ใน NS-2

3.3.2 โครงสร้างโนด

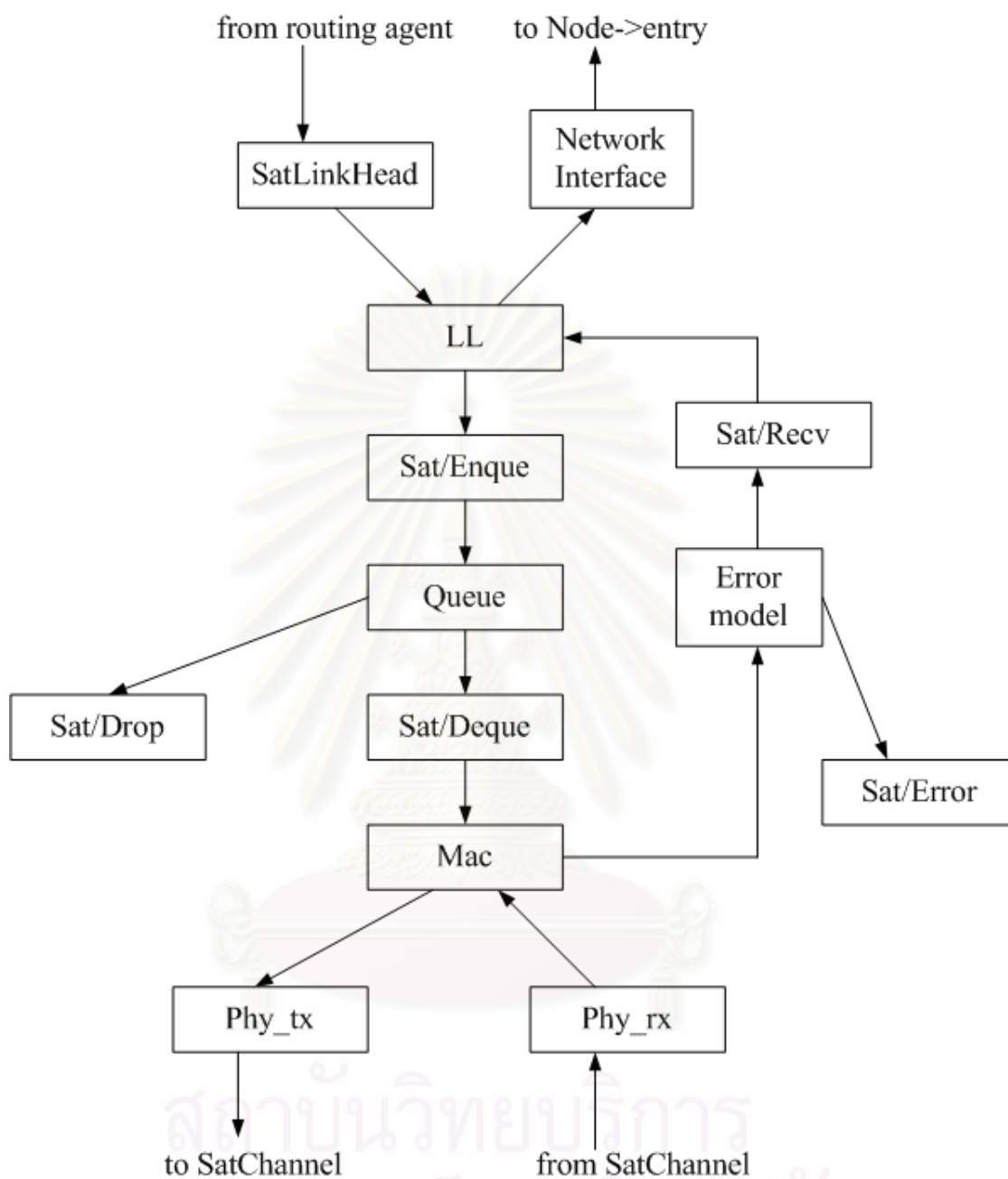
ส่วนประกอบของโครงสร้างโนดดาวเทียมใน NS-2 (SatNode) แสดงในรูปที่ 3.6 SatNode มีรายการ (entry) ซึ่งไปยังตัวแยกประเภท (classifier) ต่างๆ ตัวแยกประเภทที่อยู่ (address classifier) ประกอบด้วยตารางสล็อต (slot table) สำหรับส่งต่อแพ็คเก็ตไปยังโนดอื่น แพ็คเก็ตที่โนดมีจุดหมายเป็นพอร์ต 255 จะเป็นแพ็คเก็ตการจัดเส้นทางและจะถูกส่งไปยังตัวกระทำการจัดเส้นทาง



รูปที่ 3.6 โครงสร้างของโหนดดาวเทียม

3.3.3 รายละเอียดของการเชื่อมโยงดาวเทียม

รูปที่ 3.7 แสดงรายละเอียดของการเชื่อมโยงดาวเทียม จุดที่จะเข้าสู่การเก็บข้อมูลของโครงข่ายคือ SatLinkHead ซึ่งประกอบด้วยตัวชี้ไปยัง Link Layer (LL), Queue, MAC, Error Model และ Physical Layer (Phy)



รูปที่ 3.7 รายละเอียดของโครงสร้างการเก็บข้อมูลอินเตอร์เฟซของโครงข่าย

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้กำหนดสภาพการจำลอง โดยกำหนดให้ดาวเทียม GEO อยู่ในตำแหน่งลองจิจูดที่ 90, -30 และ -150 องศา และกำหนดให้ดาวเทียม LEO เป็นระบบ Teledesic [2, 5] โดยมีค่าพารามิเตอร์ของดาวเทียม LEO แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ขององค์ประกอบของระบบดาวเทียม LEO

พารามิเตอร์	
ความสูง	1350 กิโลเมตร
จำนวนดาวเทียม	288
จำนวนระนาบวงโคจร	12
มุมความเอียง	86.9°
มุมเงย (Elevation Angle) ที่น้อยที่สุด	40°
อัตราบิต ISL	155 Mbps
อัตราบิตจากภาคพื้นดินไปยังดาวเทียม	1.5 Mbps

ในการจำลองผลนี้ ได้ทดสอบระบบที่ดาวเทียมมีการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลางมาเปรียบเทียบกับการจัดสรรเส้นทางแบบที่นำเสนอ โดยมีพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกัน จึงทำให้เห็นถึงประโยชน์ของการใช้การจัดเส้นทางแบบแอดฮอก

การจำลองระบบในวิทยานิพนธ์นี้ ได้นำตัวจำลอง NS-2 มาใช้ เนื่องจากตัวจำลอง NS-2 เป็นเครื่องมือตัวจำลองโครงข่าย (network simulator tool) ที่มีคุณลักษณะเด่นอยู่ในตัว นั่นคือ มีฟังก์ชันการทำงานพื้นฐานในการจำลองระบบอยู่ในตัวอยู่แล้ว สามารถที่จะจำลองระบบการสื่อสารดาวเทียมได้ แต่ NS-2 มีการจัดเส้นทางสำหรับการสื่อสารดาวเทียมเพียงแค่แบบเดียวเท่านั้น คือการจัดเส้นทางแบบศูนย์กลาง จึงต้องมีการปรับ NS-2 เพื่อให้สามารถจำลองการจัดเส้นทางแบบแอดฮอกบนการสื่อสารดาวเทียมได้

ในการปรับ NS-2 นี้ ได้มีการเพิ่มฟังก์ชันให้รู้ว่าเมื่อไรที่ดาวเทียม LEO และ GEO สามารถมองเห็นกันได้ด้วย และยังมีฟังก์ชันที่ทำให้การเชื่อมโยง ISL ระหว่างดาวเทียม LEO และ GEO ทำงาน และยังมีฟังก์ชันการจัดเส้นทางแบบแอดฮอก และสุดท้ายคือ Unslotted ALOHA ใน NS-2 ปรับให้รองรับ Slotted ALOHA สำหรับโปรโตคอลการควบคุมการเข้าถึงแบบหลากหลาย (medium access control protocol) ได้ เนื่องจาก Slotted ALOHA สามารถเพิ่มความสามารถของ Unslotted ALOHA ได้ [8] ใน Slotted ALOHA นี้ ผู้ส่งจะต้องรอจนกว่าจะถึงช่วงเริ่มต้นของสล็อตเวลา (time slot) ต่อไปจึงจะส่งได้ ทำให้ลดการชนกันของข้อมูลได้ ดังนั้น ประสิทธิภาพจึงเพิ่มขึ้น

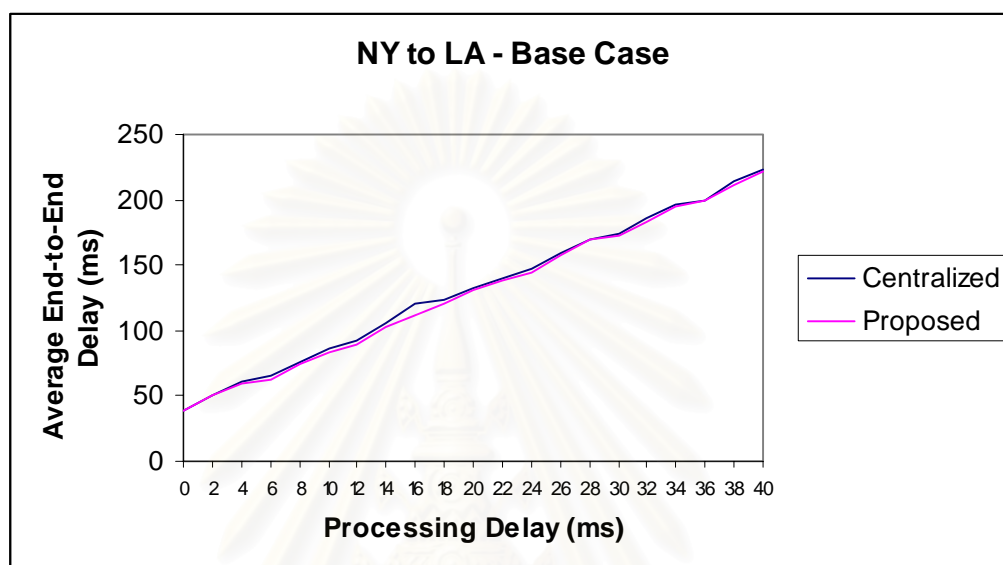
ในการจำลองนี้ได้กำหนดให้ Slotted ALOHA มี timeout เป็น 12 มิลลิวินาที นั่นคือถ้าโนดส่งไปและยังไม่ได้รับการตอบรับในการส่งภายใน 12 มิลลิวินาที โหนดจะคาดเดาว่าเกิดการชนกันของข้อมูลขึ้น และจะทำการส่งข้อมูลใหม่ การที่กำหนดให้เป็น 12 มิลลิวินาทีนั้นเพราะว่าใช้เวลาจากสถานีพื้นดินไปยังดาวเทียม และจากดาวเทียมไปยังสถานีพื้นดินประมาณอย่างละ 6 มิลลิวินาที และกำหนดให้ค่าจำกัดในการส่งอีกครั้ง (retransmission limit) เป็น 8 มีความยาวสล็อต (slot length) เป็น 3 มิลลิวินาที เวลาในการส่งแพ็คเกจขนาด 512 ไบต์ด้วยอัตราบิตเรต 1.5 Mb เป็น 2.7 มิลลิวินาที ทำให้เหลือการ์ดแบนด์ (guard band) 0.3 มิลลิวินาที

ในการจำลองผลได้แบ่งการส่งออกเป็น 4 แบบคือ การส่งโดยให้จูดรับส่งอยู่ในทวีปเดียวกัน การส่งโดยให้มีจูดรับส่งอยู่ต่างทวีปกันแต่อยู่ในซีกโลกเหนือเหมือนกัน การส่งโดยให้จูดรับส่งอยู่ต่างทวีปกันและอยู่คนละซีกโลก และการส่งโดยให้จูดรับส่งอยู่ตามที่ต่างๆ ทั่วโลก นอกจากนี้ในการจำลองการรับส่งนั้น ได้แบ่งออกเป็น 3 กรณี คือให้มีทราฟฟิกต่างกันเป็น น้อย ปานกลาง และมาก โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการวิเคราะห์การประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยและค่าวิสัยสามารถ

4.1 การส่งโดยให้จูดรับส่งอยู่ในทวีปเดียวกัน

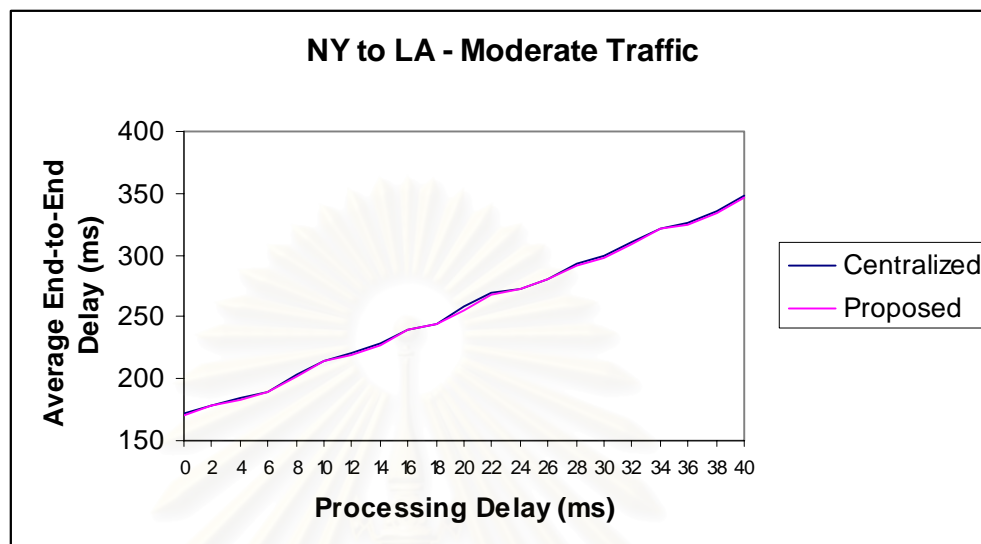
ในการจำลองนี้ได้กำหนดให้โนดที่ส่งข้อมูลอยู่ที่นิวยอร์ก และให้โนดที่รับข้อมูลอยู่ที่ลอสแอนเจลิส ดังที่ได้กล่าวไปแล้วว่าจะให้มีทราฟฟิกต่างกัน ในกรณีแรกคือ มีทราฟฟิกน้อยนั้น จะมีคู่โนดที่ใช้รับส่งข้อมูลเพียงคู่เดียว ซึ่งในกรณีนี้โนดจะส่งข้อมูลได้โดยไม่ต้องมีความเสี่ยงที่ข้อมูลจะเกิดการชนกัน ซึ่งจะทำให้สามารถส่งเกตระบบได้โดยไม่ต้องมีผลจากโปรโตคอลการควบคุมการเข้าถึงแบบหลากหลาย กรณีที่สองคือ มีทราฟฟิกปานกลาง ได้กำหนดให้มีคู่โนดในการรับส่งข้อมูล 10 คู่ กรณีสุดท้ายคือ มีทราฟฟิกมาก ในกรณีนี้ได้กำหนดให้มีคู่โนดในการรับส่งข้อมูล 100 คู่ ในการจำลองนี้ได้

กำหนดให้มีขนาดแพ็คเกจเป็น 512 ไบต์และแพ็คเกจจะส่งทุกๆ 30 วินาที เป็นเวลา 10 นาที ผลการจำลองในกรณีแรกแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลการจำลองกรณีที่ 1 จากนิวยอร์กไปยังลอสแอนเจลิส

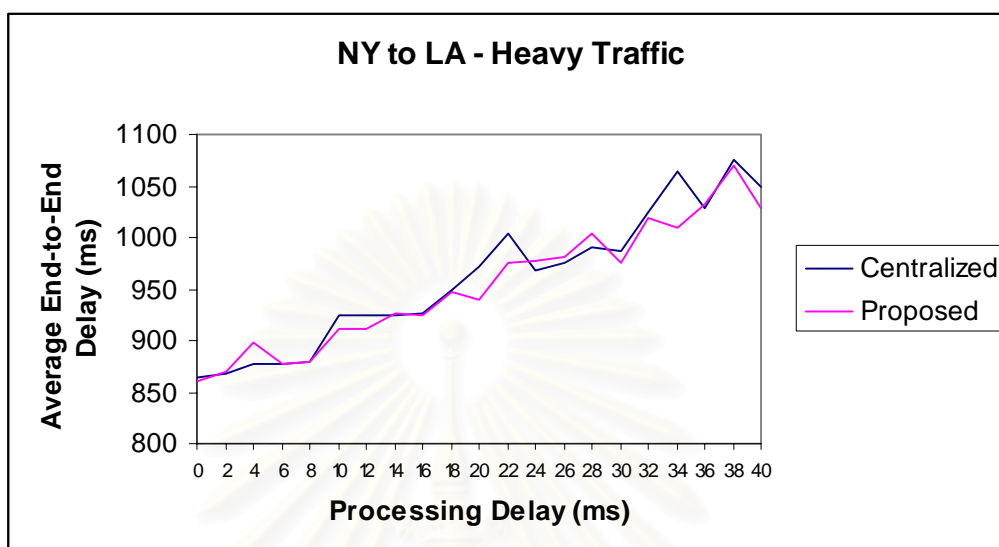
จากผลการจำลองจะสังเกตได้ว่า ค่าการประวิงเวลาของระบบ ที่ใช้การจัดเส้นทางแบบ ศูนย์กลาง จะขนานไปกับแบบที่ได้นำเสนอ อาจเนื่องมาจากการจัดเส้นทางของทั้ง 2 แบบไม่แตกต่างกันมากนัก เพราะระยะทางที่ไม่ห่างไกลมาก ทำให้การคำนวณเส้นทาง การเลือกฮอปไม่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตาม ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้จำลองผลซ้ำอีกครั้ง โดยให้มีคู่โหนดรับส่งเป็น 10 คู่ ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลการจำลองกรณีที่ 2 จากนิวยอร์กไปยังลอสแอนเจลิส

จะเห็นได้อีกครั้งว่า ค่าการประวิงเวลาของระบบที่ใช้การจัดเส้นทางแบบศูนย์กลาง จะขนานไปกับแบบที่ได้นำเสนอ ถึงแม้ว่าทราฟฟิกจะเพิ่มขึ้น แต่ก็ไม่มี ความแตกต่างกัน การจัดเส้นทางแบบที่เสนอไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพของการส่งแบบนี้ดีขึ้น สิ่งที่แตกต่างกันจากการจำลองในกรณีแรกก็คือ มีการประวิงเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ว่า อาจมีผลมาจากจำนวนโหนดบน Slotted ALOHA ในส่วนของโปรโตคอลการควบคุมการเข้าถึงแบบหลากหลาย

การจำลองในกรณีสุดท้าย นั้นคือมีทราฟฟิกจำนวนมาก ได้กำหนดให้มีคู่โน้ดรับส่งเป็น 100 คู่ ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.3

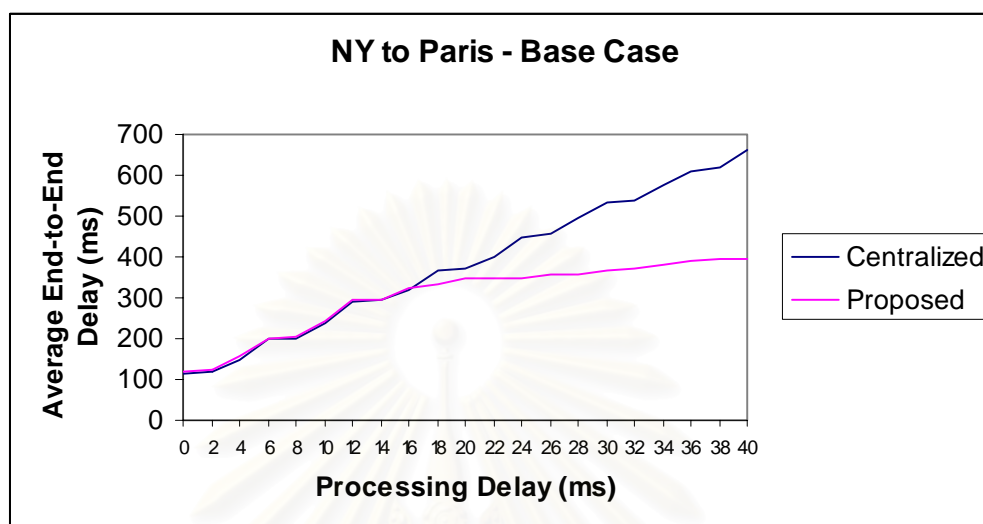


รูปที่ 4.3 ผลการจำลองกรณีที่ 3 จากนิวยอร์กไปยังลอสแอนเจลิส

ในกรณีสุดท้ายนี้ จะเห็นได้ว่าระบบทั้งสองนี้มีความไม่แน่นอน และไม่มีระบบใดที่มีประสิทธิภาพดีกว่ากันอย่างเห็นได้ชัด จึงสามารถสรุปได้ว่าในการส่งแบบนี้ไม่ว่าจะใช้การจัดเส้นทางแบบใดก็ไม่ส่งผลแตกต่างกันมากนัก

4.2 การส่งโดยให้มีจุดรับส่งอยู่ต่างทวีปกันแต่อยู่ในซีกโลกเหนือเหมือนกัน

การจำลองในส่วนนี้ ได้กำหนดให้โหนดที่ส่งข้อมูลอยู่ที่นิวยอร์ก และให้โหนดที่รับข้อมูลอยู่ที่ปารีส เช่นเดียวกันกับการส่งแบบแรกคือ ให้การจำลองแบ่งออกเป็น 3 กรณี นั่นคือ มีทราฟฟิกน้อย ปานกลาง และมาก กรณีที่มีทราฟฟิกน้อย กำหนดให้มีคู่โหนดรับส่ง 1 คู่ กรณีที่มีทราฟฟิกปานกลาง กำหนดให้มีคู่โหนดรับส่ง 10 คู่ และกรณีที่มีทราฟฟิกมาก กำหนดให้มีคู่โหนดรับส่ง 100 คู่ และกำหนดให้มีขนาดแพ็คเกจเป็น 512 ไบต์และแพ็คเกจจะส่งทุกๆ 30 วินาที เป็นเวลา 10 นาที ในการจำลองแต่ละครั้งได้เปรียบเทียบระบบที่ดาวเทียมมีการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง กับการจัดสรรเส้นทางแบบที่นำเสนอ การจำลองผลในกรณีแรกแสดงในรูปที่ 4.4

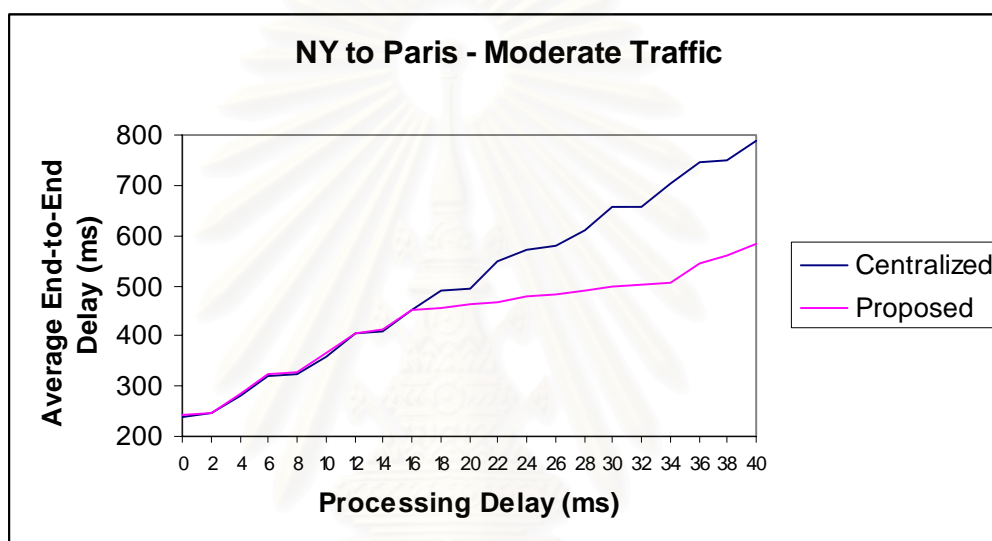


รูปที่ 4.4 ผลการจำลองกรณีที่ 1 จากนิวยอร์กไปยังปารีส

จากการจำลองในการส่งแบบนี้จะเห็นความแตกต่างได้ชัดเจน ระหว่างประสิทธิภาพของการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และแบบแอดฮอกที่ได้นำเสนอ ระบบการสื่อสารดาวเทียมที่ใช้การจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง มีการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่ระบบที่ใช้การจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอกที่ได้นำเสนอ มีการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น จนกระทั่งการประวิงเวลาแบบประมวลผลมีค่า 18 มิลลิวินาที ระบบที่ใช้การจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอกจะมีประสิทธิภาพที่ต่ำกว่า ที่ 18 มิลลิวินาที เมื่อใช้การจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง จะมีการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยเป็น 366 มิลลิวินาที ในขณะที่เมื่อใช้การจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอกจะมีการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยเป็น 331 มิลลิวินาที จากการที่มีการแลกเปลี่ยนข้อมูลของโนดถัดไปและโนดข้างเคียงเข้ามาช่วย ทำให้การเลือกเส้นทางเป็นไปอย่างรวดเร็วและแม่นยำมากขึ้น ทำให้การประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยลดลง 10% หรือ 35 มิลลิวินาที เมื่อการประวิงเวลาแบบประมวลผลเพิ่มเป็น 26 มิลลิวินาที ค่าการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยของการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก จะเป็น 456 และ 357 มิลลิวินาที ตามลำดับ นั่นคือจะลดลง 22% หรือ 99 มิลลิวินาที เมื่อการประวิงเวลาแบบประมวลผลเป็น 34 มิลลิวินาที ค่าการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยของการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก จะเป็น 577 และ 379 มิลลิวินาที ตามลำดับ นั่นคือจะลดลง 34% หรือ 198 มิลลิวินาที และเมื่อการประวิงเวลาแบบประมวลผลเพิ่มเป็น 40 มิลลิวินาที ค่าการ

ประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยของการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอคซอก จะเป็น 662 และ 397 มิลลิวินาที ตามลำดับ นั่นคือจะลดลง 40% หรือ 265 มิลลิวินาที ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพแตกต่างกันมาก

การจำลองในส่วนต่อไปเป็นการจำลองโดยให้มีคู่โหนดรับส่งเป็น 10 คู่ ผลการจำลองแสดงใน รูปที่ 4.5

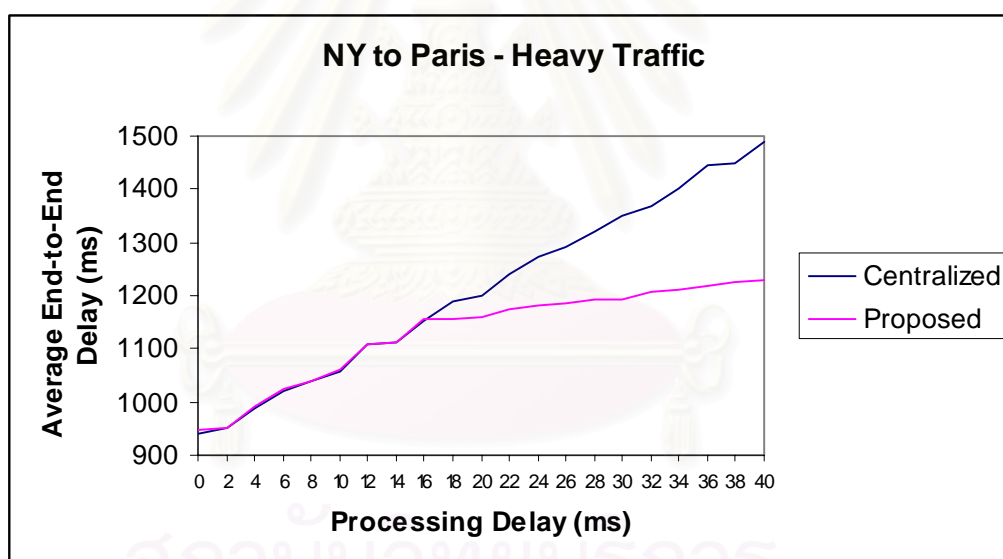


รูปที่ 4.5 ผลการจำลองกรณีที่ 2 จากนิวยอร์กไปยังปารีส

เช่นเดียวกันกับการจำลองการส่งจากนิวยอร์กไปยังลอสแอนเจลิส เมื่อเพิ่มโหนดจะพบว่า การประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่า อาจมีผลมาจากจำนวนโหนดบน Slotted ALOHA ในส่วนของโปรโตคอลการควบคุมการเข้าถึงแบบหลากหลาย และการจำลองในกรณีที่ 2 นี้ มีการประวิงเวลาลักษณะเดียวกันกับกรณีแรก นั่นคือ การจัดสรรเส้นทางแบบแอคซอกที่ได้นำเสนอ มีการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น จนกระทั่งการประวิงเวลาแบบประมวลผลมีค่า 18 มิลลิวินาที ระบบที่ใช้การจัดสรรเส้นทางแบบแอคซอกจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า โดยมีการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยเป็น 490 และ 456 มิลลิวินาที สำหรับการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอคซอกตามลำดับ ซึ่งค่าการประวิงเวลาลดลง 34 มิลลิวินาที มีค่าการลดลงใกล้เคียงกับกรณีแรก คือลดลง 35 มิลลิวินาที แต่เมื่อนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จะลดลงเพียง 7% ทั้งนี้เนื่องจากมีค่าการประวิงเวลาสูงกว่าในกรณีแรก และเมื่อการประวิงเวลาแบบประมวลผลเพิ่มเป็น 26 มิลลิวินาที ค่าการประวิงเวลา

รวมโดยเฉลี่ยของการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก จะเป็น 581 และ 481 มิลลิวินาที ตามลำดับ นั่นคือจะลดลง 17% หรือ 100 มิลลิวินาที และเมื่อการประวิงเวลาแบบประมวลผลเพิ่มเป็น 34 มิลลิวินาที ค่าการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยของการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก จะเป็น 702 และ 504 มิลลิวินาที ตามลำดับ นั่นคือจะลดลง 198 มิลลิวินาทีหรือ 28% และสุดท้ายนี้เมื่อการประวิงเวลาแบบประมวลผลเพิ่มเป็น 40 มิลลิวินาที ค่าการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยของการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก จะเป็น 787 และ 582 มิลลิวินาที ตามลำดับ นั่นคือจะลดลง 265 มิลลิวินาที นั่นคือ 34%

การจำลองในส่วนต่อไปเป็นการจำลองโดยให้มีคิวโนดรับส่งเป็น 100 คู่ ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลการจำลองกรณีที่ 3 จากนิวยอร์กไปยังปารีส

ในกรณีสุดท้ายนี้การประวิงเวลารวมก็ยังเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มโหนดมากขึ้น เนื่องจากผลของการใช้ Slotted ALOHA นั่นเอง และในการจำลองผลในกรณีที่ 3 นี้ ก็มีการประวิงเวลาลักษณะเดียวกับในกรณีแรก และกรณีที่ 2 อีกครั้ง คือ การจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอกที่ได้นำเสนอ มีการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยเพิ่มขึ้น จนกระทั่งการประวิงเวลาแบบประมวลผลมีค่า 18 มิลลิวินาที ระบบที่ใช้การจัดสรร

เส้นทางแบบแอดฮอกจะมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า คือมีการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยเป็น 1190 และ 1157 มิลลิวินาทีสำหรับการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอกตามลำดับ จะเห็นได้ว่ามีค่าลดลง 33 มิลลิวินาที หรือ 3% ซึ่งการที่มีค่าเปอร์เซ็นต์การลดลงน้อยกว่าเนื่องมาจากมีค่าการประวิงเวลามากกว่านั่นเอง และเมื่อการประวิงเวลาแบบประมวลผลเพิ่มเป็น 26 มิลลิวินาที ค่าการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยของการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก จะเป็น 1290 และ 1186 มิลลิวินาที ตามลำดับ นั่นคือจะลดลง 8% หรือ 104 มิลลิวินาที ซึ่งเปอร์เซ็นต์การลดลงนี้มีค่าน้อยกว่าใน 2 กรณีแรกมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากผลกระทบจากโปรโตคอล MAC และเมื่อพิจารณาที่การประวิงเวลาแบบประมวลผลเพิ่มเป็น 34 มิลลิวินาที ค่าการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยของการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก จะเป็น 1402 และ 1212 มิลลิวินาที ตามลำดับ นั่นคือจะลดลง 14% หรือ 190 มิลลิวินาที และสุดท้ายและเมื่อการประวิงเวลาแบบประมวลผลเพิ่มเป็น 40 มิลลิวินาที ค่าการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยของการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก จะเป็น 1489 และ 1230 มิลลิวินาที ตามลำดับ นั่นคือจะลดลง 17% หรือ 259 มิลลิวินาที จากจุดนี้จะเห็นได้ว่าความแตกต่างของการประวิงเวลาของระบบทั้งสองไม่ต่างกันมากนัก แต่เมื่อนำมาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วจะมีความแตกต่างกัน ตารางที่ 4.2 แสดงความแตกต่างของเวลาระหว่างการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก และได้แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงในแต่ละกรณี

ตารางที่ 4.2 ความแตกต่างของเวลาและเปอร์เซ็นต์การลดลงของเวลาระหว่างการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก ในการส่งข้อมูลจากนิวยอร์กไปยังปารีส

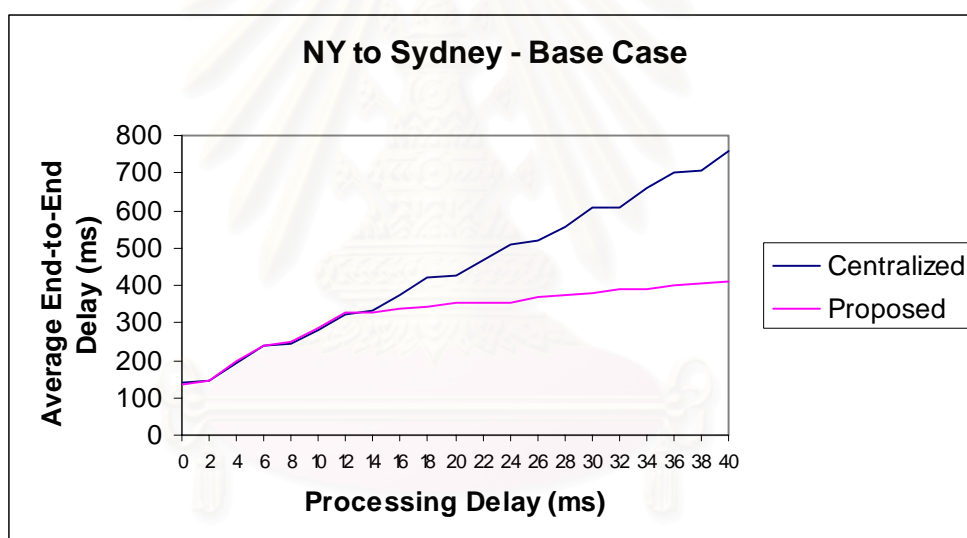
	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
18 มิลลิวินาที	35 มิลลิวินาที (10%)	34 มิลลิวินาที (7%)	33 มิลลิวินาที (3%)
26 มิลลิวินาที	99 มิลลิวินาที (22%)	100 มิลลิวินาที (17%)	104 มิลลิวินาที (8%)
34 มิลลิวินาที	198 มิลลิวินาที (34%)	198 มิลลิวินาที (28%)	190 มิลลิวินาที (14%)
40 มิลลิวินาที	265 มิลลิวินาที (40%)	265 มิลลิวินาที (34%)	259 มิลลิวินาที (17%)

จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเปอร์เซ็นต์การลดลงของการประวิงเวลาน้อยลง เนื่องจากผลกระทบของโปรโตคอล MAC (Slotted ALOHA) ทำให้เกิดการชนกันของข้อมูลส่งผลให้ต้องส่งข้อมูลใหม่ จึงทำให้มีการประวิงเวลารวมเพิ่มขึ้น

4.3 การส่งโดยให้มีจุดรับส่งอยู่ต่างทวีปกันและอยู่คนละซีกโลกกัน

การจำลองผลในส่วนนี้ มีโหนดส่งข้อมูลอยู่ที่นิวยอร์กและมีโหนดรับข้อมูลอยู่ที่ซิดนีย์ ในส่วนนี้ ประกอบด้วย 3 กรณีเช่นเดียวกับ 2 ส่วนก่อนหน้านี้

ผลการจำลองของกรณีที่ 1 แสดงในรูปที่ 4.7

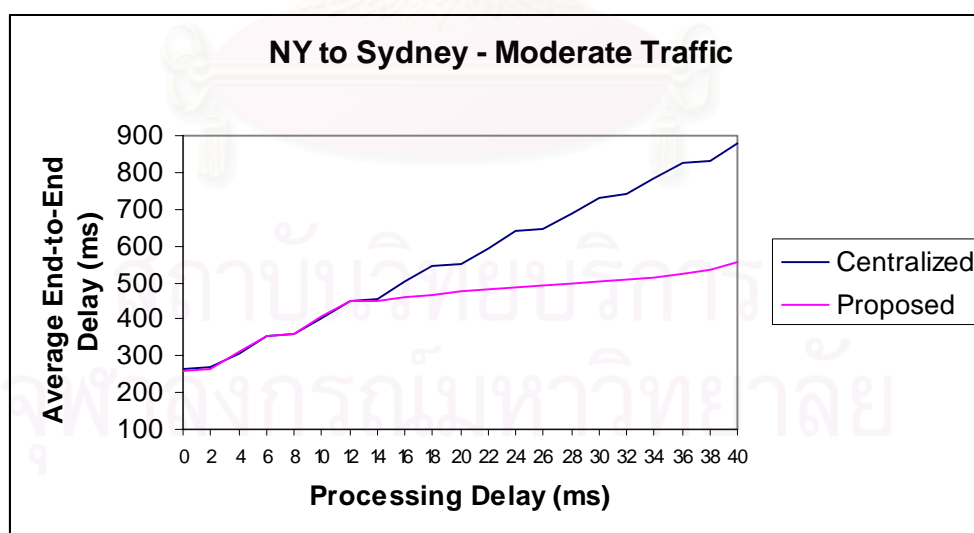


รูปที่ 4.7 ผลการจำลองกรณีที่ 1 จากนิวยอร์กไปยังซิดนีย์

จากการจำลองจะเห็นได้ว่าแนวโน้มของผลมีลักษณะเหมือนกันกับส่วนก่อนหน้านี้ สิ่งที่แตกต่างกันคือ ระบบที่นำเสนอมีผลที่ดีเร็วขึ้นกว่าเดิม นั่นคือในส่วนก่อนหน้านี้ ระบบจะมีผลที่ดีกว่าที่การประวิงเวลาแบบประมวลผลเป็น 18 มิลลิวินาที แต่ในส่วนนี้ระบบมีผลที่ดีกว่าที่การประวิงเวลาแบบประมวลผลเป็น 14 มิลลิวินาที โดยเมื่อใช้การจัดการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง จะมีการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยเป็น 333 มิลลิวินาที ในขณะที่เมื่อใช้การจัดการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอกจะมีการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยเป็น 326 มิลลิวินาที มีความต่างเป็น 7 มิลลิวินาที เมื่อการประวิงเวลาแบบประมวลผลเพิ่ม

เป็น 16 มิลลิวินาที ค่าการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยของการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก จะเป็น 376 และ 336 มิลลิวินาที ตามลำดับ นั่นคือจะลดลง 40 มิลลิวินาที ซึ่งค่อนข้างจะมีความแตกต่างมากสำหรับการประวิงเวลาแบบประมวลผลที่มีค่าน้อยๆ เมื่อคู่ที่การประวิงเวลาแบบประมวลผลเป็น 18 มิลลิวินาที ค่าการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยของการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก จะเป็น 422 และ 343 มิลลิวินาที ตามลำดับ นั่นคือจะลดลง 79 มิลลิวินาที หรือ 19% ในขณะที่ส่วนก่อนหน้าใช้เวลาลดลงเพียง 35 มิลลิวินาที (ลดลง 10%) ขณะที่เมื่อการประวิงเวลาแบบประมวลผลเพิ่มเป็น 26 มิลลิวินาที ค่าการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยของการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก จะเป็น 522 และ 368 มิลลิวินาที ตามลำดับ นั่นคือจะลดลง 154 มิลลิวินาที หรือ 30% ขณะที่ในส่วนก่อนหน้ามีความต่างเป็น 99 มิลลิวินาที (ลดลง 22%) เมื่อการประวิงเวลาแบบประมวลผลเพิ่มเป็น 34 มิลลิวินาที ค่าการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยของการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก จะเป็น 661 และ 390 มิลลิวินาที ตามลำดับ นั่นคือจะลดลง 271 มิลลิวินาที (ลดลง 41%) และเมื่อการประวิงเวลาแบบประมวลผลเป็น 40 มิลลิวินาที ค่าการประวิงเวลารวมโดยเฉลี่ยของการจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก จะเป็น 756 และ 408 มิลลิวินาที ตามลำดับ นั่นคือจะลดลง 348 มิลลิวินาที (ลดลง 46%) ซึ่งนับว่ามีการเปลี่ยนแปลงมาก

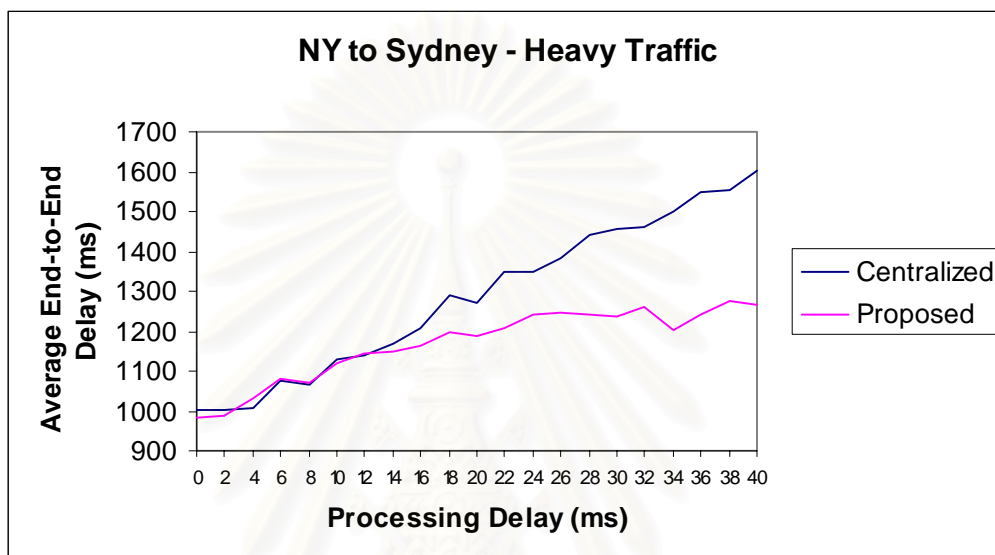
การจำลองในกรณีต่อไปมี 10 คู่โหนด ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 ผลการจำลองกรณีที่ 2 จากนิวยอร์กไปยังซิดนีย์

การจำลองในกรณีนี้มีแนวโน้มเหมือนกับการส่งข้อมูลในส่วนก่อนหน้า ซึ่งค่าความแตกต่างของการประวิงเวลาเป็นมิลลิวินาทีและเป็นเปอร์เซ็นต์จะแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.3

การจำลองในกรณีต่อไปมี 100 คู่โหนด ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ผลการจำลองกรณีที่ 3 จากนิวยอร์กไปยังซิดนีย์

เช่นเดียวกับกับส่วนก่อนหน้า แนวโน้มของการจำลองมีลักษณะคล้ายกันแต่การประวิงเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งมีผลมาจากการเข้าถึงแบบหลากหลาย และค่าความแตกต่างของการประวิงเวลาเป็นมิลลิวินาทีและเป็นเปอร์เซ็นต์แสดงดังในตารางที่ 4.3

จากตารางจะเห็นได้ว่า ผลมีลักษณะเหมือนกับส่วนหน้าก็คือ เปอร์เซ็นต์การลดลงจะมีค่าน้อยลง ซึ่งเนื่องมาจากผลกระทบจากการเข้าถึงแบบหลากหลายเมื่อมีคู่โหนดเพิ่มขึ้น

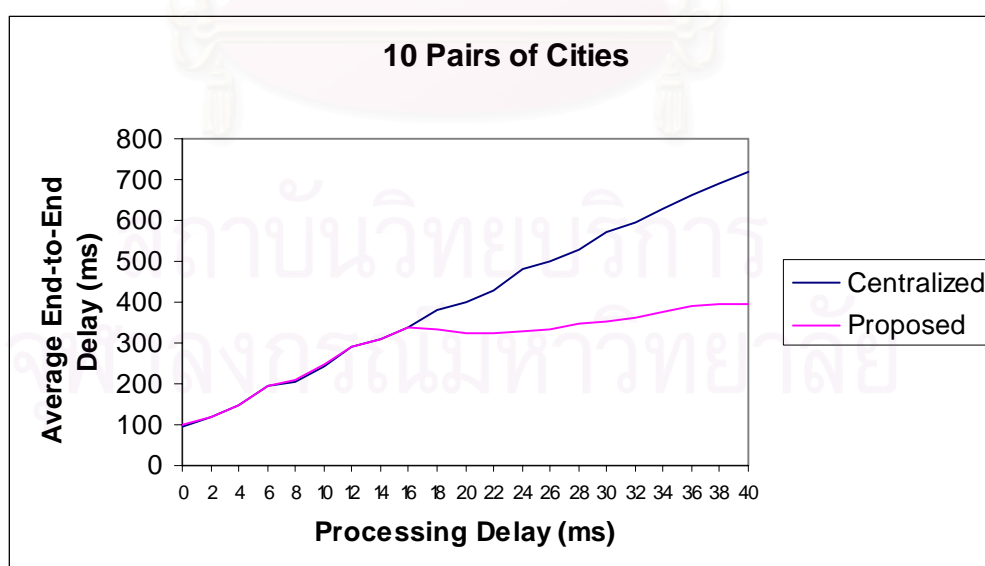
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.3 ความแตกต่างของเวลาและเปอร์เซ็นต์การลดลงของเวลาระหว่างการจัดสรรเส้นทางแบบ ศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก ในการส่งข้อมูลจากนิวยอร์กไปยังซินดี

	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
14 มิลลิวินาที	7 มิลลิวินาที (2%)	7 มิลลิวินาที (2%)	18 มิลลิวินาที (2%)
16 มิลลิวินาที	40 มิลลิวินาที (11%)	40 มิลลิวินาที (8%)	45 มิลลิวินาที (4%)
18 มิลลิวินาที	79 มิลลิวินาที (19%)	79 มิลลิวินาที (14%)	88 มิลลิวินาที (7%)
26 มิลลิวินาที	154 มิลลิวินาที (30%)	154 มิลลิวินาที (24%)	141 มิลลิวินาที (10%)
34 มิลลิวินาที	271 มิลลิวินาที (41%)	271 มิลลิวินาที (34%)	296 มิลลิวินาที (20%)
40 มิลลิวินาที	348 มิลลิวินาที (46%)	348 มิลลิวินาที (40%)	339 มิลลิวินาที (21%)

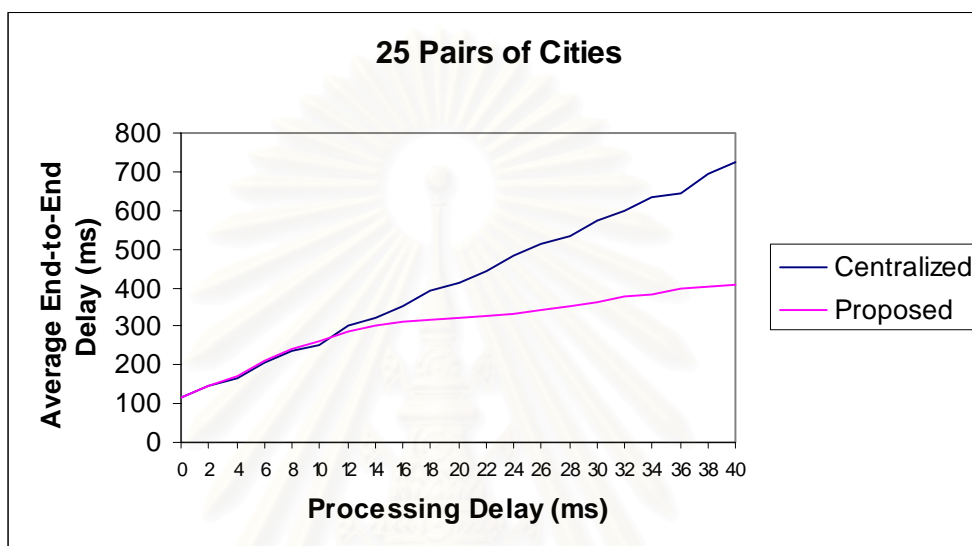
4.4 การส่งโดยให้จุดรับส่งอยู่ตามที่ต่างๆ ทั่วโลก

การจำลองผลในส่วนนี้แบ่งเป็น 3 กรณี แต่แตกต่างจาก 3 ส่วนแรกคือ ให้มีคู่โหนดเป็น 10, 25 และ 50 คู่ โหนดต่างๆ นี้จะอยู่ตามเมืองต่างๆ ทั่วโลก เพื่อเป็นการจำลองเสมือนกับการใช้โครงข่าย ดาวเทียมในชีวิตจริง ผลการจำลองเมื่อมีคู่โหนดเป็น 10 คู่แสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ผลการจำลองเมื่อมีคู่โหนดเป็น 10 คู่

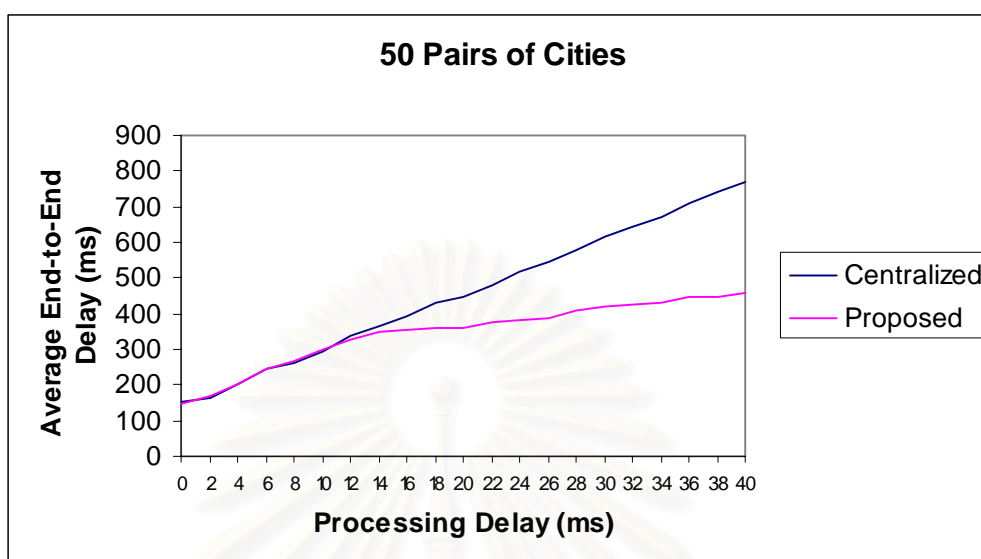
จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า ระบบที่ใช้การจัดเส้นทางที่นำเสนอมีค่าดีกว่าการจัดเส้นทางแบบศูนย์กลาง เช่นเดียวกับในส่วนที่ 2 และ 3 ซึ่งค่าความต่างของการประวิงเวลาแสดงในตารางที่ 4.4 ผลการจำลองในกรณีที่ 2 เมื่อมีคู่โหนดเป็น 25 คู่แสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ผลการจำลองเมื่อมีคู่โหนดเป็น 25 คู่

จากการจำลองในส่วนก่อนหน้า เมื่อเพิ่มคู่โหนดจาก 1 เป็น 10 การประวิงเวลารวมจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก (125 มิลลิวินาที) แต่การจำลองในส่วนนี้ได้เพิ่มคู่โหนดจาก 10 เป็น 25 แต่การประวิงเวลารวมเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย (20 มิลลิวินาที) ทั้งนี้เนื่องจากการจำลองในส่วนก่อนหน้า โหนดที่ส่งข้อมูลอยู่ที่เมืองเดียว แต่ในส่วนนี้ โหนดจะกระจายไปตามเมืองต่างๆ ทั่วโลก แต่ถึงอย่างไรก็ตาม การจัดเส้นทางที่ได้นำเสนอก็ยังคงมีแนวโน้มการประวิงเวลาที่ดีกว่า และจะเห็นได้ว่ามีประสิทธิภาพดีขึ้นเร็วกว่าเดิมนั้นคือเริ่มมีความแตกต่างที่การประวิงเวลาแบบประมวลผลที่ 12 มิลลิวินาที ค่าความต่างของการประวิงเวลาและเปอร์เซ็นต์การลดลงแสดงในตารางที่ 4.4

ผลการจำลองในกรณีที่ 3 เมื่อมีคู่โหนดเป็น 50 คู่แสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ผลการจำลองเมื่อมีคู่โหนดเป็น 50 คู่

จากผลการจำลองจะเห็นได้ว่า จำนวนโหนดที่เพิ่มขึ้นไม่ได้มีผลกระทบทำให้การประวิงเวลาเพิ่มขึ้นมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากโหนดอยู่กระจายกันไป ทำให้ผลของการเข้าถึงแบบหลากหลาย ที่มีต่อการประวิงเวลาลดลง จากการจำลองผลในส่วนนี้เองที่ทำให้สามารถสรุปได้ว่า การที่การประวิงเวลาใน 3 ส่วนก่อนหน้านี้มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อเพิ่มจำนวนโหนด มีผลกระทบมาจากการเข้าถึงแบบหลากหลายนั่นเอง และเช่นเดียวกันกับในกรณีที่ 2 คือ การจัดเส้นทางที่ได้นำเสนอ ยังคงมีแนวโน้มการประวิงเวลาที่ดีกว่า และมีประสิทธิภาพดีขึ้นเร็วกว่าเดิม นั่นคือเริ่มมีความแตกต่างที่การประวิงเวลาแบบประมวลผลที่ 12 มิลลิวินาที ค่าความแตกต่างของการประวิงเวลาและเปอร์เซ็นต์การลดลงของเวลาแสดงในตารางที่ 4.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

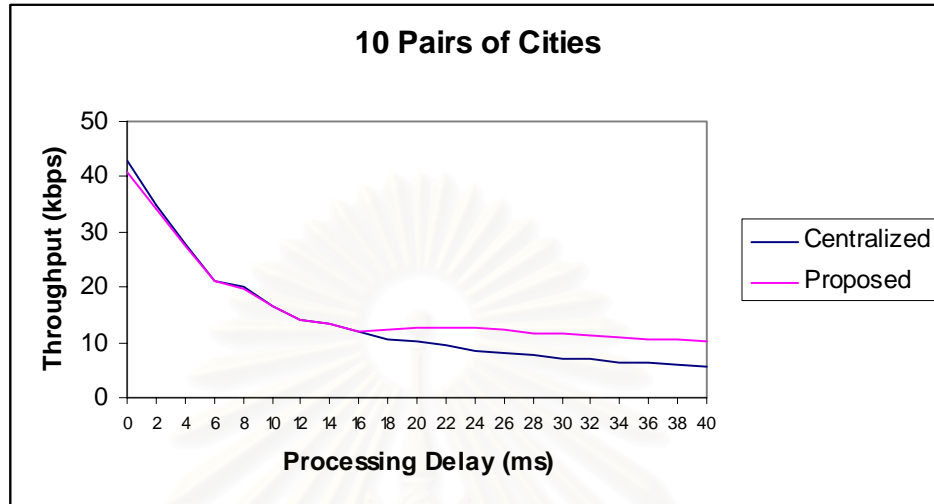
ตารางที่ 4.4 ความแตกต่างของเวลาและเปอร์เซ็นต์การลดลงของเวลาระหว่างการจัดสรรเส้นทางแบบ ศูนย์กลาง และการจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอก ในการส่งข้อมูลโดยให้โนดอยู่ตามเมือง ต่างๆ ทั่วโลก

	กรณีที่ 1	กรณีที่ 2	กรณีที่ 3
12 มิลลิวินาที	-	16 มิลลิวินาที (5%)	11 มิลลิวินาที (3%)
14 มิลลิวินาที	-	24 มิลลิวินาที (7%)	16 มิลลิวินาที (4%)
16 มิลลิวินาที	-	43 มิลลิวินาที (12%)	41 มิลลิวินาที (10%)
18 มิลลิวินาที	50 มิลลิวินาที (13%)	76 มิลลิวินาที (19%)	72 มิลลิวินาที (17%)
26 มิลลิวินาที	168 มิลลิวินาที (34%)	172 มิลลิวินาที (34%)	158 มิลลิวินาที (29%)
34 มิลลิวินาที	252 มิลลิวินาที (40%)	255 มิลลิวินาที (40%)	242 มิลลิวินาที (36%)
40 มิลลิวินาที	326 มิลลิวินาที (45%)	317 มิลลิวินาที (44%)	310 มิลลิวินาที (40%)

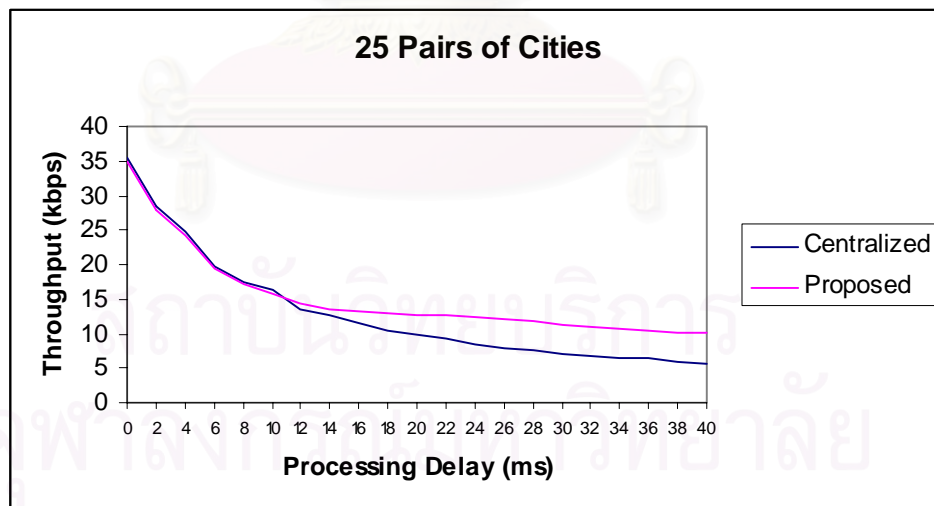
4.5 การวิเคราะห์ค่าวิสัยสามารถจากการส่งโดยให้โนดรับส่งอยู่ตามเมืองต่างๆ ทั่วโลก

ต่อเนื่องจากส่วนก่อนหน้าที่ได้มีการวิเคราะห์ค่าการประวิงเวลา เมื่อหาค่าวิสัยสามารถของการส่งโดยให้จูดรับส่งอยู่ตามเมืองต่างๆ ทั่วโลก โดยมีคูนอดเป็น 10, 25 และ 50 โนด จะเห็นได้ว่าระบบที่ใช้การจัดสรรเส้นทางแบบที่ได้นำเสนอจะมีค่าวิสัยสามารถที่ดีกว่า ดังผลการจำลองที่แสดงในรูปที่ 4.13 - 4.15

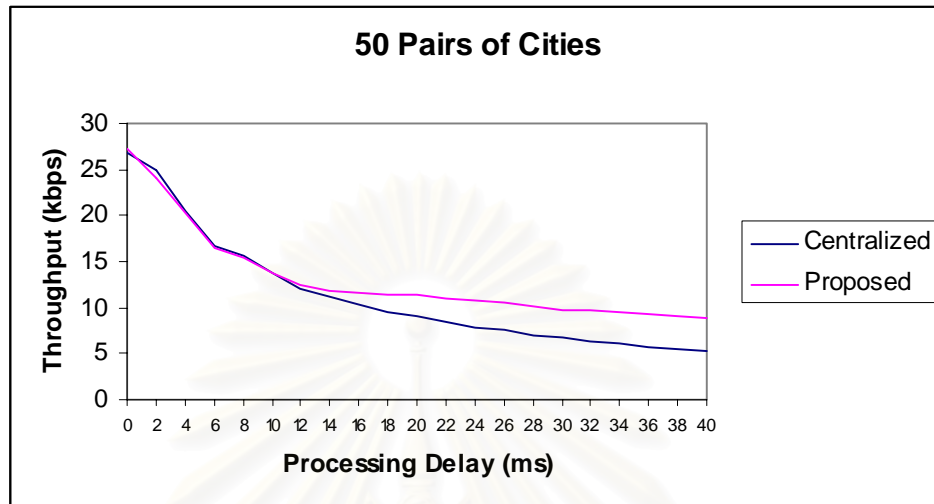
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 ค่าวิสัยสามารถเทียบกับการประวิงเวลาแบบประมวลผล เมื่อมีโนดรับส่งอยู่ที่ต่างๆ ทั่วโลก และมีคู่โนดเป็น 10 คู่

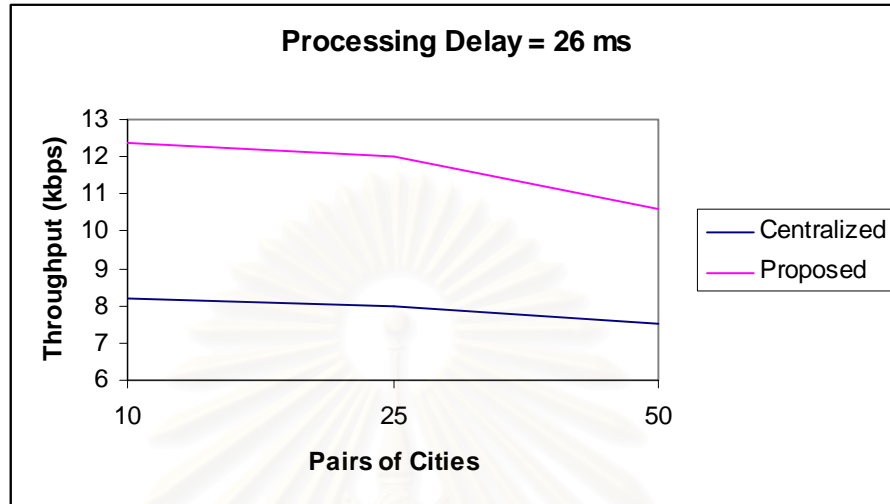


รูปที่ 4.14 ค่าวิสัยสามารถเทียบกับการประวิงเวลาแบบประมวลผล เมื่อมีโนดรับส่งอยู่ที่ต่างๆ ทั่วโลก และมีคู่โนดเป็น 25 คู่

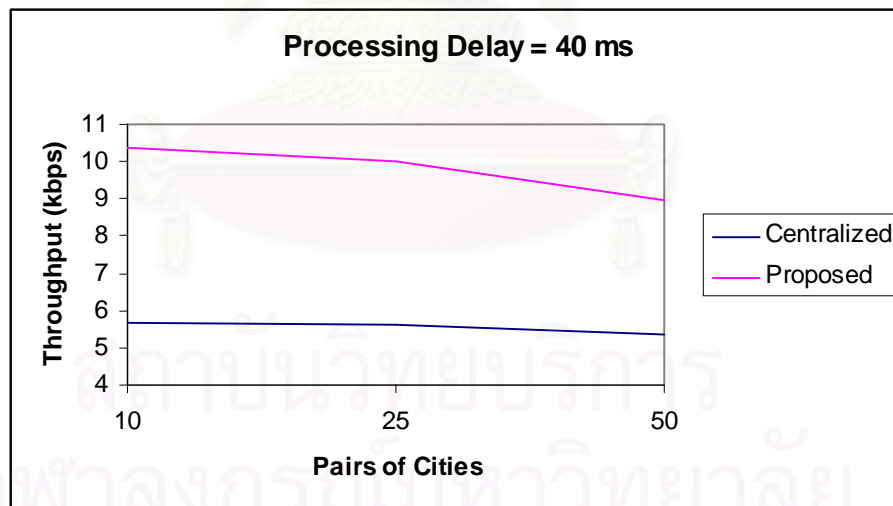


รูปที่ 4.15 ค่าวิสัยสามารถเทียบกับการประวิงเวลาแบบประมวลผล เมื่อมีโนดรับส่งอยู่ที่ต่างๆ ทั่วโลก และมีคู่โนดเป็น 50 คู่

เมื่อพิจารณาค่าวิสัยสามารถเทียบกับจำนวนคู่โนด พบว่า เมื่อให้จำนวนคู่โนดเพิ่มขึ้นค่าวิสัยสามารถจะลดลง ทั้งนี้เนื่องจากผลกระทบจากการเข้าถึงแบบหลากหลาย ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในส่วนก่อนหน้านี้ แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นได้ว่าระบบที่ใช้การจัดสรรที่นำเสนอจะมีค่าวิสัยสามารถมากกว่า ดังแสดงในรูปที่ 4.16 - 4.17



รูปที่ 4.16 ค่าวิสัยสามารถเทียบกับจำนวนคู่โหนด ที่การประวิงเวลาแบบประมวลผลเป็น 26 มิลลิวินาที



รูปที่ 4.17 ค่าวิสัยสามารถเทียบกับจำนวนคู่โหนด ที่การประวิงเวลาแบบประมวลผลเป็น 40 มิลลิวินาที

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการจำลองได้แบ่งการจำลองออกเป็น 4 ลักษณะตามตำแหน่งของโนดที่รับส่งข้อมูล นั่นคือ การส่งโดยให้จูดรับส่งอยู่ภายในทวีปเดียวกัน การส่งโดยให้จูดรับส่งอยู่ต่างทวีปกันแต่อยู่ในซีกโลกเหนือเหมือนกัน การส่งโดยให้จูดรับส่งอยู่ต่างทวีปกันและอยู่คนละซีกโลก และการส่งโดยให้จูดรับส่งอยู่ตามที่ต่างๆ ทั่วโลก การที่แบ่งการจำลองเช่นนี้ เพื่อที่จะดูผลกระทบจากการใช้ดาวเทียมเมื่อมีเส้นทางที่ต่างกัน และเมื่อให้มีจำนวนคู่โนดรับส่งข้อมูลต่างกัน จะทำให้การประวิงเวลาต่างกันออกไปอย่างไรบ้าง ซึ่งสามารถสรุปผลได้ ดังนี้

จากการจำลองการส่งโดยให้จูดรับส่งอยู่ภายในทวีปเดียวกัน ผลออกมาคือการประวิงเวลาไม่ได้แสดงความแตกต่างกันให้เห็นเด่นชัด ทั้งนี้เนื่องจากระยะทางที่ไม่ห่างไกลมาก ทำให้การคำนวณเส้นทาง การเลือกชื่อไม่แตกต่างกัน

ส่วนการจำลองการส่งโดยให้จูดรับส่งอยู่ต่างทวีปกันแต่อยู่ในซีกโลกเหนือเหมือนกัน และการส่งโดยให้จูดรับส่งอยู่ต่างทวีปกันและอยู่คนละซีกโลก ในทั้งสองส่วนนี้ ผลการจำลองมีแนวโน้มเหมือนกันคือ การประวิงเวลาของระบบที่ใช้การจัดสรรเส้นทางแบบแอดฮอกที่ได้นำเสนอไปจะมีย่าน้อยลงกว่า ระบบที่ใช้การจัดสรรเส้นทางแบบศูนย์กลาง ทั้งนี้เนื่องมาจากการใช้วิธีการคำนวณเส้นทางที่ต่างกัน ทำให้มีเส้นทางในการส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน มีการประวิงเวลาการแพร่ที่ต่างกัน จึงทำให้มีการประวิงเวลาโดยรวมต่างกัน

การจำลองการส่งโดยให้จูดรับส่งอยู่ตามที่ต่างๆ ทั่วโลกนั้น ได้จำลองเพื่อเป็นการจำลองเสมือนกับการใช้โครงข่ายดาวเทียมในชีวิตจริง ผลที่ได้คือ การประวิงเวลามีแนวโน้มดีกว่าการจัดเส้นทางแบบศูนย์กลางเช่นเดียวกัน และทำให้สามารถวิเคราะห์ออกมาได้ว่า การที่เพิ่มจำนวนโนดรับส่งแล้วทำให้การประวิงเวลาเพิ่มขึ้นนั้น มีผลกระทบจากการเข้าถึงแบบหลากหลาย (Multiple Access) จากการใช้ Slotted ALOHA ในส่วนของโปรโตคอล MAC ในตัวจำลอง NS-2 ทำให้เปอร์เซ็นต์การลดลงของการประวิงเวลาเมื่อมีจำนวนโนดเพิ่มขึ้นน้อยลง โดยเปอร์เซ็นต์การลดลงนี้จะน้อยลงอย่างเห็นได้ชัดในส่วนของ การจำลองการส่งโดยให้จูดรับส่งอยู่ต่างทวีปกันและอยู่คนละซีก

โลก ซึ่งเมื่อการประวิงเวลาแบบประมวผลเป็น 40 มิลลิวินาทีนั้น จากที่มีโนดเพียงโนดเดียว เมื่อเพิ่มเป็น 100 โนดเปอร์เซ็นต์การลดลงของการประวิงเวลาโดยรวมจะลดลงจาก 46% เป็น 21%

และสุดท้ายนี้ เมื่อพิจารณาค่าวิสัยสามารถของระบบจะพบว่าค่าวิสัยสามารถมีค่าดีกว่าการจัดเส้นทางแบบศูนย์กลางเช่นเดียวกัน

ข้อเสนอแนะ

สำหรับงานที่ควรได้รับการศึกษาหรือพัฒนาต่อไปในอนาคต

1. การศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการเข้าถึงแบบหลากหลาย (Multiple Access)
2. การศึกษาและปรับปรุงในส่วนของการเข้าคิวของข้อมูล (Queueing)
3. การศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของอัตราความผิดพลาดของข้อมูล (Bit Error Rate) กับการแก้ปัญหาของความคับคั่ง
4. การศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของการบอกคุณภาพของการเชื่อมโยง
5. การศึกษาเพิ่มเติมในการแสดงข้อมูลการจำลองผลของตัวจำลอง NS-2
6. การศึกษาตัวดาวเทียม ระบบภายในตัวดาวเทียมซึ่งสามารถทำการวิจัยและพัฒนาในอนาคต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Glenn E. Prescott, Steven A. Smith, and Karen Moe, "Real-Time Information System Technology Challenges for NASA's Earth Science Enterprise," *The 20th IEEE Real-Time Systems Symposium Phoenix, Arizona*, Dec. 1999.
2. C-C. Shen and S. Rajagopalan, "Challenges in Inter-Planetary MANETs," *Technical Report, University of Delaware*, Mar 2002.
3. รศ.ดร.ประสิทธิ์ ทีฆพุดิ, "การสื่อสารดาวเทียม" วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ พิมพ์ครั้งที่ 3, ธันวาคม 2537.
4. Hong-Seong Chang, Byoung-Wan Kim, Chang Gun Lee, Yanghee Choi, Sang Lyul Min, Hyun Suk Yang, and Chong Sang Kim, "Topological Design and Routing for Low Earth Orbit Satellite Networks," *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, (November 1995) : 529-535.
5. C-C. Shen, G. Borkar, S. Rajagopalan, and C. Jaikao, "Interrogation-Based Relay Routing for Ad Hoc Satellite Networks," *IEEE, Global Telecommunications Conference*, vol.3, November 2002, pp. 2920-2924.
6. R. E. Bellman, "Dynamic Programming." Princeton University Press, 1957.
7. C. E. Perkins and P. Bhagwat, "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers." *Proceedings of ACM SIGCOMM*, (1994) : 234-244.
8. F. Bai, N. Sadagopan, B. Krishnamachari, A. Helmy, "Modeling Path Duration Distributions in MANETs and Their Impact on Reactive Routing Protocols." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, (September 2004): 1357 – 1373.
9. C. Perkins, "Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing," Internet draft, draft-ietf-manet-aodv-00.txt.
10. Zong Da Chen, HT Kung, and Dario Vlah. "Ad hoc Relay Wireless Networks over Moving Vehicles on Highways," *The ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MobiHoc 2001) Poster Paper*, (October 2001) : 247 - 250.
11. C-K. Toh. "Associativity-based Routing for Ad-Hoc Mobile Networks," *Wireless Personal Communications: An International Journal*, (March 1997) : 103 - 139.
12. Yannis Labrou and Tim Finin, "A Proposal for a new KQML Specification," *Technical Report TR CS-97-03, Computer Science and Electrical Engineering Department, University of Maryland Baltimore County*, February 1997.

13. A. Nasipuri, R. Castaneda, and S. Das, "Performance of Multipath Routing for On-demand Protocols in Mobile Ad Hoc Networks," *ACM/Kluwer Mobile Networks and Applications (MONET)*, (August 2001) : 339–349.
14. A. Nasipuri and S. Das, "Demand Multipath Routing for Mobile Ad Hoc Networks," *Proceedings of IEEE ICCN'99, Boston, MA.*, (October 1999) : 64-70.
15. E. Ekici, I. F. Akyildiz, and M. D.Bender, "A Distributed Routing Algorithm for Datagram Traffic in LEO Satellite Networks," *IEEE/ACM Transaction on Networking*, (April 2001) : 137-147.
16. E. Ekici, I. F. Akyildiz, and M. D.Bender, "Datagram Routing Algorithm for LEO Satellite Networks," *Proceedings of IEEE 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, (March 2000) : 500-508.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผลงานวิจัยของผู้เขียนที่ได้รับการตีพิมพ์แล้ว

P. Chettanachit and P. Teekaput, Performance Analysis of End-to-End Delay for Routing via Satellite Hybrid Networks. EE-con 28. Oct, 20-21 2005. Phuket.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพิมพ์ิกา เจตนะจิตร เกิดวันที่ 17 ตุลาคม พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2544 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคปลาย ปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย