อัลกอริทึมการจัดเส้นทางโดยใช้ช่วงชีวิตของข่ายเชื่อมโยง สำหรับโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์

นางสาวชนัญญ์ธร นิลนิธิวัฒน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ROUTING ALGORITHM USING LINK LONGEVITY FOR COMMERCIAL AVIATION AD HOC NETWORK

Miss Chanantorn Nilnithiwat

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 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อัลกอริทึมการจัดเส้นทางโดยใช้ช่วงชีวิตของข่ายเชื่อมโยงสำหรับโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์
โดย	นางสาวชนัญญ์ธร นิลนิธิวัฒน์
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. วาทิต เบญจพลกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เชาวน์ดิศ อัศวกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. ภูมิพัฒ แสงอุดมเลิศ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ชนัญญ์ธร นิลนิธิวัฒน์ : อัลกอริทึมการจัดเส้นทางโดยใช้ช่วงชีวิตของข่ายเชื่อมโยงสำหรับโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์ (ROUTING ALGORITHM USING LINK LONGEVITY FOR COMMERCIAL AVIATION AD HOC NETWORK) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร, 72 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมจัดสรรเส้นทางที่พัฒนามาจากโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV (Ad Hoc On-demand Distance Vector) สำหรับโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์ (Aviation Ad Hoc Network; AANET) โดย AANET เป็นโครงข่ายหนึ่งในโครงข่ายแอดฮอกเพื่อลูกข่ายเคลื่อนที่ (Mabile Ad Hoc Netowork; MANET) ที่มีเครื่องบินเป็นลูกข่ายเคลื่อนที่ เนื่องจากเครื่องบินพาณิชย์เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงประมาณ 800-1,000 กิโลเมตรต่อชั่วโมงซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ทอพอลอยีของโครงข่ายเปลี่ยนบ่อยครั้งจึงไม่เหมาะในการนำโพรโทคอลแบบโพรแอคทีฟมาใช้ใน AANET ในทางตรงกันข้ามโพรโทคอลรีแอคทีฟกลับเหมาะสมเนื่องจากทำการค้นหาเส้นทางก็ต่อเมื่อมีความต้องการเท่านั้น โดยโพรโทคอลรีแอคทีฟที่เป็นที่รู้จักยอมรับและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ โพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV อย่างไรก็ตาม AODV ยังคงมีข้อเสียเมื่อมีการพิจารณาถึงข้อมูลของแพ็คเกตที่ต้องการส่งเพราะมีการเลือกเส้นทางจากเส้นทางที่สั้นที่สุดซึ่งไม่สามารถรับรองว่าการส่งแพ็คเกตนั้นเสร็จสมบูรณ์ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพิ่มปัจจัยการคาดการณ์เวลาเชื่อมต่อมาประยุกต์ใช้โดยเรียกชื่อว่า อายุขัยข่ายเชื่อมโยง ซึ่งถูกนำมาประยุกต์และปรับในการเลือกเส้นทางของ AODV ใน AANET จากผลการทดลอง อัตราการส่งแพ็คเกตสำเร็จของอัลกอริทึมที่นำเสนอนั้นให้ผลดีกว่า AODV อย่างไรก็ตามเวลาประวิงตั้งแต่ต้นจนจบของ AODV นั้นให้ผลที่ดีกว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอ เนื่องจากอัลกอริทึมที่นำเสนอใช้เวลาในการกรองเส้นทางมากกว่าเพราะมีปัจจัยมากกว่า

Chulalongkorn University

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

5470479221 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEYWORDS: ROUTING ALGORITHM / AANET / LINK-LONGEVITY / AODV / MANET

CHANANTORN NILNITHIWAT: ROUTING ALGORITHM USING LINK LONGEVITY FOR COMMERCIAL AVIATION AD HOC NETWORK. ADVISOR: ASST. PROF. CHAIYACHET SAIVICHIT, 72 pp.

This thesis proposes an routing mechanism based on Ad Hoc On-demand Distance Vector (AODV) routing protocol for particularly applying in Commercial Aviation Ad Hoc Network (AANET). AANET is a kind of Mobile Ad Hoc Network (MANET) in which aircrafts are considered as mobile nodes. Generally, the commercial aircrafts move significantly fast at around 800 to 1,000 km/hr which causes network topology to change frequently. Hence, proactive routing protocol may not be suitable for this scenario. Conversely, reactive routing protocol could be a wiser choice since it allows nodes to search for the routes at any time when they require. AODV routing protocol, as one of the most widely known, was selected in this application. However it has some disadvantages on the packet size issue. This is because of its unstable topology and duration of packet transmission. The route is selected based the shortest path which may not guarantee successful packet delivery. For the reason, the prediction of connectivity period, also called link-longevity, is considered as another factor for route selection in this thesis. The value of "link longevity" is applied as another criteria route selecting of AODV in AANET. As a result, the packet delivery success rate of the proposed routing algorithm would provide a better performance than that of AODV. However, average end-to-end delay of AODV performs better than that of the proposed routing algorithm. This is clearly due to the proposed routing algorithm requires more processing time than the AODV considering three factors in route selecting.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Department:	Electrical Engineering	Student's Signature	.....
Field of Study:	Electrical Engineering	Advisor's Signature	.....
Academic Year:	2014		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะสำเร็จลุล่วงไปด้วยดีไม่ได้ หากปราศจากการช่วยเหลือจากผศ.ดร. ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ท่านคอยแนะนำและให้คำปรึกษา ตลอดจนให้แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ อีกทั้งยังช่วยตรวจทานการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ให้มีภาษาที่สละสลวยและเป็นทางการ อีกท่านหนึ่งได้แก่ ผศ. ดร. เชาวน์ดิศ อัศวกุล ซึ่งเป็นอาจารย์ในกลุ่มวิจัยโครงข่าย (Network Research Group) และยังเป็นอาจารย์กรรมการสอบที่ให้ทั้งคำแนะนำรวมถึงการชี้แนะแนวทางการทำทีสีสจนผู้เขียนมีแรงจูงใจในการทำงานและเขียนวิทยานิพนธ์จนสำเร็จไปได้ด้วยดี อีกสองท่านที่ขาดไม่ได้คือ รศ.ดร.วาทิศ เบญจพลกุล และ รศ.ดร. ภูมิพัฒ แสงอุดมเลิศ ที่กรุณามาเป็นประธานกรรมการและกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ของข้าพเจ้าตามลำดับ ท่านทั้งสองได้ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ได้อย่างรอบคอบและครบถ้วน ซึ่งเป็นสิ่งที่ข้าพเจ้ามองข้ามไป

นอกเหนือจากข้างต้น วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการขับเคลื่อนการวิจัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช (Special Task Force for Activating Research (STAR) ภายใต้กลุ่มวิจัยโครงข่ายไร้สาย และอินเทอร์เน็ตอนาคต (Wireless Network and Future Internet Research Group) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอขอบคุณสมาชิกกลุ่มวิจัยโครงข่าย (Network Research group) ทุกคนที่ช่วยเป็นกำลังใจ แลกเปลี่ยนความคิด รวมถึงเป็นที่ปรึกษาและให้คำแนะนำในการนำเสนอผลงาน โดยเฉพาะนางสาวศศิรมย์ เทียนน้อย ที่ได้คอยให้คำปรึกษา ช่วยตรวจทานเล่มวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ต่อข้าพเจ้ามาโดยตลอด

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้อง ในห้องแลปไฟฟ้าสื่อสาร ทุกคนที่คอยเป็นกำลังใจให้แก่ข้าพเจ้าเสมอมา

ขอขอบคุณคนสำคัญสองคนสุดท้ายที่สำคัญที่สุดนั่นคือ บิดามารดาที่ได้สนับสนุนข้าพเจ้าเสมอมา เป็นทั้งผู้อุดหนุด ผู้ผลักดันและผู้ที่คอยฉุดข้าพเจ้าขึ้นมาในเวลาที่ข้าพเจ้ารู้สึกท้อแท้ อีกทั้งกำลังใจจากท่านทั้งสองนั้นทำให้ข้าพเข้ามีวันนี้ได้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณท่านทั้งสองมา ณ ที่นี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

บทที่ 1 1

บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 9

1.3 ขอบเขตงานวิจัย 9

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 9

1.5 ประมวลวิทยานิพนธ์ 9

บทที่ 2 11

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 11

2.1 บทความที่เกี่ยวข้อง 12

2.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์บนอากาศยานเชิงพาณิชย์ 14

2.2.1 ระบบแพร่กระจายติดตามอากาศยานอัตโนมัติ (Automatic dependent surveillance- Broadcast; ADS-B) 14

2.2.1.1 ข้อมูลทั่วไป 15

2.2.1.2 หลักการทำงาน 15

2.3 โครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์ (Commercial Aviation Ad Hoc Network; AANET) 16

2.4.1 กราฟมีน้ำหนัก (Weight Graph) 19

2.4.2 เมทริกซ์ของกราฟ 19

หน้า

2.4.3 แนวเดิน (Walk) และวิถี (Path) 20
2.5 โพรโทคอลจัดสรรเส้นทางพื้นฐาน AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) 20
2.5.1 ข้อมูลทั่วไป 21
2.5.1.1 ตารางเส้นทาง (Routing table) 23
1) 2.5.2 การนำไปประยุกต์ใช้ 24
2.5.3 รูปแบบข้อความ 24
2.5.3.1 รูปแบบข้อความค้นหาเส้นทาง (Route Request Message Format; RREQ) 24
2.5.3.2 รูปแบบข้อความตอบกลับเส้นทาง (Route Reply Message Format; RREP) 25
2.5.3.3 รูปแบบข้อความความผิดพลาดเส้นทาง (Route Error Message Format; RERR) 27
2.5.3.4 การรับรู้การตอบกลับเส้นทาง (Route Reply Acknowledgment Message Format; RREQ-ACK) 28
2.5.4 การดำเนินการของ AODV 28
2.5.4.1 การคงอยู่ของลำดับหมายเลข (Maintaining Sequence Numbers) 28
2.5.4.2 การเข้าถึงตารางเส้นทางและรายชื่อตัวก่อนหน้า (Route table Entries and Precursor Lists) 30
2.5.4.3 การผลิตข้อความร้องขอเส้นทาง (Generate route request) 30
2.5.4.4 การควบคุมการส่งข้อความ RREQ (Controlling Dissemination of Route Request Message) 32
2.5.4.5 การประมวลผลและการเดินหน้าการร้องขอเส้นทาง (Processing and Forwarding Route Requests) 33
2.5.4.6 การส่งข้อความ RREPS (Generating Route Replies) 34
2.5.5 ข้อความ Hello (Hello message) 37

หน้า

2.5.6 ข้อความความผิดพลาดเส้นทาง เส้นทางหมดอายุและการลบข้อมูลเส้นทาง 37
บทที่ 3 39
อัลกอริทึมที่นำเสนอ: การประยุกต์ใช้งานช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงในการพิจารณาเลือกเส้นทางการส่งข้อมูลในโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางพื้นฐาน AODV 39
3.1 จุดอ่อนของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV 40
3.2 ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยง (Link longevity) 41
3.2.1 การศึกษาระยะที่เหมาะสมของโนดระหว่างกลาง 45
3.3 การประยุกต์ใช้ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงในขั้นตอนการเลือกเส้นทางของโพรโทคอล AODV 45
3.3.1 การเพิ่มช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงในข้อความ RREQ 46
3.3.2 การทำงานในขั้นตอนการร้องขอเส้นทาง 46
บทที่ 4 48
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ 48
4.1 ผลการจำลองเบื้องต้น 48
4.1.1 การเคลื่อนที่ของโนดและเวลาประวิงในโครงข่าย 48
4.2 สภาพแวดล้อมของการจำลอง (Simulation Environment) 51
4.2.1 แบบจำลองโครงข่าย (Network model) 52
4.2.2 การตั้งค่าสมมติฐานให้กับการจำลอง 55
4.4 ผลการจำลองและการวิเคราะห์ 56
4.4.1 การตั้งค่าการจำลอง 56
4.4.2 ขั้นตอนการศึกษาและประมวลผลการทดลอง 57
4.4.2.1 ผลการศึกษาอัตราการส่งสำเร็จ 57
4.4.2.2 ผลการศึกษาจำนวนฮอปของเส้นทาง 60
4.4.2.3 ผลการศึกษาจำนวนเซสชั่นในการค้นหาเส้นทาง 63

หน้า

4.5 สรุปผลการทดลอง 64
บทที่ 5 65
บทสรุปและข้อเสนอแนะ 65
5.1 บทสรุป 65
5.2 ข้อเสนอแนะ 66
รายการอ้างอิง 70
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 72

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1

บทนำ

งานวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนออัลกอริทึมการจัดเส้นทาง (Routing algorithm) ของโครงข่ายแอดฮอกเมื่อมีอากาศยานเป็นโนดเคลื่อนที่ในโครงข่าย จึงเรียกโครงข่ายนี้ว่าโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์ (Aviation Ad Hoc Networks; AANETs) ซึ่งมุ่งสนใจอากาศยานพาณิชย์เป็นหลัก เนื่องจากอากาศยานพาณิชย์นั้นมีเส้นทางการบินและความเร็วที่แน่นอน นอกจากนี้ได้มีการประยุกต์ใช้อายุขัยข่ายเชื่อมโยง (Link longevity) จากงานวิจัยที่ผ่านมาร่วมกับโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางพื้นฐาน AODV (Ad Hoc On-demand Vector) ซึ่งเป็นโพรโทคอลแบบรีแอคทีฟโดยทำการหาเส้นทางเมื่อมีความต้องการส่งข้อมูลเท่านั้น ซึ่งในบทนำนี้ถูกแบ่งเป็นหัวข้อดังนี้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

1.2 บทความที่เกี่ยวข้อง

1.3 วัตถุประสงค์

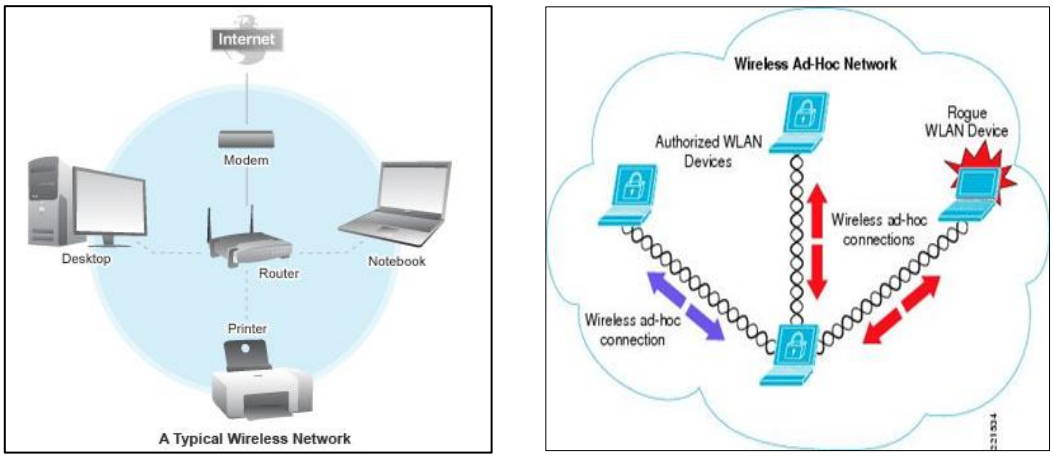
1.4 ขอบเขตงานวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.6 ประมวลวิทยานิพนธ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ



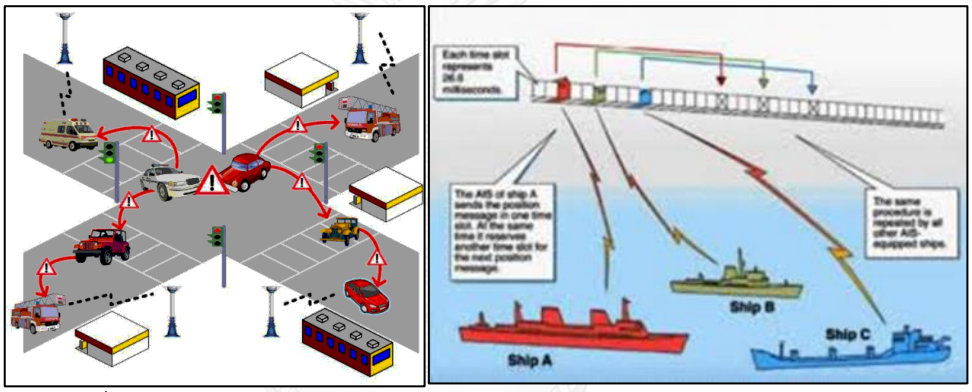
รูปที่1.1 (ก) โครงข่ายไร้สายตรงแบบ (Typical wireless network) [1]

(ข) โครงข่ายไร้สายแอดฮอก (Wireless ad-hoc network) [2]

เทคโนโลยีแบบไร้สาย (Wireless network) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ วิธีโครงสร้างพื้นฐาน (Infrastructure mode) และวิธีแอดฮอก (Ad Hoc mode) ซึ่งทั้งสองชนิดนี้ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อตอบสนองความต้องการในการสื่อสารทั้งภายในอาคาร ภายนอกอาคารหรือขณะเคลื่อนที่ นอกจากนี้ยังก่อให้เกิดความสะดวกสบายมากขึ้นเพราะไม่ต้องมีสายเชื่อมต่อ (Wired LAN) อย่างที่ทราบกันดีว่าโครงข่ายไร้สายเป็นหนึ่งในโครงข่ายที่ใช้คลื่นวิทยุในการเชื่อมต่อสัญญาณของอุปกรณ์สื่อสารต่างๆในการเข้าถึงอินเทอร์เน็ต ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อในโครงข่ายได้แก่ คอมพิวเตอร์ตั้งโต๊ะ (Desktop computer) คอมพิวเตอร์วางตัก (Laptop computer) เครื่องอ่านพิกัด (Tablet) สมาร์ทโฟน (Smart phone) และเครื่องพิมพ์ (Printer) ดังรูปที่ 1.1(ก) เมื่อเวลาผ่านไปผู้คนมีความต้องการใช้งานหลากหลายมากขึ้น ทำให้โครงข่ายไร้สายได้ถูกพัฒนาไปหลายรูปแบบจนทำให้เกิดเป็นโครงข่ายแอดฮอก)Ad Hoc network) ขึ้น ซึ่งโครงข่ายแอดฮอกเป็นหนึ่งในโครงข่ายไร้สายที่ไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์เชื่อมต่ออื่นใด อีกทั้งเป็นโครงข่ายที่อุปกรณ์สื่อสารเคลื่อนที่ได้อิสระ โดยสามารถทำงานในลักษณะคล้ายกับอุปกรณ์จัดหาเส้นทาง)Router) ซึ่งลูกข่ายเคลื่อนที่ (Mobile node) จะเคลื่อนที่ด้วยทิศทางและความเร็วที่ไม่มีรูปแบบซึ่งส่งผลให้ทอพอโลยีไร้สายของโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทั้งยังสามารถจัดการติดต่อสื่อสารกันเองได้ โครงข่ายแอดฮอกจึงไม่มีการควบคุมจากส่วนกลาง)Decentralized or Non-centralized) ดังรูปที่ 1.1(ข) ดังนั้นอุปกรณ์สื่อสารจะถูกออกแบบให้สามารถรับและส่งข้อมูลต่อๆกันแบบหลายฮอป (Multi-hop) ซึ่งส่งข้อมูลผ่านโนดข้างเคียง)Neighbor node) จึงทำให้โนดต้นทาง (Source node) และโนดปลายทาง (Destination node) สามารถอยู่ไกลกันได้ตราบเท่าที่มีโนดข้างเคียงคอยเป็นตัวกลางการส่งข้อมูลให้อยู่ เพื่อรองรับขนาดพื้นที่ที่กว้างขึ้นของโครงข่าย ทำให้โครงข่ายแอดฮอกมีระยะการเชื่อมต่อไกลกว่าโครงข่ายไร้สายแบบการเข้าถึงจุด (Access point) จึงทำให้โครงข่ายแอดฮอกเป็นโครงข่ายที่ดีและเหมาะสมที่จะถูกนำมาประยุกต์กับอากาศยานซึ่งเป็นลูกข่ายเคลื่อนที่ความเร็วสูง ยกตัวอย่างการใช้แอดฮอกในชีวิตประจำวันจากสมาร์ทโฟนเช่นนาย ก เป็นคนที่ใช้สมาร์ทโฟนซึ่งต้องการแบ่งสัญญาณอินเทอร์เน็ตจากมือถือตัวเองให้กับเพื่อนรอบข้าง นาย ก จึงเพียงแค่เปิดการใช้งานจุดส่งส่วนบุคคล (Personnel hotspot) ที่มือถือตัวเอง เพียงเท่านี้เพื่อนรอบข้างที่อยู่ในระยะการส่งสัญญาณของมือถือนาย ก ก็สามารถเล่นอินเทอร์เน็ตที่นาย ก ปล่อยสัญญาณออกมาได้แล้ว เป็นต้น

เนื่องจากสมาร์ทโฟนมีกำลังส่งไม่สูงจึงทำให้ระยะการเชื่อมต่อไม่ไกลนัก ดังนั้นจึงได้มีผู้ริเริ่มทดลองและพัฒนาโครงข่ายแอดฮอกเพื่อลูกข่ายเคลื่อนที่ (Mobile Ad hoc Network; MANET) [4] เป็นการพัฒนาโครงข่ายแอดฮอกให้สามารถนำมาใช้ติดตั้งกับลูกข่ายเคลื่อนที่ ซึ่งลูกข่ายเคลื่อนที่ยังคงสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ระหว่างการเคลื่อนที่ โดยลูกข่ายเคลื่อนที่ที่นำมาประยุกต์ใช้กับ MANET นี้เช่น ยานพาหนะ เรือ อากาศยาน เป็นต้น ซึ่งการนำโครงข่ายแอดฮอกมาประยุกต์เข้ากับลูกข่าย

เคลื่อนที่ใดในสภาวะแวดล้อมไหนนั้นขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ในการทำการวิจัย โดยทั่วไปสภาพแวดล้อมและธรรมชาติของลูกข่ายเคลื่อนที่แต่ละแบบจะไม่เหมือนกันทั้งการเคลื่อนที่ ความเร็วหรือแม้กระทั่งระยะห่างระหว่างโนดแต่ละโนด จากงานวิจัยที่ผ่านมา [5] โครงข่ายแอดฮอกเพื่อยานพาหนะ (Vehicular Ad Hoc Network; VANET) ดังรูปที่ 1.2 (ก) ซึ่งยานพาหนะจะมีลักษณะที่จำเพาะเช่น วิ่งเป็นเส้นตรงตามถนนที่มีแยกตัด มีปริมาณลูกข่ายรอบข้างเป็นจำนวนมาก เป็นต้น ยิ่งเมื่อจำลองจากถนนในเมืองใหญ่ที่มีการจราจรติดขัดด้วยแล้วยิ่งไม่ต้องกล่าวถึง บางงานวิจัยได้นำโครงข่ายแอดฮอกไปประยุกต์ร่วมกับลูกข่ายที่เป็นเรือดังรูปที่ 1.2(ข) การจำลองเส้นทางของเรือก็จะแตกต่างออกไปจากยานพาหนะ เพราะบนน้ำไม่มีเส้นทางกำหนดไว้แน่ชัด และเนื่องจากระยะเวลาในการเดินเรือนั้นนานกว่ายานพาหนะทำให้ลูกข่ายเคลื่อนที่รอบข้างก็จะมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับลูกข่ายเคลื่อนที่ของ VANET



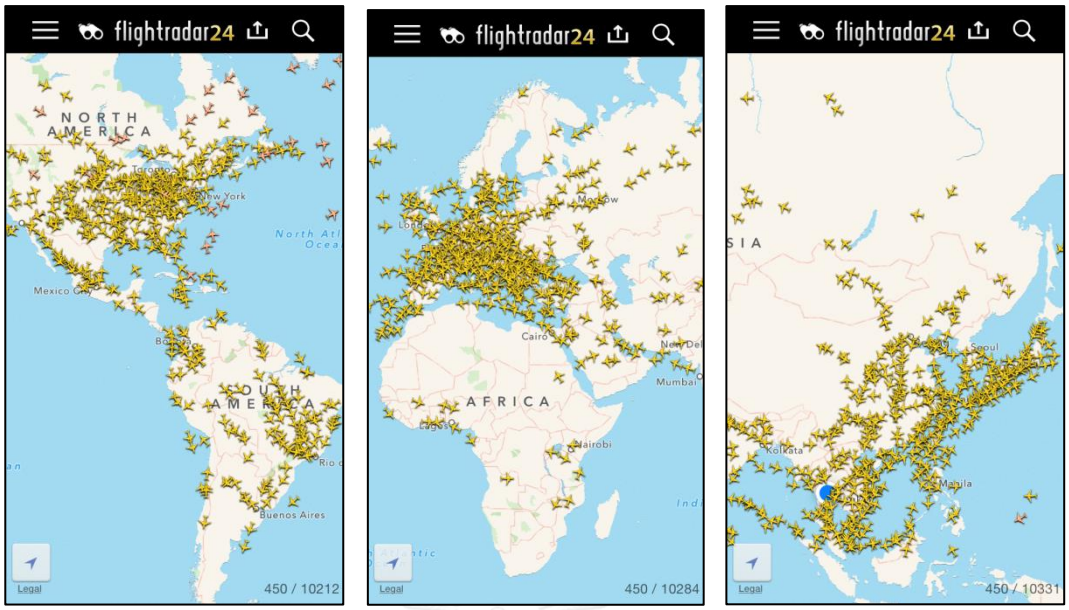
รูปที่ 1.2 (ก) โครงข่ายแอดฮอกสำหรับยานยนต์[3] (ข) โครงข่ายแอดฮอกสำหรับเรือ

หากพิจารณากรณีที่ต้องการให้อากาศยานสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ การนำเทคโนโลยีแอดฮอกมาใช้จึงเหมาะสมกับสถานการณ์ที่มีโนดในระบบเป็นอากาศยานซึ่งถูกเรียกว่า โครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยาน (Aeronautical Ad hoc Network; AANET) [6-7] ซึ่งปัจจุบันการเติบโตของอุตสาหกรรมการบินเป็นไปอย่างรวดเร็วก่อให้เกิดเส้นทางการบิน (Flight path) ขึ้นมากมาย การจราจรทางอากาศ (Air traffic) เริ่มคับคั่ง ทำให้การติดต่อสื่อสารระหว่างนักบินและผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศ (Air traffic controller: ATC) มีมากขึ้นในแต่ละช่วงเวลา โดยปกติจะมีการติดต่อสื่อสารระหว่างนักบินกับผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศในการขอหรือให้ข้อมูลเพื่อลด (Descend) หรือไต่ (Climb) ระดับความสูง ลดหรือเพิ่มระดับความเร็ว รวมถึงการขออนุญาตขึ้น (Take-off clearance) หรือลงสนามบิน (Landing clearance) อยู่แล้วในทุกครั้งที่อากาศยานต้องการเปลี่ยนความสูง ทิศทางหรือแม้แต่ความเร็ว การติดต่อสื่อสารนี้ในปัจจุบันยังคงใช้คลื่นวิทยุช่วงความถี่ VHF(Very High Frequency) ตั้งแต่ 118-137 เมกะเฮิรตซ์ สำหรับอากาศยานพาณิชย์ทั่วไปและคลื่นความถี่ UHF(Ultra-High Frequency) ตั้งแต่ 225-400 เมกะเฮิรตซ์ ที่หน่วยงาน

ทหารและตำรวจนิยมมีไว้ใช้สำรองและต้องเป็นการติดต่อสื่อสารทั้งสองทาง (Two-way communication) ซึ่งเวลาเดียวกันผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศหนึ่งท่านสามารถควบคุมอากาศยานในบริเวณที่รับผิดชอบได้หลายลำ ขณะที่ผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศจะได้ครอบครองคลื่นวิทยุหนึ่งความถี่ในบริเวณที่ตนรับผิดชอบ เมื่ออากาศยานบินผ่านบริเวณของผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศท่านใด อากาศยานต้องเปลี่ยนความถี่ตามที่ได้กำหนดไว้ ด้วยเหตุนี้เมื่อถึงชั่วโมงการจราจรคับคั่ง (Busy hour) นักบินจากอากาศยานหลายลำที่ใช้ความถี่เดียวกันอาจส่งข้อมูลเสียงเพื่อติดต่อกับผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศพร้อมๆกัน แต่ทว่าการส่งข้อมูลแต่ละครั้งผู้ส่งและผู้รับห้ามส่งข้อมูลในเวลาเดียวกันเนื่องจากเป็นการส่งแบบการสื่อสารสองทางครึ่งอัตรา (Half-duplex) แต่หากทั้งผู้ส่งและผู้รับเกิดส่งข้อมูลมาในเวลาเดียวกัน ข้อมูลจากทั้งคู่จะรบกวนกัน (Jam) ทำให้ไม่สามารถรับข้อมูลจากฝ่ายใดฝ่ายหนึ่งได้เลย ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายในช่วงเวลาที่สำคัญของการบินได้ เช่น การขึ้น-ลงสนามบิน การไต่-ลดระดับความสูง ฯลฯ ทำให้นักบินได้ยินคำสั่งผิดพลาดหรือไม่ได้ยินเลยและผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศอาจได้ยินการทวนคำสั่งจากนักบินไม่ครบซึ่งนำไปสู่การเข้าใจผิดว่านักบินเข้าใจตามที่ตนได้สั่งแล้ว เช่น จากที่ควรลดระดับกลายเป็นไต่ระดับหรือจากที่ควรจะได้ลงสนามบินกลายเป็นบินวนไปรอลงใหม่ (Go around) ซึ่งภาษาที่ใช้ในการพูดคุยกันทางด้านการบินใช้ภาษาอังกฤษ ซึ่งศัพท์บางคำหากพูดไม่ชัดเจนอาจทำให้เข้าใจเป็นอีกคำที่ความหมายตรงกันข้ามกันได้ นอกจากอันตรายแล้วยังเกิดความเสียหายซึ่งอาจไปเพิ่มต้นทุนให้สายการบิน เช่น ค่าน้ำมัน เป็นต้น ซึ่งในกรณีนี้บางสนามบินได้หันมาใช้การติดต่อสื่อสารเป็นข้อมูล (Controller-Pilot Data-Link Communication; CPDLC) ซึ่งใช้ตัวหนังสือเป็นสื่อกลาง แต่ยังไม่แพร่หลายนักเนื่องจากการกดแป้นพิมพ์มีความล่าช้ากว่าการสั่งด้วยเสียงอยู่มาก นอกจากนี้ในการคุยกันด้วยเสียงในยามปกตินักบินไม่นิยมติดต่อกันเองโดยตรงเพราะทำให้การสื่อสารระหว่างผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศกับนักบินลำอื่นถูกขัดขวางไปด้วย แต่มียกเว้นในบางกรณี เช่น ขณะเกิดเหตุฉุกเฉิน อาจเป็นในกรณีเครื่องยนต์ใดเครื่องยนต์หนึ่งดับ (Engine shutdown) นักบินอีกลำที่สามารถให้ความช่วยเหลือได้ดีกว่าผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศ กรณีนี้นักบินจะถูกอะลุ่มอล่วยให้ติดต่อกันได้โดยตรงซึ่งเป็นหนึ่งในสถานการณ์ที่ทำให้ผู้วิจัยเกิดแนวคิดที่นำโครงข่ายแอดฮอกมาประยุกต์ใช้กับอากาศยาน

ในกรณีที่โนดต้องการติดต่อสื่อสารกันในโครงข่ายแอดฮอก เนื่องจากไม่มีตัวกลางในการควบคุมจัดเส้นทาง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงสนใจการจัดสรรเส้นทาง (Routing) ให้กับการส่งข้อมูลเพื่อให้เพิ่มประสิทธิภาพและเหมาะสมกับสภาพโครงข่ายแอดฮอกมากที่สุด โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกอากาศยานพาณิชย์เป็นลูกข่ายเคลื่อนที่ในโครงข่ายแอดฮอก เนื่องจากอากาศยานพาณิชย์มีจำนวนมากในยุคโลกาภิวัฒน์การเดินทางไปเยือนต่างแดนไม่ว่าไกลแค่ไหนผู้คนสามารถเดินทางได้โดยอากาศยานพาณิชย์เหล่านี้ซึ่งในอนาคตจำนวนอากาศยานมีแนวโน้มสูงขึ้นอย่างมาก โดยเมื่อต้นปี

2015 ที่ผ่านมานี้มีสายการบินหนึ่งได้สั่งอากาศยานเข้ามาเพิ่มอีกกว่าหนึ่งร้อยลำทำให้เห็นได้ว่าจำนวนอากาศยานของอนาคตอันใกล้นี้จะมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ยิ่งปัจจุบันปริมาณการเข้าถึงอินเทอร์เน็ตที่มีอย่างต่อเนื่องและมีแนวโน้มสูงขึ้นเป็นอย่างมากโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับผู้โดยสารที่ต้องนั่งบนอากาศยานเป็นระยะเวลานาน ทำให้เกิดความต้องการเข้าถึงอินเทอร์เน็ตบนท้องฟ้าหรือบนอากาศยานเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องเช่นกัน จากอดีตที่เคยมีการห้ามให้ใช้โทรศัพท์มือถือคอมพิวเตอร์วางตักและเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ทุกชนิด แต่ปัจจุบันกลับกลายเป็นสามารถใช้เครื่องมือสื่อสารได้ยกเว้นในช่วงวิ่งขึ้นและร่อนลงเท่านั้น ปัจจุบันจึงได้มีการพัฒนาการติดต่อสื่อสารระหว่างอากาศยานขึ้นมากมาย ทั้งนี้ความเร็วของอากาศยานและความกว้างของเขตการบินเป็นความท้าทายที่สำคัญของโครงข่ายที่มองข้ามไม่ได้ จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่าน 6], 7[มาพบว่า ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันอากาศยานสามารถติดต่อสื่อสารโดยใช้ดาวเทียมเป็นตัวกลางได้แต่มีค่าใช้จ่ายสูงและมีการประวิงเวลาการส่งอยู่มาก โครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานจึงเป็นที่สนใจ โดย NEWSKY[8] พยายามรวมระบบการสื่อสารหลายระบบเข้าด้วยกัน เนื่องจากการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีภาคพื้นกับดาวเทียมและการสื่อสารระหว่างอากาศยานกับสถานีภาคพื้น แต่เดิมจะใช้ ATM/ATC (Air Traffic Management / Air Traffic Control) ดังนั้น หากทำการรวมทุกระบบแล้วจะสามารถพัฒนาให้อากาศยานและผู้โดยสารสามารถทำการติดต่อสื่อสารได้ ไม่ใช่เพียงแต่ผู้ควบคุมการจราจรทางอากาศดังที่ผ่านมาเท่านั้น อย่างไรก็ตามยังมีบางปัญหาที่ยังคงท้าทายให้ผู้วิจัยได้ค้นคว้าและพัฒนาอีกต่อไปเช่น การจัดเส้นทางเพื่อส่งข้อมูลของอากาศยานในโครงข่ายแอดฮอก เนื่องจากอากาศยานเป็นลูกข่ายเคลื่อนที่ที่มีความเร็วสูง โดยมีความเร็วตั้งแต่ 800 ถึง 1000 กิโลเมตรต่อชั่วโมงซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ตลอดเวลา ดังนั้นหากไม่พิจารณาเส้นทางการบินร่วมด้วยแล้วทอพอโลยีของโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานจะไม่มีความเสถียร อีกทั้งความหนาแน่นของจำนวนอากาศยานที่อยู่ระหว่างการเดินทางบนเส้นทางการบินในบริเวณต่างๆไม่สม่ำเสมอ บางบริเวณมีเส้นทางการบินหนาแน่นมาก อย่างเช่น ทวีปยุโรป ทวีปอเมริกาเหนือ เอเชียตะวันออก เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เอเชียกลางและทวีปออสเตรเลีย ดังรูปที่ 1.3 ในขณะที่ในบางทวีปและบางพื้นที่มีเส้นทางการบินน้อย เช่น ทวีปแอฟริกา พื้นที่ภูเขา พื้นที่น้ำแข็ง เป็นต้น ทำให้เกิดความหนาแน่นของจำนวนอากาศยานที่อยู่ระหว่างการเดินทางบนเส้นทางการบินต่ำ ก่อให้เกิดการส่งข้อมูลด้วยแนวทางการเชื่อมต่อแบบแอดฮอกผ่านบริเวณพื้นที่เหล่านี้มีปัญหาในเรื่องของการเชื่อมต่อระหว่างอากาศยานรวมถึงการประวิงเวลากรณีที่ไม่มีอากาศยานข้างเคียงมาเป็นตัวส่งต่อข้อมูลไปยังโนดปลายทาง



รูปที่ 1.3 ภาพจากโปรแกรมประยุกต์ไฟล์ทเรดาร์24 ณ วันที่ 2 มิย.58 เวลา 17.05 น.
(ก) อากาศยานเหนือน่านฟ้าทวีปอเมริกา (ข) อากาศยานเหนือน่านฟ้าทวีปยุโรป
(ค) อากาศยานเหนือน่านฟ้าทวีปเอเชียตะวันออก

ในการนี้ปัญหาการจัดเส้นทางการส่งข้อมูลโดยมีอากาศยานเป็นลูกข่ายเคลื่อนที่เพื่อเพิ่มโอกาสที่จะส่งข้อมูลได้สำเร็จจึงเป็นเรื่องสำคัญ หากพิจารณาโพรโทคอลการจัดเส้นทางที่มีอยู่ของโครงข่ายแอดฮอกเพื่อลูกข่ายเคลื่อนที่ (MANET) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 แบบได้แก่ โพรแอคทีฟ (Proactive) รีแอคทีฟ (Reactive) และไฮบริด (Hybrid) โดยการจัดเส้นทางแบบโพรแอคทีฟ เป็นการเก็บข้อมูลเส้นทางการส่งทั้งหมดไว้ในตารางข้อมูลซึ่งมีการปรับปรุงตารางข้อมูลตามช่วงเวลาที่กำหนด ทำให้สามารถส่งข้อมูลไปยังโนดปลายทางได้ทันทีที่ต้องการ โดยพยายามที่จะรักษาและปรับข้อมูลเส้นทางในทุกโนดและเนื่องจากวิธีการแบบโพรแอคทีฟมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลตลอดช่วงระยะเวลาโดยไม่จำเป็นต้องมีการร้องขอจากโนดใดๆจึงทำให้เกิดโอเวอร์เฮดมาก ตัวอย่างโพรโทคอลแบบโพรแอคทีฟ เช่น GSR (Global State Routing)[8] และ DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector)[9] สำหรับการค้นหาเส้นทางแบบรีแอคทีฟนั้นเป็นการค้นหาเส้นทางการรับส่งข้อมูลไปยังโนดปลายทางก็ต่อเมื่อมีความต้องการจะส่งข้อมูล ซึ่งใช้การแลกเปลี่ยนแพ็คเกตร้องขอเส้นทางกับแพ็คเกตตอบรับเส้นทาง โดยส่งแพ็คเกตร้องขอเส้นทางแพร่กระจายครอบคลุมโนดข้างเคียงและจะสร้างเส้นทางแบบทันทีเมื่อถูกร้องขอจากโนดต้นทางไปโนดปลายทาง ทำให้มีโอเวอร์เฮดต่ำกว่าวิธีการแบบโพรแอคทีฟ ดังนั้นการจะลดจำนวนโอเวอร์เฮดในโพรโทคอลรีแอคทีฟได้จะต้องการลดจำนวนครั้งในการร้องขอเส้นทางให้น้อยที่สุด โดยโพรโทคอลรีแอคทีฟเหมาะสำหรับโครงข่ายที่ทอพอโลยีเปลี่ยนแปลงบ่อยๆ เนื่องจากจะมีการสร้างเส้นทางก็ต่อเมื่อถูกร้องขอเท่านั้น

ตัวอย่างโพรโทคอลในรูปแบบของรีแอคทีฟนั้นเช่น DSR (Dynamic Source Routing Protocol) [10] และ AODV (Ad Hoc On-Demand Distance Vector Protocol)[11] ทางด้านการค้นหาเส้นทางแบบ Hybrid นำข้อดีของทั้งสองโพรโทคอลคือ โพรแอคทีฟและรีแอคทีฟมารวมกันเพื่อปรับปรุงการค้นหาเส้นทางเช่น โพรโทคอล ZRP (Zone Routing Protocol)[12] จะมีการแบ่งโซนให้ใช้การหาเส้นทางแบบรีแอคทีฟกับโพรแอคทีฟสลับกันไปและ LAR (Location Aide Routing)[13] เป็นโพรโทคอลที่ใช้ตำแหน่งข้อมูลสำหรับเส้นทางฟังก์ชันมีลักษณะการทำงานเหมือนโพรโทคอล DSR แต่ใช้ข้อมูลตำแหน่งเพื่อจำกัดพื้นที่เส้นทางในการร้องขอแบบกระจายทั่ว (Flooding) เนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้สนใจในการประยุกต์ใช้งานสื่อสารสำหรับอากาศยานเชิงพาณิชย์ที่มีข้อมูลเส้นทางการบินที่แน่นอน รวมทั้งข้อมูลความหนาแน่นของอากาศยานในแต่ละพื้นที่ว่ามีความหนาแน่นมากหรือน้อย แต่ปัจจุบันมีสายการบินมากมายเปิดให้บริการในแต่ละวันรวมทั้งสนามบินแต่ละแห่งมีความพร้อมในการรองรับจำนวนอากาศยานในแต่ละช่วงเวลาไม่เท่ากันส่งผลให้เกิดความล่าช้าของอากาศยานในการให้บริการ ทั้งจากการบินวนเพื่อขอลงจอดและการหยุดรอเพื่อขอบินขึ้น ด้วยเหตุนี้การกำหนดเวลาที่แน่นอนของอากาศยานจึงเป็นไปได้ยาก นอกเหนือจากนี้อากาศยานมีความเร็วสูงทำให้ทอพอโลยีของโครงข่ายเปลี่ยนบ่อย การที่โพรโทคอลรีแอคทีฟทำการค้นหาเส้นทางก็ต่อเมื่อมีความต้องการจะทำให้โครงข่ายลดภาระในการทำงานหาเส้นทางรวมทั้งลดโอเวอร์เฮดลงได้ ส่งผลให้การจัดเส้นทางการบินในวิทยานิพนธ์นี้เลือกการจัดเส้นทางแบบรีแอคทีฟซึ่งเป็นการจัดเส้นทางเมื่อมีความต้องการสื่อสาร แทนการจัดเส้นทางแบบโพรแอคทีฟซึ่งเป็นการจัดเส้นทางไว้แล้ว และเมื่อใดมีการติดต่อก็ใช้เส้นทางได้เลย

โพรโทคอลจัดเส้นทางส่วนใหญ่ในงานวิจัยจะพัฒนามาจากโพรโทคอลจัดหาเส้นทางใน MANET ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้เลือกใช้โพรโทคอล AODV ซึ่งเป็นโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางพื้นฐานที่ได้รับการยอมรับจากทั่วโลกในการนำมาใช้ค้นหาเส้นทางกับโนดเคลื่อนที่ในโครงข่ายแอดฮอกซึ่ง AODV นี้มีการปรับเปลี่ยนสถานะของเส้นเชื่อมได้เร็วมีการใช้การประมวลผลและโอเวอร์เฮดต่ำกว่าโพรโทคอลแบบโพรแอคทีฟ อีกทั้งยังสามารถบ่งชี้เส้นทางไปยังปลายทางได้อีกด้วยและเพื่อไม่ให้เกิดวงวน (Loop) จึงมีการใช้ลำดับหมายเลขของปลายทาง (Destination Sequence Number; DSN) ตลอดเวลาการสร้างเส้นทางอีกทั้งยังมีการหลีกเลี่ยงการเกิดปัญหาเช่น การนับไม่รู้จบ (Counting to infinity) ดังนั้นจึงมีผู้นำ AODV ไปประยุกต์ใช้กับโครงข่ายแอดฮอกแบบต่างๆ รวมทั้งในวิทยานิพนธ์นี้ด้วย

จากที่กล่าวมาข้างต้น โพรโทคอลจัดหาเส้นทางส่วนมากได้เน้นไปที่การจัดเส้นทางที่เป็นไปได้จากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทาง โดยมิได้คำนึงถึงคุณภาพการบริการ ดังนั้นจึงได้มีการริเริ่มการวิจัยเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพด้านคุณภาพการบริการ (Quality of Service; QoS) ของโพรโทคอล

จัดสรรเส้นทางเพื่อหาเส้นทางที่เหมาะสมกับทรัพยากรที่มีอยู่ให้มีคุณภาพตามข้อจำกัดที่กำหนด ซึ่ง [14, 15] แสดงให้เห็นว่า มีงานวิจัยที่ให้ความสนใจในเกี่ยวกับ QoS ซึ่งโพรโทคอลเหล่านี้จะเน้นการประมาณค่าแบนด์วิดท์ (Bandwidth) การประมาณค่าการประวิงเวลา (Time delay) การค้นหาเส้นทา (Route discovery) การบำรุงรักษาเส้นทาง (Route maintenance) และการเลือกเส้นทาง (Route selection) โดยโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานมีบทความที่ศึกษาอายุของข่ายเชื่อมโยง [16, 17] เพื่อเป็นการตระหนักถึงคุณภาพของการบริการในการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลการจัดเส้นทาง ซึ่ง [16] ได้ศึกษาช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงโดยอาศัยการประมาณค่าของตัวกรองคาลมาน (Kalman Filter) และคุณสมบัติของสัญญาณ เช่น RSSI (Received Signal Strength Indication) ซึ่งเป็นการวัดกำลังของสัญญาณที่ตัวรับได้รับเพื่อให้เส้นทางที่ถูกเลือกมีความเสถียรมากขึ้น แต่เนื่องจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะประมาณค่าช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงโดยที่สมมติว่ารู้ระยะการส่งของโนด อย่างไรก็ตามในงานวิจัย [17] ได้ประมาณค่าข่ายเชื่อมโยงจากมุมมองสามมิติ โดยใช้ค่าของระยะการส่งของโนดเคลื่อนที่จากโปรแกรม ADS-B เนื่องจากระยะการส่งจะหาได้จากสัญญาณรบกวน (Noise) การรบกวนสัญญาณ (Interference) และกำลังในการส่ง (Transmission power) ทำให้การประมาณค่าช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงนี้มีความยืดหยุ่นในการประยุกต์ใช้งาน นอกจากนี้ยังใช้การประมาณช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงนี้เป็นตัวบ่งชี้สถานะของข่ายเชื่อมโยงได้ ซึ่งได้แบ่งเป็น 4 สถานะ ได้แก่ ไม่เสถียร (Unstable) ทางเดียว (One way) สองทาง (Two way) และการสูญเสีย (Loss) ทำให้สามารถลดจำนวนครั้งการอัพเดตของข่ายเชื่อมโยงลงไปได้อีกด้วย แต่เนื่องจากอัลกอริทึมช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยง ได้ถูกใช้งานเสมือนเป็นโพรโทคอลโพรแอคทีฟชนิดหนึ่ง ซึ่งไม่เหมาะกับโครงข่ายที่มีทอพอโลยีเปลี่ยนแปลงบ่อย เนื่องจากเปลืองโอเวอร์เฮดและเสียเวลาในการหาเส้นทางใหม่หากเส้นเชื่อมขาดการเชื่อมต่อบ่อยครั้ง ดังนั้นจึงได้นำช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงมาประยุกต์ใช้กับโพรโทคอลรีแอคทีฟในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนออัลกอริทึม (Algorithm) การจัดสรรเส้นทางสำหรับโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์ โดยวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางนี้เพื่อหาเส้นทางการส่งข้อมูลจากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทางโดยคำนึงถึงคุณลักษณะของอากาศยานและขนาดของข้อมูลเป็นสำคัญ โดยอัลกอริทึมการจัดสรรเส้นทางที่นำเสนอได้พัฒนามาจากโพรโทคอลการจัดเส้นทาง AODV ดังนั้นเมื่อมีโนดข้างเคียงซึ่งเป็นตัวส่งต่อข้อมูลหรือรีเลย์ (Relay) อยู่ในระยะการส่งของโนดต้นกำเนิด ข้อมูลจะถูกส่งออกไป แต่ถ้าไม่มีโนดข้างเคียงอยู่ในระยะการส่งข้อมูลจะถูกละทิ้ง แล้วโนดต้นทางเริ่มหาเส้นทางใหม่เพื่อส่งข้อมูลโดยที่มีตัวแปรที่สำคัญ คือ ขนาดของข้อมูล (Data size) และช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงระหว่าง 2 โนด ซึ่งเป็นตัวแปรที่ให้ค่าในการประเมินเส้นทางที่เหมาะสมกับขนาดของข้อมูล ซึ่งคาดการณ์ได้ว่าจะมีอัตราการส่งสำเร็จสูงขึ้น ดังนั้นตัวแปรเหล่านี้จึง

เป็นปัจจัยที่ส่งโดยตรงต่อความสัมฤทธิ์ผลในการส่งข้อมูล กล่าวคือ เมื่อข้อมูลมีขนาดต่างๆกัน โนดต้นทางจำเป็นต้องแจ้งขนาดของข้อมูลที่ส่งให้โนดข้างเคียงเพื่อให้โนดข้างเคียงทำการเปรียบเทียบเวลาที่ต้องใช้ส่งข้อมูลกับเวลาในการเชื่อมต่อว่า เวลาในการเชื่อมต่อมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับเวลาที่ต้องการใช้ส่งข้อมูลที่หรือไม่ หลังจากนั้นจึงคำนวณเพื่อประเมินสมรรถนะค่าเฉลี่ยเวลาประวิงของแพ็คเกต (Average end-to-end packet delay) อัตราสำเร็จการส่งเซสชั่น (Session delivery success rate) และโอเวอร์เฮดเมื่อเทียบกับโพรโทคอลมาตรฐาน AODV ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมการจัดเส้นทางของโพรโทคอลพื้นฐาน AODV ของโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์ บนพื้นฐานข้อมูลจริงของเส้นทางการบิน โดยประยุกต์ใช้ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงในการค้นหาเส้นทางจากโนดต้นทางไปโนดปลายทางเพื่อให้เกิดอัตราการส่งแพ็คเกตที่สำเร็จมากขึ้นและโอเวรอ์เฮดลดลง

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. เพิ่มปัจจัยในการค้นหาเส้นทางได้แก่ ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยง และขนาดของข้อมูล
2. ศึกษาและทำการทดลองการจัดเส้นทางการจัดส่งข้อมูลในระบบ ที่จำลองรูปแบบโครงข่ายจากเส้นทางการบินของน่านฟ้าประเทศไทย เมื่อพิจารณาการจัดเส้นทางของโพรโทคอล AODV
3. ศึกษาและทำการทดลองการจัดเส้นทางการจัดส่งข้อมูลในระบบที่จำลองเส้นทางการบินจากข้อมูลจริง ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในน่านฟ้าประเทศไทย เมื่อเพิ่มปัจจัยช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงในการเลือกเส้นทาง
4. ไม่พิจารณาอากาศยานที่กำลังบินขึ้น ร่อนลง และจอดนิ่ง
5. ใช้โปรแกรมแมทแลบ (MATLAB) เพื่อประเมินสมรรถนะของการจัดเส้นทางที่นำเสนอ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำอัลกอริทึมที่ได้นำเสนอไปประยุกต์ใช้ในการรับ-ส่งข้อมูลในโครงข่ายแอดฮอกอากาศยานเชิงพาณิชย์ เพื่อให้มีคุณภาพการบริการที่ดีขึ้น รวมทั้งยังสามารถนำอัลกอริทึมที่นำเสนอไปปรับใช้กับโครงข่ายอื่นได้ในอนาคต

1.5 ประมวลวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำ: กล่าวถึงลักษณะทั่วไปของโครงข่ายแอดฮอก ที่มาและความสำคัญในการวิจัยโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์ รวมไปการแก้ปัญหาของงานวิจัยที่ผ่านมา

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี: กล่าวถึงหลักการการพิจารณาโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์ ธรรมชาติของอากาศยานเชิงพาณิชย์ หลักการทำงานของโพรโทคอลพื้นฐานAODV

บทที่ 3 อัลกอริทึมที่นำเสนอ: การประยุกต์ใช้งานช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงในการพิจารณาเลือกเส้นทางการส่งข้อมูลในโพรโทคอลพื้นฐาน AODV

บทที่ 4 ผลการทดลอง: ประมวลผลการทดลองและการวิเคราะห์

บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ: สรุปงานวิจัยทั้งหมดในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้และเสนอแนวทางในการพัฒนางานวิจัยในอนาคต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์นั้นได้มีการประยุกต์มาจากโครงข่ายแอดฮอกเพื่อลูกข่ายเคลื่อนที่ อีกทั้งคุณลักษณะจำเพาะบางอย่างของอากาศยานพาณิชย์ทำให้สิ่งแวดล้อมในการจำลองเหตุการณ์ไม่เหมือนกันเช่น ทิศทางการเคลื่อนที่คาดเดาได้ ความเร็วสูงแต่คงที่เพราะอยู่ในช่วงระดับบิน เป็นต้น ทั้งนี้ในปัจจุบันได้มีผู้วิจัยนำเสนองานวิจัยโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานและ/หรือเพื่อการบินอยู่พอสมควรจึงทำให้โครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์ได้ถูกค้นคว้าวิจัยมากขึ้นเพื่อพัฒนาให้อำนวยความสะดวกแก่ผู้ให้บริการ

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องที่วิทยานิพนธ์นี้นำมาประยุกต์ใช้กับงานนี้มีอยู่หลายหลักการและทฤษฎีด้วยกันซึ่งได้แก่ หลักการทั่วไปของโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์ โพรโทคอลพื้นฐาน AODV ทฤษฎีกราฟและหลักการทำงานของอุปกรณ์บนอากาศยานเชิงพาณิชย์ (Automatic dependent surveillance; ADS-B) โดยจะกล่าวถึงการทำงานของโพรโทคอลพื้นฐาน AODV อย่างละเอียด เนื่องจาก AODV มีการแบ่งการทำงานหลักออกเป็นสามส่วน ได้แก่ การค้นหาเส้นทาง การตอบกลับและความผิดพลาดของการเชื่อมต่อของเส้นเชื่อม ซึ่งแต่ละส่วนจะมีการอธิบายให้ได้เข้าใจกันมากขึ้น และเนื่องจากวิทยานิพนธ์นี้ได้นำช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงของงานวิจัยที่ผ่านมาเข้ามาวิเคราะห์หาเวลาที่อากาศยานพาณิชย์สองลำจะสามารถติดต่อกันได้โดยคำนึงถึงความเร็วและทิศทาง ซึ่งทอพอโลยีของอากาศยานนั้นได้ถูกมองเป็นกราฟซึ่งมีส่วนประกอบได้แก่ จุดและเส้นเชื่อมโดยที่อากาศยานพาณิชย์แต่ละลำติดตั้งอุปกรณ์ ADS-B ทำให้อากาศยานลำหนึ่งๆทราบพิกัดและความเร็วของอากาศยานลำอื่นๆที่อยู่ในระยะการรับ-ส่งได้

บทที่ 2 นี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็นหัวข้อดังนี้

2.1 บทความที่เกี่ยวข้อง

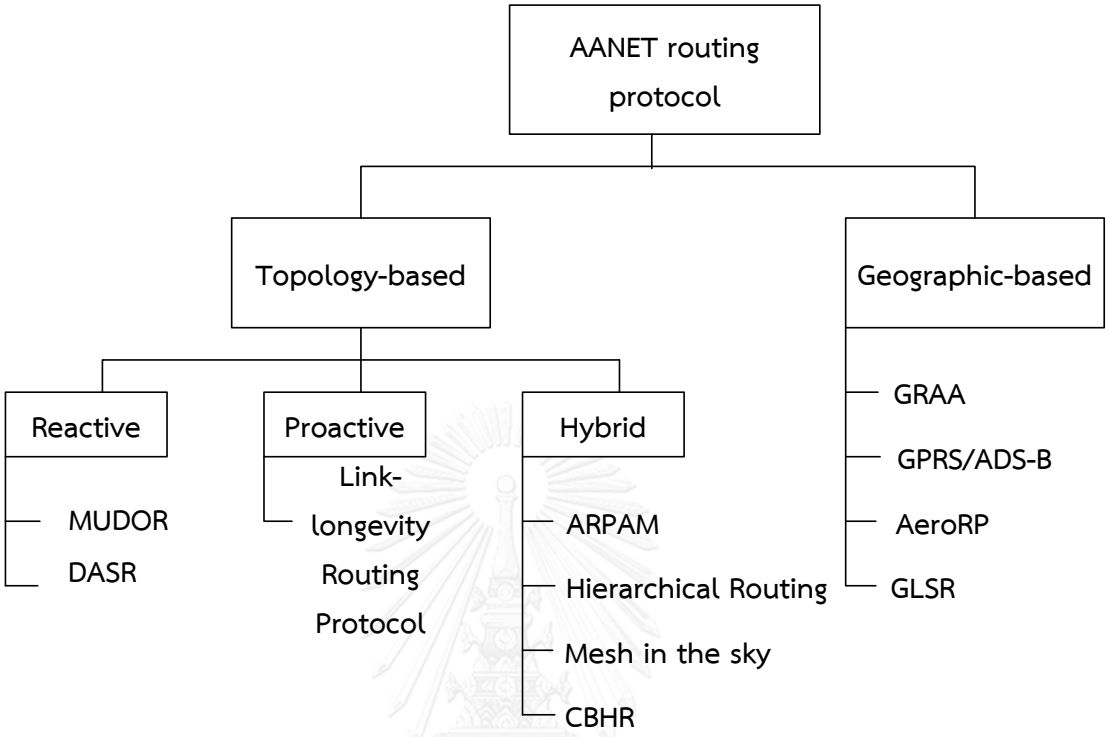
2.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์บนอากาศยานเชิงพาณิชย์

2.3 โครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์

2.4 ทฤษฎีกราฟ

2.5 โพรโทคอลจัดสรรเส้นทางพื้นฐาน AODV

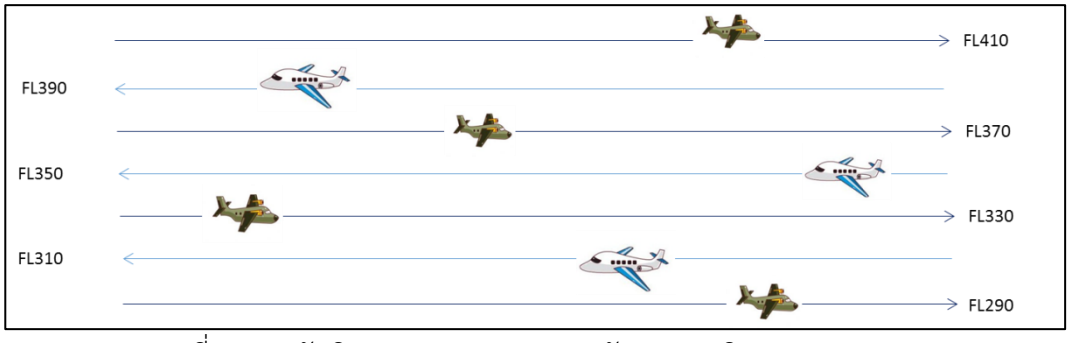
2.1 บทความที่เกี่ยวข้อง



รูปที่ 1.3 แผนภาพจำแนกประเภทของโพรโทคอลจัดหาเส้นทางต่างๆ[18]

ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันมีผู้วิจัยโพรโทคอลการจัดหาเส้นทางสำหรับโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานขึ้นมาดังรูปที่ 1.3 ซึ่ง ARPAM (Ad-hoc Routing Protocol for Aeronautical Mobile Ad-hoc Network)[19] เป็นโพรโทคอลที่พัฒนามาจากโพรโทคอลมาตรฐานของ MANET เป็นแบบไฮบริดซึ่งใช้งานทั้งแบบรีแอคทีฟและโพรแอคทีฟ ซึ่งใช้ทั้ง AODV และ TBRPF (Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding) ควบคู่กันไป โดย ARPAM จะถูกเรียกใช้ต่อเมื่ออากาศยานลำหนึ่งต้องการสื่อสารกับอากาศยานอีกลำหนึ่งแต่โนดหลัก (Backbone node) (ได้แก่ สนามบิน ดาวเทียม และอากาศยานบนชั้นบรรยากาศสตราโทสเฟียร์ราไม่สามารถให้บริก) หรือกล่าวได้ว่า ARPAM จะถูกใช้เมื่อมีการติดต่อสื่อสารระหว่างอากาศยาน 2 ลำ ซึ่งการสร้างเส้นทางจะมีกลไกการทำงานที่คล้ายกับ AODV โดยข้อความที่ส่งไปของ ARPAM นั้นจะประกอบไปด้วยข้อมูลพิกัดทางภูมิศาสตร์ (Geolocalization information) ซึ่งจำเป็นต่อการหาตำแหน่งของโนดตัวส่ง ณ เวลาที่ส่งเซสชั่นออกไปและจะหาเส้นทางได้เมื่อโนดปลายทางหรือโนดขั้นกลาง (Intermediate node) ได้รับข้อความ ส่วนการใช้ประโยชน์อย่างอื่นจะใช้การทำงานของ TBRPF ที่มีหลักการทำงานแบบโพรแอคทีฟที่จะมีการคงสภาพเส้นทางไว้อย่างน้อยหนึ่งเส้นทาง จึงถือว่า

ARPAM เป็นโพรโทคอลแรกๆที่พัฒนาโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานโดยเฉพาะ นอกเหนือจากยังคำนึงถึงสภาพแวดล้อมของโครงข่ายที่ลูกข่ายมีความเร็วสูงอีกด้วย แต่เมื่อไรก็ตามที่ขนาดของข้อมูลที่ต้องการส่งมีขนาดเกินกว่าที่การเชื่อมต่อจะส่งให้ครบได้ โพรโทคอล ARPAM จะไม่สามารถส่งข้อมูลได้สมบูรณ์เลย ทำให้เกิดการศึกษาการเชื่อมต่อของข่ายเชื่อมโยงขึ้นมา [22-20] ซึ่งเป็นบทความที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการเชื่อมต่อสำหรับโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยาน (Connectivity for AANET) ที่ล้วนวิเคราะห์สมการการเชื่อมต่อของโนด โดย [20] ได้วิเคราะห์สมการการเชื่อมต่อของอากาศยานเมื่อมีเส้นทางบินเส้นเดียว ซึ่งอากาศยานบินในทิศทางเดียวอย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปไม่ได้ที่อากาศยานจะบินในทิศทางเดียว ทำให้เกิดงานวิจัย [21] ซึ่งได้พัฒนาและวิเคราะห์ออกแบบสมการการเชื่อมต่อขึ้นมา โดยต้นแบบเส้นทางการบินได้มีการเคลื่อนที่สองทิศทางนั่นคืออากาศยานในโครงข่ายเคลื่อนที่เข้าหากันทำให้มีความสมจริงมากขึ้น นอกเหนือจากนี้ [22] เป็นงานวิจัยที่สนใจการเชื่อมต่อของอากาศยานเช่นกันแต่รูปแบบของโครงข่ายมีความสมจริงตามหลักการของการบินมากที่สุดเมื่อเทียบกับงานวิจัย[20, 22] เนื่องจากตามหลักการบินสากลของ ICAO (International Civil Aviation Organization) อากาศยานต้องมีระยะความสูงต่างกัน 2,000 ฟุต หากบินในทิศทางตรงข้ามกันหรือสวนกัน ในขณะเดียวกันหากอากาศยานบินตามกันต้องมีความสูงห่างกันถึง 4,000 ฟุตสลับกันไปดังรูปที่ 1.4 (FL290 = Flight Level 29000 นั่นคืออากาศยานบินที่ระดับความสูง 29,000 ฟุต) อย่างไรก็ตามสิ่งที่ได้จากงานวิจัยทั้งสามนั้นคือ สมการความน่าจะเป็นที่วิเคราะห์ความสามารถในการเชื่อมต่อของโนดในโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานที่บอกเพียงว่ามีความน่าจะเป็นในการเชื่อมต่อเท่าใด ซึ่งยังไม่ชัดเจนเมื่อเทียบกับบทความ [17] ซึ่งได้วิเคราะห์สมการเวลาของการเชื่อมต่อระหว่างโนดสองโนดออกมาเมื่อทราบระยะการส่ง ความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ โดยที่รูปแบบของสมการคือโนดสองโนดที่กำลังเคลื่อนที่เข้าหาหรือออกจากกันแล้วนำมาคำนวณเป็นเวลาซึ่งเรียกว่า ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยง (Link-longevity)



รูปที่ 1.4 ระดับบินของอากาศยานตามหลักการการบินสากลของ ICAO

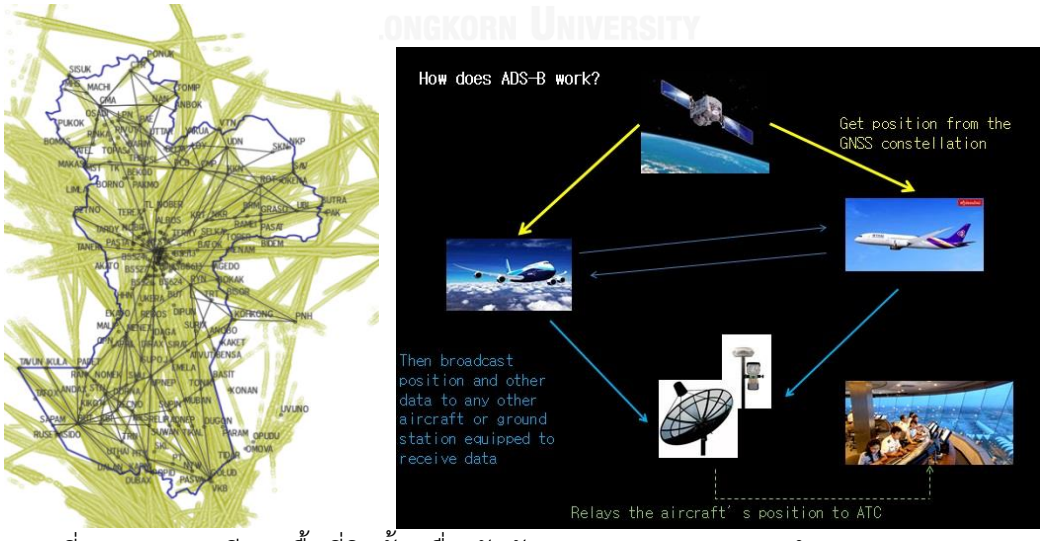
โพรโทคอลจัดสรรเส้นทางช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยง (Link-longevity routing protocol) เป็นโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางแบบโพรแอคทีฟดังแสดงในรูปที่ 1.3 ซึ่งทำงานโดยการคาดการณ์การ

เชื่อมต่อของโนดสองโนดซึ่งรูปแบบการจำลองนั้นได้มองอากาศยานสองลำเป็นรูปสามมิตินั่นคือสนใจความสูงด้วย แต่ทั้งนี้ความสูงของอากาศยานสองลำที่ห่างกันมีค่าเพียงแค่ 1,000 ฟุตหรือ 300 เมตร เมื่อเทียบกับระยะทางในแนวนอน 5-10 ไมล์ทะเลหรือประมาณ 9-18 กิโลเมตรแล้วถือว่าน้อยมาก หากใช้หลักการพีทากอรัสเข้ามาคิดแล้วความสูงไม่มีนัยสำคัญเลย โดยที่โพรโทคอลจัดสรรเส้นทางช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงนี้ทำการหาเส้นทางไว้ก่อนดังเช่นการทำงานแบบโพรโทคอลโพรแอคทีฟทั่วไปโดยเพิ่มช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงเป็นตัวกรอง ดังนั้นจึงเป็นข้อเสียเปรียบให้กับโพรโทคอลรีแอคทีฟตรงที่ต้องเสียเวลาไปกับการหาเส้นทางทุกเส้นทางไว้ก่อนทั้งที่ไม่จำเป็น ทำให้การจัดสรรเส้นทางแบบหาเส้นทางไว้ล่วงหน้านั้นไม่เหมาะกับโครงข่ายเคลื่อนที่สำหรับอากาศยานเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากความเร็วของอากาศยานจะส่งผลให้ทอพอโลยีของโครงข่ายเปลี่ยนได้ตลอดเวลาซึ่งเมื่ออากาศยานเคลื่อนที่และขาดการเชื่อมต่อบ่อยๆจะทำให้โพรโทคอลแบบโพรแอคทีฟต้องเริ่มทำการหาเส้นทางใหม่ทั้งหมดส่งผลให้เปลืองโอเวอร์เฮดและเสียเวลา

2.2 หลักการทำงานของอุปกรณ์บนอากาศยานเชิงพาณิชย์

2.2.1 ระบบแพร่กระจายติดตามอากาศยานอัตโนมัติ (Automatic dependent surveillance-Broadcast; ADS-B)

ระบบแพร่กระจายติดตามอากาศยานอัตโนมัติเป็นเทคโนโลยีนำร่องอากาศยานที่แสดงตำแหน่งของอากาศยาน ความสูง ความเร็ว ตลอดจนพารามิเตอร์อื่นๆ ได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์โดยไม่ต้องอาศัยผู้ควบคุม จากรูปที่ 2.1(ก) ปัจจุบันประเทศไทยมีสถานี ADS-B ติดตั้งทั่วประเทศเพื่อให้บริการกับอากาศยานที่ติดตั้งอุปกรณ์ ADS-B บนเครื่อง



รูปที่ 2.1 (ก) สถานีภาคพื้นที่ติดตั้งเครื่องรับสัญญาณ ADS-B (ข) การทำงานของ ADS-B[23]

2.2.1.1 ข้อมูลทั่วไป

ADS-B เป็นระบบเพื่อการสอดส่องดูแล (Surveillance) ที่อากาศยานพาณิชย์ในปัจจุบันต้องมีติดตั้งไว้บนอากาศยาน โดย ADS-B มีความสามารถในการรับและ/หรือส่งข้อมูลเช่น รหัสแสดงตัวอากาศยาน (Aircraft identification) ตำแหน่ง (Position) และข้อมูลอื่นๆที่เหมาะสม เมื่อได้รับข้อมูลมาจึงเข้าสู่รูปแบบการแพร่สัญญาณ (Broadcast mode) โดยการเชื่อมโยงข้อมูล (Data link) ซึ่งทำให้ทั้งนักบินและเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศสามารถเห็นและควบคุมอากาศยานได้อย่างแม่นยำมากกว่าที่เคยเป็นมา ซึ่ง ADS-B นั้นเป็นเทคโนโลยีที่เข้ามาช่วยการจัดการจราจรทางและการให้บริการควบคุมจราจรทางอากาศ (Air Traffic Control Services) นอกจากนี้ระบบ ADS-B เป็นเทคโนโลยีใหม่ล่าสุดที่ใช้กำหนดกระบวนทัศน์ด้านการสื่อสาร (Communication) การเดินเรือ (Navigation) และการสอดส่องดูแล (Surveillance) ซึ่งสามสิ่งนั้นได้รวมกันเป็นระบบที่ชื่อว่า CNS (Communication Navigation and Surveillance) ซึ่งจาก [24] ได้ให้คำจำกัดความของ ADS-B ไว้ตามตัวหนังสือดังนี้

Automatic - เปิดใช้งานตลอดและไม่ต้องใช้ผู้ควบคุม

Dependent - ขึ้นอยู่กับความแม่นยำของระบบดาวเทียม GNSS (Global Navigation Satellite Systems) ในการระบุตำแหน่ง

Surveillance - ทำตัวเหมือนเรดาร์

Broadcast - ทำการแพร่กระจายตำแหน่งอากาศยานและข้อมูลอื่นๆอย่างต่อเนื่องไปยังอากาศยานหรือสถานีภาคพื้นที่ติดตั้งเครื่องรับสัญญาณจาก ADS-B

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

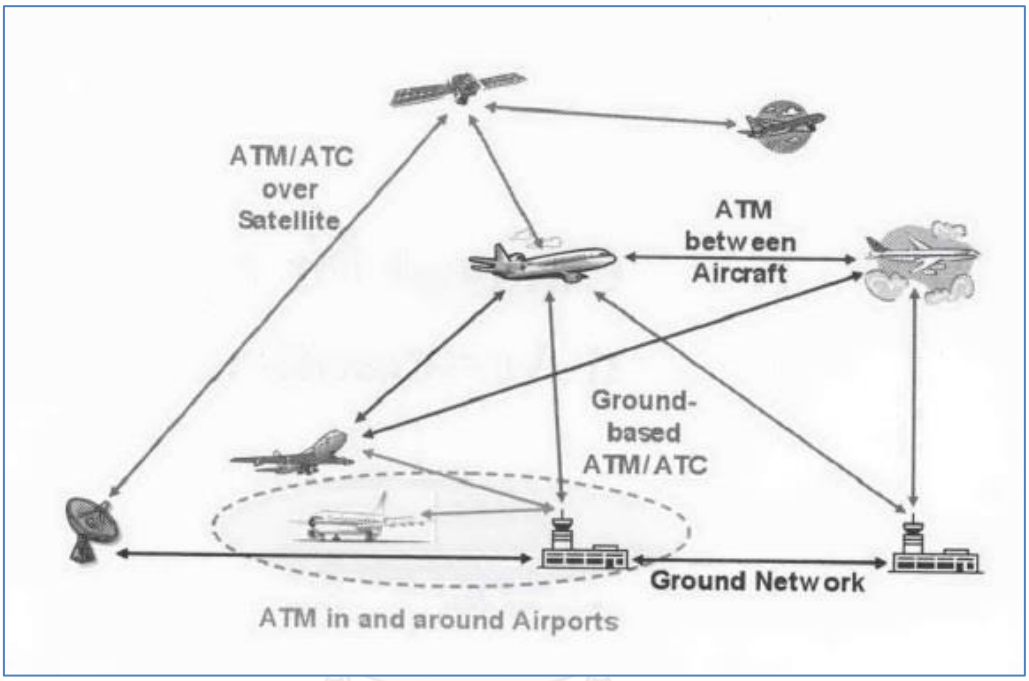
2.2.1.2 หลักการทำงาน

การทำงานของ ADS-B จะต่างจากการทำงานของเรดาร์อยู่มากพอสมควร โดยเรดาร์ทำงานโดยอาศัยการสะท้อนของคลื่นวิทยุจากเสาอากาศที่ภาคพื้น ส่วน ADS-B ใช้เทคโนโลยีของระบบดาวเทียมนำร่อง GNSS และการกระจายการสื่อสารอย่างง่าย ทั้งนี้ทั้งนั้นความแม่นยำของ ADS-B ไม่ได้ลดลงตามระยะทาง สภาพอากาศหรือความสูงเหนือน้ำทะเลดังในกรณีของเรดาร์ นอกเหนือจากนี้ช่วงการอัพเดทไม่ได้ขึ้นอยู่กับความเร็วหมุนรอบหรือความน่าเชื่อถือของเสาอากาศเลย

โดยปกติแล้ว ADS-B สามารถใช้ได้กับอากาศยานที่มีตัวรับ GNSS แบบสามัญทั่วๆไป(เช่น GPS, กาลิเลโอ ฯลฯ) เพื่อคำนวณหาตำแหน่งที่แน่นอนจากกลุ่มดาวเทียมนำร่อง GNSS หลังจากนั้นจึงทำการรวมตำแหน่งเข้ากับข้อมูลที่เป็นค่าตัวเลขของอากาศยานแต่ละค่า ได้แก่ ความเร็ว, ทิศทางของหัวอากาศยาน, ความสูงเหนือระดับน้ำทะเล และหมายเลขของเที่ยวบินนั้นๆ ข้อมูลที่กล่าวมาจะ

ถูกส่งทันทีไปยังอากาศยานและสถานีภาคพื้นที่มีตัวรับ ADS-B หรือทรานซ์ซิฟเวอร์ของการสื่อสารดาวเทียม และจะถูกส่งข้อมูลตำแหน่งอากาศยานและข้อมูลอื่นๆต่อไปยังศูนย์ควบคุมการจราจรทางอากาศ

2.3 โครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์ (Commercial Aviation Ad Hoc Network; AANET)



รูปที่ 2.2 NEWSKY concept [8]

ปัจจุบันอากาศยานที่มีสมรรถนะบินได้นานที่สุด บินได้นานถึง 17 ชั่วโมงโดยประมาณ ซึ่งตั้งแต่ปี 2548 มีการติดตั้งอุปกรณ์บรอดแบรนด์ไว้ที่ตัวอากาศยานของบริษัทผลิตอากาศยานยักษ์ใหญ่อย่างโบอิ้ง (Boeing) ทำให้สายการบินต่างๆเริ่มมีการนำอินเทอร์เน็ตบรอดแบรนด์มาให้บริการแก่ผู้โดยสารระหว่างการเดินทางที่ยาวนานและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในบริษัทผลิตอากาศยานอื่นๆจนถึงปัจจุบัน จากรูปที่ 2.2 อากาศยานจะมีการติดต่อสื่อสารผ่านตัวกลางหลักได้แก่ สถานีภาคพื้นซึ่งใช้การสื่อสารผ่านเสียงโดยใช้คลื่นวิทยุช่วงความถี่สูง ในขณะที่อากาศยานอยู่ห่างไกลจากสถานีภาคพื้น เช่น เหนือมหาสมุทร ทะเลทราย เป็นต้น มีความต้องการข้อมูลแสดงพิกัดกับความสูงจะอาศัยข้อมูลจากดาวเทียมที่ทำงานร่วมกันหลายดวงเพื่อความแม่นยำของข้อมูล ปกติอากาศยานมีการติดต่อสื่อสารผ่านภาคพื้นเป็นหลักโดยใช้คลื่นวิทยุดังที่กล่าวไว้ตอนต้น ในเวลาต่อมาจึงได้เกิดการพัฒนาให้มีการเชื่อมต่อระหว่างอากาศยานกันเองให้เป็นอีกหนึ่งทางเลือกสำหรับการบิน เพื่อให้การเดินทางในอากาศมีความปลอดภัยคลุมทุกพื้นที่ แต่ทั้งนี้ก็ยังไม่มีการนำแอดฮอกไปใช้งาน กับเครื่องบินเสียทีเดียว ทำให้การศึกษาค้นคว้าและวิจัยแอดฮอกท่ามกลางเครื่องบินยังคงมีต่อไป

โครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์เป็นโครงข่ายแบบเดียวกับโครงข่ายแอดฮอกเพื่อลูกข่ายเคลื่อนที่ซึ่งลูกข่ายเคลื่อนที่ของ AANET ในวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่อากาศยานเชิงพาณิชย์ดังที่กล่าวไว้ในบทนำ ซึ่งการสื่อสารระหว่างอากาศยานสามารถสื่อสารกันได้โดยตรงหรือผ่านเส้นเชื่อมโยงจากโนดตัวกลาง แม้ว่า AANET จะสามารถสร้างโครงข่ายขึ้นมาได้ท่ามกลางการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงของอากาศยาน แต่การเคลื่อนที่ของอากาศยานนั้นจะต้องมีระดับความเร็วและระดับความสูงคงที่ โดยทิศทางของอากาศยานนั้นไม่เปลี่ยนตลอดเส้นทางการบิน ดังนั้น รูปแบบการเคลื่อนที่ของอากาศยานที่ใช้พิจารณาจะต้องมีระดับความเร็วและทิศทางคงที่เท่านั้น ปัจจุบันอากาศยานใน AANET จะมีโปรแกรมประยุกต์เพื่อสอดส่องดูแลและระวังภัยชนิดหนึ่งชื่อ ADS-B โดยโปรแกรมประยุกต์นี้ได้รับความนิยมมากในแวดวงการบินและอยู่บนพื้นฐานของระบบกำหนดตำแหน่งบนโลก (GPS) ทำให้อากาศยานทราบถึงตำแหน่งและความเร็วของตัวเอง ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1 ดังนั้นอากาศยานสามารถแพร่สัญญาณบ่งบอกข้อมูลปัจจุบันของตนไปยังโนดข้างเคียงได้ ด้วยเหตุนี้ทำให้อากาศยานทุกลำในรัศมีการรับส่งสัญญาณทราบถึงพิกัดและความเร็วของโนดข้างเคียงได้

รูปที่ 2.3 แผนภาพการบินของอากาศยานโดยทั่วไป

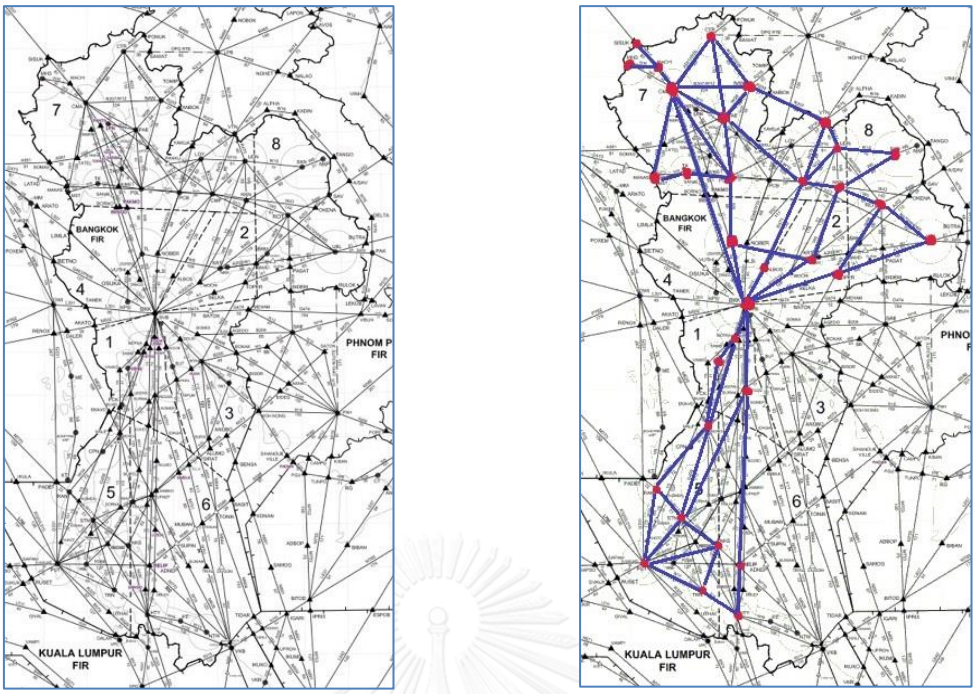
เมื่ออากาศยานทะยานไต่ความสูงขึ้นมาจนถึงระดับความสูงหนึ่งที่เรียกว่า ระดับบิน (Cruising level) ซึ่งเป็นความสูงที่นานที่สุดของแต่ละเที่ยวบิน ระบบจะเริ่มนับอากาศยานลำนั้นเข้าสู่โครงข่ายแอดฮอก สาเหตุที่ต้องให้นับที่ระดับบินเนื่องจากอากาศยานจะบินที่ระดับความสูง ความเร็วและทิศทางคงที่จนกว่าจะถึงเวลาไต่ลงเพื่อทำการลงจอดที่สนามบินปลายทางดังรูปที่ 2.3 ทางด้านการจัดการการบินอากาศยานที่บินอยู่เส้นทางการบินเดียวกันสามารถบินได้แต่ต้องอยู่บนความสูงที่ต่างกัน ทั้งนี้อากาศยานพาณิชย์จะบินที่ความสูงตั้งแต่ 13,000 – 41,000 ฟุต โดยให้มีระยะห่างของความสูงอย่างน้อย 1000 ฟุตหรือ 300 เมตรเมื่อบินที่ระดับความสูงตั้งแต่พื้นจนถึง 29,000 ฟุตหรือเมื่อบินที่ระดับความสูงมากกว่า 29,000 ฟุต ถึง 41,000 ฟุตจะจัดระยะห่างของความสูงอย่างน้อย

2000 ฟุตหรือ 600 เมตร โดยหากอากาศยานหันหัวอากาศยานตั้งแต่ 0° - 179° ต้องบินที่ความสูงเลขคี่ ในขณะที่หันหัวอากาศยานไปทาง 180° – 360° จะต้องบินที่ความสูงเลขคู่ ซึ่งการจัดความสูงนี้ได้เป็นไปตามกฎการบินที่องค์การการบินพลเรือนสากลได้ประกาศไว้ ตัวอย่างเช่น เมื่ออากาศยานต้องบินจากดอนเมืองไปขอนแก่นซึ่งต้องหันหัวอากาศยานไปทาง 20° ตะวันออกอาจบินที่ความสูง 17000 ฟุตหรือบินที่ความสูงเลขคี่ตามแต่ที่ผู้ควบคุมจราจรทางอากาศจะจัดให้ อีกทั้งการจะจัดอากาศยานขึ้นจากสนามบินจะต้องจัดระยะห่างให้ขึ้นตามกันมาได้อย่างน้อยที่สุด 120 วินาที นั่นคืออากาศยานสองลำจะขึ้นตามกันไปต้องห่างกันอย่างน้อย 2 นาที นอกเหนือจากนี้บางสนามบินอาจมีเที่ยวบินบินต่อวันจำนวนน้อย ดังนั้นระยะห่าง 2 นาทีก็แทบจะไม่ต้องนำมาใช้เลย ทำให้ทอพอโลยีของระบบที่จะจำลองในบทถัดไปได้อ้างอิงจากการจัดระยะห่างที่กล่าวมานี้

จากที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้เส้นทางการบินเส้นทางหนึ่งๆจะมีอากาศยานบินอยู่ที่หลายระดับความสูง อีกทั้งเมื่อมองจากมุมสูงจะเกิดอากาศยานอยู่ที่ตำแหน่งซ้อนกันอยู่ซึ่งในงานวิจัย [6] สามารถระบุได้ว่า ระดับความสูงของอากาศยานเหนือระดับทะเลอยู่ระหว่าง 8-11 กิโลเมตร และมีระยะความสูงห่างกันตามที่กล่าวไว้ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยกว่าระยะการส่งของอากาศยานแต่ละลำใน AANET โดยความเร็วอากาศยานมีค่าอยู่ที่ 200-270 เมตรต่อวินาที ซึ่งระยะการส่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ใช้ส่งเมื่อใช้เสาอากาศแบบรอบทิศทาง โดยพลังงานที่ใช้รับ-ส่งสัญญาณนี้ไม่เป็นปัญหาสำหรับลูกข่ายเคลื่อนที่ดังเช่นอากาศยานนี้ ตราบเท่าที่อากาศยานยังสามารถบินอยู่บนอากาศได้พลังงานก็เช่นกัน ดังนั้นจึงทำให้พลังงานไม่ได้เป็นข้อจำกัดเลยในโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยาน

2.4 ทฤษฎีกราฟ (Graph Theory)

ในการพิจารณาโครงข่ายหนึ่งๆ จำเป็นต้องจำลองมาในรูปแบบของกราฟซึ่งเป็นภาพเสมือนที่มีจุดและเส้นเชื่อมโยงระหว่างจุดสองจุดใดๆ ซึ่งจุดอาจมีความหมายถึงโนดในโครงข่ายซึ่งอาจเป็นอะไรก็ได้ที่งานวิจัยนั้นคำนึงถึง โดยในวิทยานิพนธ์นี้ได้มองจุดเป็นสนามบินหรือจุดรายงานตามเส้นทางการบิน (Reporting point) โดยที่มีเส้นเชื่อมจุดต่างๆเป็นเส้นทาง การบินที่จะมีอากาศยานซึ่งเป็นลูกข่ายเคลื่อนที่วิ่งไปตามเส้นทางนี้ ดังในรูปที่ 2.4(ก) เป็นเส้นทางบินเหนือน่านฟ้าไทยซึ่งสามารถวาดเส้นจำลองขึ้นมาเป็นกราฟเพื่อให้ง่ายต่อการมองในการทำการทดลองดังรูปที่ 2.4(ข)



รูปที่ 2.4 (ก)แสดงเส้นทางการบินเหนือน่านฟ้าไทย (ข)จำลองเส้นทางการบิน

นิยาม กราฟ G เป็นเซตที่ประกอบไปด้วยจุดที่เรียกว่า จุดยอด (Vertex) ในโครงข่ายสามารถเรียกจุดว่า โนด (Node) และเรียกเส้นว่า เส้นเชื่อม (Edge) หรือข่ายเชื่อมโยง (Link) ที่เชื่อมสองจุด

กำหนดให้ $G=\{V,E\}$ เป็นเซตที่ประกอบไปด้วยเซตของจุดยอดและเซตของเส้นเชื่อม

โดย $V=\{v_1,v_2,...,v_n\}$ แทน เซตของโนดหรือจุดยอดบนกราฟ

และ $E=\{e_1,e_2,...,e_m\}$ แทน เซตของเส้นเชื่อมระหว่างจุดบนกราฟ

ในทฤษฎีกราฟนั้น มีคำจำกัดความของกราฟที่อาจเกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์นี้ ดังนี้

2.4.1 กราฟมีน้ำหนัก (Weight Graph)

กราฟที่กำหนดค่าให้เส้นเชื่อมจะถูกเรียกว่า “กราฟมีน้ำหนัก” และเรียกค่าเส้นเชื่อมว่า “น้ำหนักของเส้นเชื่อม” เช่นถ้าจุดยอดแทนอากาศยาน เส้นเชื่อมอาจแทนระยะของอากาศยานสองลำที่อยู่ในรัศมีการส่งสัญญาณของกันและกัน

2.4.2 เมทริกซ์ของกราฟ

การแสดงกราฟแบบเมทริกซ์สามารถทำได้หลายแบบ โดยแบบแรกคือเมทริกซ์เชื่อมต่อ (Incident matrix) โดยให้แถวและสดมภ์ของเมทริกซ์แสดงจุดและเส้นตามลำดับสมาชิกจะเท่ากับ

จำนวนปลายของเส้นเชื่อม j ที่เชื่อมกับจุด i คือ a_{ij} มีค่า 0 หรือ 1 โดยเป็น 0 ถ้าจุด i ไม่เชื่อมกับเส้น j และเป็น 1 ถ้าจุด i เชื่อมกับเส้น j การแสดงเมทริกซ์แบบที่สองคือ เมทริกซ์ประชิด (Adjacency Matrix) โดยทั้งแถวและสดมภ์แสดงโนดต่างๆในเน็ตเวิร์ค สมาชิก a_{ij} จะแสดงการเชื่อมต่อจุด i กับจุด j ซึ่ง a_{ij} มีค่า 0 หรือ 1 โดยเป็นศูนย์หากจุด i ไม่เชื่อมกับจุด j และเป็น 1 ถ้าจุด i เชื่อมกับจุด j

2.4.3 แนวเดิน (Walk) และวิถี (Path)

กำหนดให้: $v_i; i = 0,1,2,...,n$ เป็นจุดยอดในกราฟ G

$e_i = (v_{i-1}, v_i); i = 1,2,...,m$ เป็นเส้นเชื่อมในกราฟ G

$A = v_0$ และ $B = v_n$

สามารถเรียงลำดับของจุดยอดและเส้นเชื่อม $A, e_1, v_1, e_2, v_2, ..., e_{m-1}, v_{n-1}, e_m, B$ ว่าเป็นแนวเดิน $A-B$ จากจุด $A = v_0$ ไปยังจุด $B = v_n$ เรียก A ว่าเป็นจุดต้น และ B เป็นจุดปลายในลำดับของแนวเดิน โดยจุดและเส้นเชื่อมอาจซ้ำกันได้ โดยจะเรียกจำนวนเส้นเชื่อมในแนวเดินว่า ความยาวของแนวเดินนั้นๆ

วิถีจากจุด A ไปยังจุด B คือแนวเดิน $A-B$ ที่ไม่มีจุดซ้ำ ในกราฟเชื่อมโยงวิถีจากโนดหนึ่งมีได้หลายวิถีและวิถีที่สั้นที่สุดคือวิถีที่มีผลรวมของน้ำหนักเส้นเชื่อมน้อยที่สุด

2.5 โพรโทคอลจัดสรรเส้นทางพื้นฐาน AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector)

AODV ทำให้โครงข่ายแอดฮอกมีความยืดหยุ่นเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีการเริ่มต้นหาเส้นทางเมื่อมีความต้องการเท่านั้น ซึ่งแต่ละเส้นทางในโครงข่ายแอดฮอกยังมีหลายฮอประหว่างโนดเคลื่อนที่ที่สร้างและคงสภาพโครงข่ายให้สามารถทำงานได้ซึ่งโพรโทคอล AODV ทำให้โนดเคลื่อนที่มีการหาเส้นทางไปยังปลายทางตัวใหม่ที่ได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งโนดยังไม่ต้องมีการคงสภาพเส้นทางที่ไปยังปลายทางที่ไม่ได้มีการสื่อสารอีก นอกจากนี้โนดเคลื่อนที่ใน AODV จะตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงหรือความเสียหายที่เกิดกับเส้นเชื่อมในทอพอโลยีของโครงข่ายในทันทีที่มีเส้นเชื่อมขาดออกจากกัน AODV จะมีการแจ้งเตือนโนดเคลื่อนที่ที่ได้รับผลกระทบได้ทราบเพื่อให้โนดเหล่านั้นปิดการใช้เส้นทางที่ขาดไป จุดเด่นที่สำคัญของโพรโทคอล AODV คือการหาเส้นทางที่ไม่มีการเกิดวงวนทำให้ไม่เกิดปัญหาการนับที่ไม่สิ้นสุดเมื่อทอพอโลยีของโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงเวลาโนดมีการเคลื่อนที่

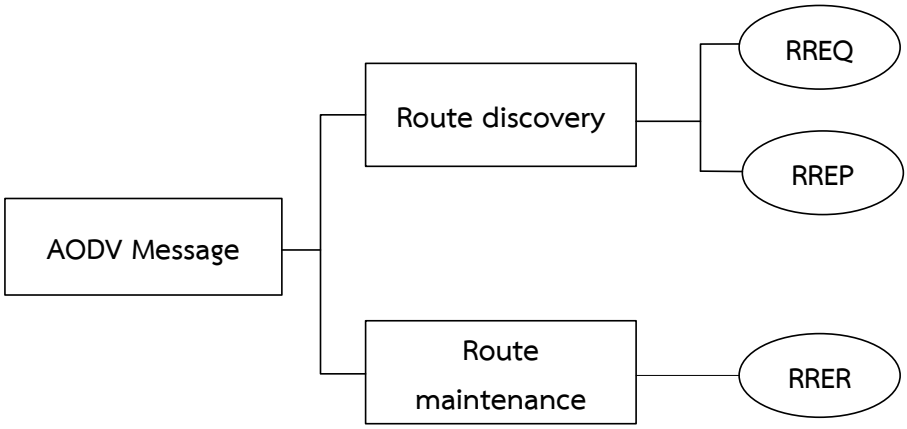
สิ่งที่ทำให้โพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV แตกต่างจากโพรโทคอลรีแอคทีฟอื่นๆนั่นคือมีการใช้ลำดับหมายเลขปลายทาง (Sequence number) สำหรับการเข้าถึงแต่ละเส้นทางซึ่งลำดับหมายเลขปลายทางนี้ถูกสร้างขึ้นมาจากตัวปลายทางนั่นเอง เพื่อใส่เพิ่มเข้าไปในข้อมูลเส้นทางที่ถูกส่งมาจากโนดที่ร้องขอ ดังนั้นเพื่อรับรองในการเป็นอิสระจากวงวนและให้ง่ายต่อการเขียนโปรแกรมจึงมี

การใช้ลำดับหมายเลขปลายทาง ยกตัวอย่างเช่นมีเส้นทางให้เลือกสองเส้นทาง โนดที่ร้องขอเส้นทางจะทำการเลือกเส้นทางที่มีลำดับหมายเลขมากที่สุดซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

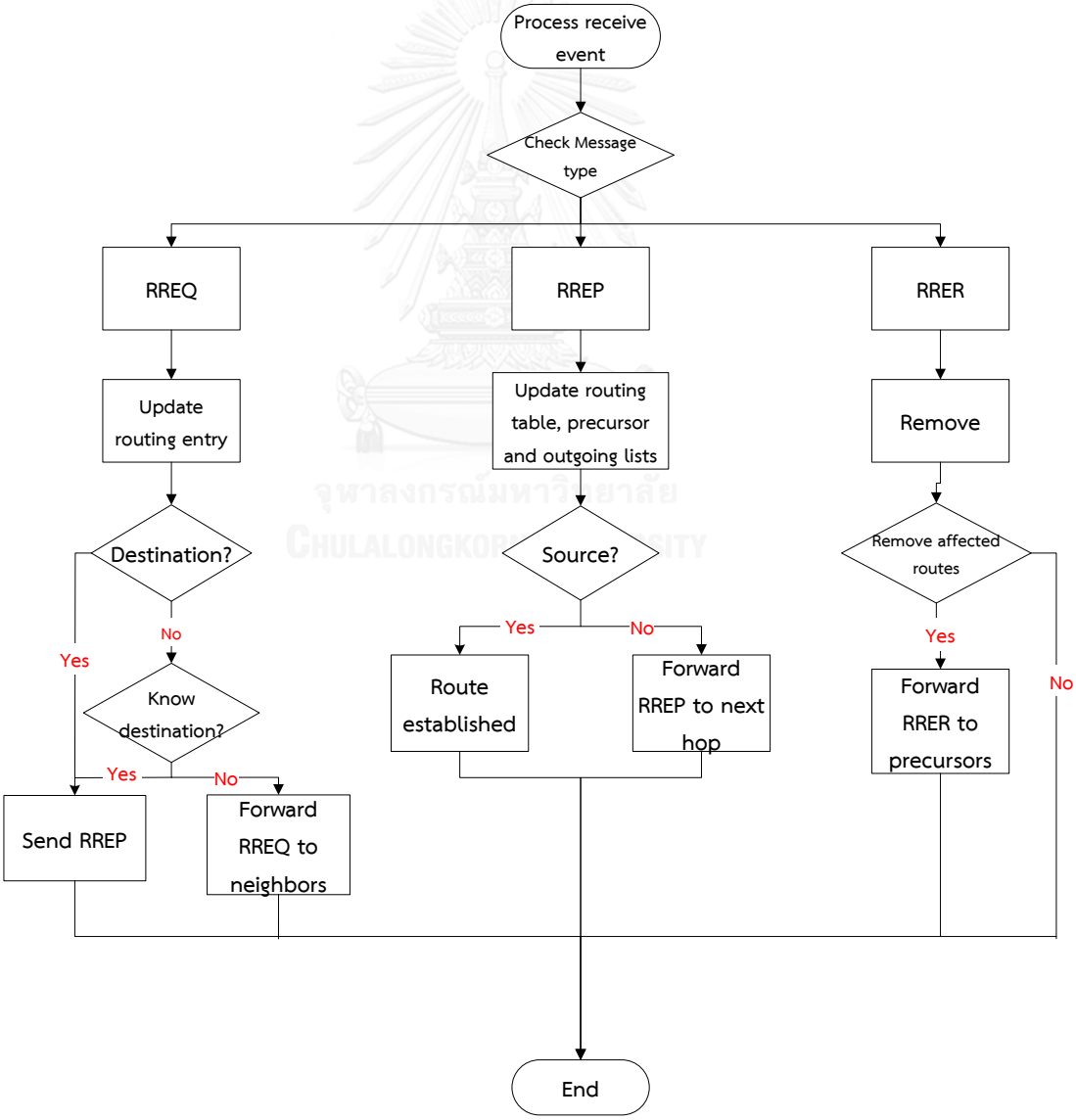
2.5.1 ข้อมูลทั่วไป

ข้อความของ AODV จะถูกแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ 1. การค้นหาเส้นทาง)Route discovery) ได้แก่ ข้อความร้องขอเส้นทาง (RREQs: Route Requests) และข้อความตอบกลับเส้นทาง (RREPs: Route Replies) 2. การรักษาสภาพเส้นทาง (Route maintenance) ได้แก่ ข้อความผิดพลาดของเส้นทาง (RERRs: Route Errors) ดังรูปที่ 2.5 โดยข้อความเหล่านี้ถูกรับผ่าน UDP (User Datagram Protocol) และไอพีทั่วไป ตัวอย่างเช่น โนดที่ทำการร้องขอจะต้องใส่ข้อมูลที่อยู่ไอพีเป็นที่อยู่ไอพีของตัวตั้งต้น (Originator IP address) ลงไปในข้อความ และจะใช้ที่อยู่ไอพีที่ถูกจำกัดนั่นคือ 255.255.255.255 ในการแพร่กระจายข้อความ อย่างไรก็ตามการทำงานของ AODV ต้องอาศัยข้อความที่แน่นอนดังเช่น RREQ RREP หรือ RERR แพร่กระจายไปตามโครงข่ายแอดฮอกโดย RREQ จะไปได้ไกลกี่ฮอปนั้นขึ้นอยู่กับการกำหนดค่า TTL (Time-To-Live) ในไอพีเฮดเดอร์ด้วย

หากจุดปลายของการติดต่อสื่อสารยังคงมีเส้นทางที่สามารถติดต่อไปยังปลายทางได้อยู่ AODV จะยังไม่ปฏิบัติการค้นหาเส้นทาง แต่เมื่อมีความต้องการเข้าถึงปลายทางตัวใหม่ โนดจะแพร่กระจายข้อความ RREQ เพื่อหาโนดปลายทางตัวใหม่นั้นและเส้นทางใหม่จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ RREQ ได้ถูกแพร่กระจายจนถึงโนดปลายทางหรือ RREQ ไปถึงโนดระหว่างกลาง (Intermediate node) ที่เส้นทางมีการปรับปรุงล่าสุดไปยังโนดปลายทาง ซึ่งเส้นทางนี้เป็นเส้นทางไปยังปลายทางสำหรับปลายทางที่มีลำดับหมายเลข (Destination Sequence Number; DSN) มากที่สุดใน RREQ โดยเส้นทางที่ถูกสร้างขึ้นนี้มาจากการส่งกลับของข้อความ RREP มายังต้นกำเนิด RREQ ซึ่งแต่ละโนดจะได้รับที่เก็บการร้องขอ (Request caches) ของเส้นทางขากลับไปยังตัวต้นทางที่ร้องขอมา ดังนั้นจึงสามารถทำการส่ง RREP กลับจากโนดปลายทางมาตามเส้นทางไปสู่โนดต้นทางได้ รวมถึงโนดระหว่างทางที่สามารถตอบสนองการร้องขอด้วยเช่นกัน ซึ่ง ณ ที่นี้จะขอแสดงแผนผังการทำงานของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV ซึ่งแสดงตัวรูปที่ 2.6 โดยโพรโทคอลมีข้อความอยู่ 3 แบบได้แก่ ข้อความร้องขอเส้นทาง (Route Request; RREQ) ข้อความตอบกลับเส้นทาง (Route Reply; RREP) และข้อความเส้นทางผิดพลาด (Route Error; RERR) ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ประเภทข้อความของ AODV



รูปที่ 2.6 แผนผังการทำงานของโพรโทคอล AODV

นอกเหนือจากการหาเส้นทางเพื่อการติดต่อสื่อสารแล้วการคอยดูแลการเชื่อมต่อก็เป็นสิ่งจำเป็นดังที่โนดใน AODV ปฏิบัติคือได้คอยดูแลและเฝ้าสังเกตสถานะของการเชื่อมต่อของเส้นเชื่อมในฮอปถัดไปที่อยู่บนเส้นทางที่ปฏิบัติงานได้ (Active route) เมื่อมีการตรวจพบว่าเส้นเชื่อมในเส้นทางที่เคยปฏิบัติได้นั้นได้ขาดออกจากกัน โนดที่อยู่ในเส้นทางจะได้รับการแจ้งเตือนเป็นข้อความ RERR ว่าเส้นเชื่อมได้ขาดแล้ว ซึ่ง RERR นี้จะบ่งชี้ว่าปลายทางตัวใดที่ไม่สามารถติดต่อสื่อสารได้อีก และเพื่อให้มีกลไกการรายงานนี้แต่ละโนดจะเก็บรายชื่อโนดที่มาก่อน (Precursor list) ที่มีข้อมูลที่อยู่ไอพี (IP Address) ของโนดข้างเคียงที่คาดว่าจะมีการใช้ฮอปถัดไปเพื่อไปยังปลายทาง นอกเหนือจากนี้ข่าวสารในรายชื่อโนดที่มาก่อนส่วนใหญ่จะได้มาระหว่างการผลิตข้อความ RREP ซึ่งแน่นอนว่ามีการส่งมาจากโนดในรายชื่อโนดที่มาก่อน ถ้าความยาวด้านหน้าของ RREP มีค่าไม่เป็นศูนย์ ตัวต้นทางของ RREQ ที่เรียกร้อง RREP จะถูกรวมเข้าไปอยู่ในรายชื่อผู้ที่มาก่อนด้วยข้อความ RREQ จะถูกส่งแพร่กระจายไปยังที่อยู่ไอพีหลายไอพี ดังนั้นแพร่กระจายข้อความไปยังที่อยู่ไอพีหลายที่อยู่นั้นจึงต้องมีการตกลงให้สอดคล้องกันกับโนดระหว่างทางที่ให้ดีเสียก่อน ซึ่งสำหรับโนดที่ไม่ทราบ (Unknown node) การส่งแพร่กระจายไปยังหลายที่อยู่ไอพีแบบที่อยู่ไอพีของปลายทางต้องทำแบบเดียวกับที่อยู่ไอพีปลายทางอื่นๆ

2.5.1.1 ตารางเส้นทาง (Routing table)

ดังที่ทราบว่า AODV เป็นโพรโทคอลหาเส้นทางที่มีการจัดตารางจัดการเส้นทาง โดยข่าวสารตารางเส้นทางจะถูกเก็บไว้เป็นช่วงเวลาสั้นๆ นั้นคือ ถูกสร้างไว้ชั่วคราวเพื่อเก็บเส้นทางย้อนกลับไปยังโนดต้นทางที่ส่ง RREQ มา โดยโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV ใช้ข้อมูลต่อไปนี้ในการเข้าถึงตาราง โดยตารางเส้นทางมีการบันทึกข้อมูลดังตารางที่ 2-1 ดังนี้

ตารางที่ 2-1 รายละเอียดข้อมูลภายในตารางเส้นทาง

ข้อมูล	ความหมาย
Destination IP Address	ที่อยู่ไอพีของโนดปลายทางที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูล
Destination Sequence number	ลำดับหมายเลขของโนดปลายทาง
Valid Destination Sequence Number Flag	บ่งชี้ลำดับหมายเลขปลายทางของเส้นทางหนึ่งๆ ว่าถูกหรือไม่
Hop Count	จำนวนโนดที่ใช้ในการส่งข้อมูลไปยังปลายทางโดยไม่นับโนดต้นทาง

Next Hop	โนดตัวถัดไปที่ต้องส่งข้อมูลไปยังโนดปลายทาง
List of Precursors	รายการของโนดข้างเคียงที่ถูกใช้ในการส่ง ข้อความ RREP เพื่อการบำรุงรักษาเส้นทาง
Life Time	เวลาที่โนดใช้พิจารณาเส้นทางว่ายังคงใช้งานได้

การจัดการลำดับหมายเลขมีความสำคัญมากในการหลีกเลี่ยงการเกิดวงวน หรือแม้แต่เมื่อเส้นเชื่อมขาดและโนดไม่สามารถเข้าถึงข่าวสารหรือลำดับหมายเลขของตัวเองได้ ซึ่งเมื่อเส้นเชื่อมขาดโนดปลายทางจะถูกตัดขาดไปหรือไม่มีการตอบสนองทันที ทำให้เมื่อเกิดเหตุการณ์ดังกล่าว AODV จะนำลำดับหมายเลขมาใช้กับเส้นทางไม่ได้ ทำให้ต้องมีการทำสัญลักษณ์ไว้ในตารางการเข้าถึงเส้นทางว่า 'ใช้ไม่ได้' (Invalid)

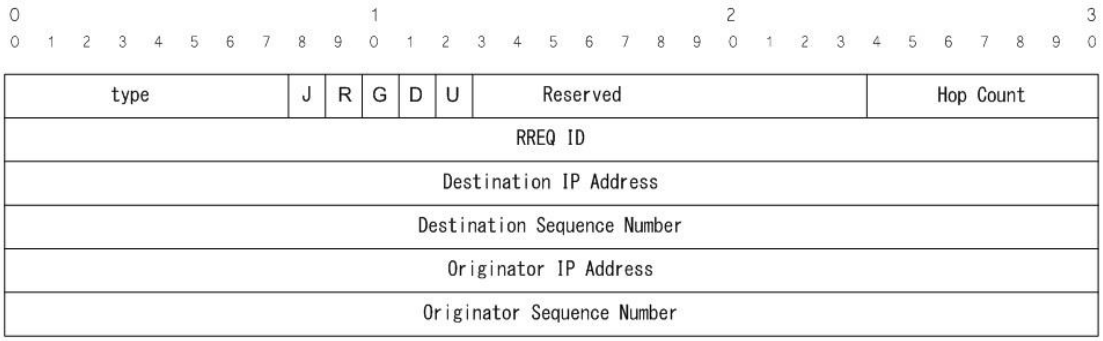
1) 2.5.2 การนำไปประยุกต์ใช้

โพรโทคอลหาเส้นทาง AODV ถูกออกแบบมาเพื่อใช้งานในโครงข่ายแอดฮอกเคลื่อนที่ โดยมีจำนวนประชากรในโครงข่ายระดับสิบถึงพันโนด ซึ่ง AODV สามารถรองรับการเคลื่อนที่ได้ทั้งระดับต่ำ ปานกลาง และสูงได้ดีพอกับความหลากหลายของข้อมูลในแบบต่างๆ AODV ทำให้โนดในโครงข่ายมีความเชื่อมั่นกันเพราะรู้ว่าไม่มีโนดเห็นแก่ตัว (Malicious node) แฝงอยู่ สิ่งที่สำคัญที่สุดคือ AODV ถูกออกแบบมาเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงาน โดยลดการแพร่กระจายของการควบคุมการจราจรและกำจัดโอเวอร์เฮดของข้อมูล

2.5.3 รูปแบบข้อความ

2.5.3.1 รูปแบบข้อความค้นหาเส้นทาง (Route Request Message Format; RREQ)

เมื่อโนดเริ่มการร้องขอเส้นทางที่ไม่มีอยู่ในตารางเส้นทาง ข้อความ RREQ จึงถูกแพร่กระจายไปยังโนดข้างเคียงแล้วทำการส่งต่อกันไปจนกระทั่งข้อความ RREQ ถึงโนดปลายทางซึ่งรูปแบบของข้อความ RREQ เป็นดังรูปที่ 2.7 ซึ่งมีความหมายและการใช้งานดังตารางที่ 2-2



รูปที่ 2.7 รูปแบบข้อความร้องขอเส้นทาง

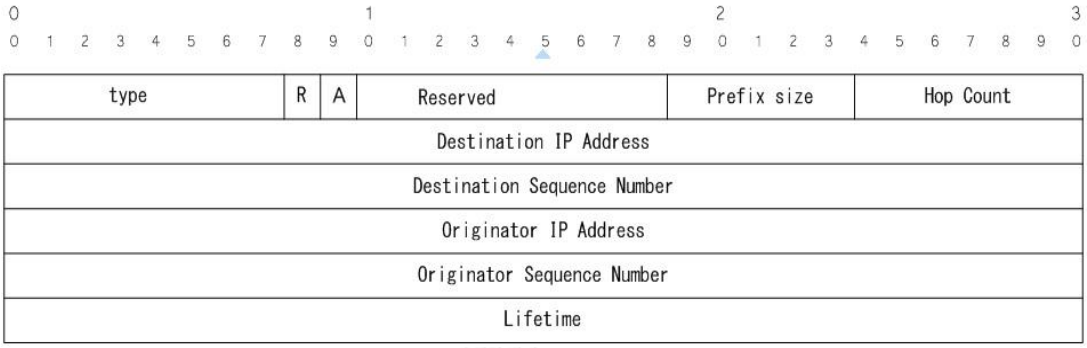
ตารางที่ 2-2 รายละเอียดของข้อความร้องขอเส้นทาง

ข้อมูล	ความหมาย
Type	ประเภทแพ็คเกต RREQ มี Type เท่ากับ 1
J	Join flag สงวนไว้ใช้สำหรับการส่งแบบแพร่กระจาย
R	Repair flag สงวนไว้ใช้สำหรับการส่งแบบแพร่กระจาย
G	Gratuitous RREP flags บ่งชี้ว่า RREP ที่ต้องการควรส่งแบบปลายทางเดียวไปยังโนดปลายทาง
D	Destination only flag บ่งชี้ว่า ต้องเป็นโนดปลายทางเท่านั้นที่สามารถตอบกลับข้อความ RREQ ได้
U	Unknown Sequence Number บ่งชี้ว่าโนดที่ต้องการข้อมูลเส้นทางไม่ทราบค่า ลำดับหมายเลขของโนดปลายทาง
Reserved	สงวนไว้และถูกตั้งค่าให้เท่ากับ 0
Hop count	จำนวนโนดที่ใช้ในการส่งต่อจากต้นทางไปยังโนดที่ได้รับข้อความ RREQ
RREQ ID	หมายเลขประจำตัวที่ไม่ซ้ำกันเพื่อใช้ในการระบุข้อความใหม่ของข้อความ RREQ เมื่อมีการส่ง ข้อความ RREQ ในระบบ
Destination IP Address	หมายเลขของโนดปลายทางที่ต้องการค้นหาเส้นทางเพื่อที่จะได้ส่งข้อมูล
Destination Sequence Number	ลำดับหมายเลขปลายทางล่าสุดที่ได้รับจากอดีต โดยโนดต้นทางจะพิจารณาทุกเส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูลไปยังโนดปลายทาง
Originator IP Address	ที่อยู่ไอพีของโนดต้นทางที่ทำการสร้างข้อความ RREQ เพื่อทำการค้นหาเส้นทางที่ตนมีความต้องการ
Originator Sequence Number	ลำดับหมายเลขปัจจุบันที่ถูกใช้ในเส้นทางเพื่อระบุถึงความต้องการของโนดต้นทางที่ต้องการส่งข้อมูล

2.5.3.2 รูปแบบข้อความตอบกลับเส้นทาง (Route Reply Message Format; RREP)

ข้อความ RREP มีไว้ใช้ในการตอบกลับเส้นทางหลังจากที่โนดได้รับข้อความ RREQ ซึ่งข้อความ RREP จะถูกส่งกลับแบบทางเดียว โดยใช้เส้นทางย้อนกลับที่ถูกสร้างขึ้นระหว่างขั้นตอนการ

ส่งต่อข้อความ RREQ ดังนั้นเมื่อโนดตัวถัดไปได้รับข้อความ RREP จึงเริ่มกระบวนสร้างเส้นทางสำหรับใช้ในการส่งข้อมูลต่อไป โดยข้อความ RREP มีรูปแบบดังรูปที่ 2.8 และมีรายละเอียดรวมถึงความหมายของแต่ละช่องดังตารางที่ 2-3



รูปที่ 2.8 รูปแบบข้อความตอบกลับเส้นทาง

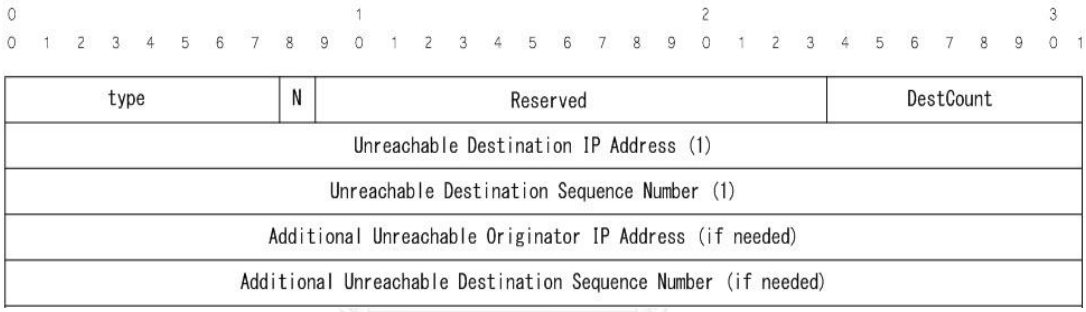
ตารางที่ 2-3 รายละเอียดของข้อความตอบกลับเส้นทาง

ข้อมูล	ความหมาย
Type	ประเภทของแพ็คเกต RREP ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2
R	Repair Flag ใช้สำหรับการส่งแบบแพร่กระจาย
A	Acknowledgement required เป็นตัวแปรกำหนดว่าข้อความ RREP ต้องการการตอบกลับข้อมูล (Acknowledge)
Reserved	เมื่อได้รับแพ็คเกต โนดจะไม่สนใจแพ็คเกตดังกล่าว
Prefix size	ถ้าไม่มีค่าเท่ากับ 0 แล้ว 5-bit ในข้อมูล Prefix size จะเป็นตัวกำหนดหมายเลขของโนดถัดไปที่ถูกใช้กับโนดทุกโนดด้วยเส้นทางในการส่งข้อมูลเส้นทางเดียวกัน
Hop count	จำนวนของโนดที่ใช้ในการส่งต่อข้อมูลจากต้นทางจนกระทั่งถึงปลายทางสำหรับการส่ง RREQ แบบแพร่กระจาย ซึ่งจะทำหน้าที่บ่งบอกถึงจำนวนของโนดที่ใช้ในการส่งข้อมูลไปยัง multicast tree ที่มีการส่งข้อความ RREP
Destination IP Address	ที่อยู่ไอพีของโนดปลายทางที่ใช้เส้นทางในการส่งข้อมูล
Destination Sequence Number	ลำดับหมายเลขปลายทางล่าสุดที่เกี่ยวข้องกับเส้นทางนั้นๆ
Originator IP	ที่อยู่ไอพีของโนดต้นทางที่สร้างข้อความ RREQ เพื่อค้นหาเส้นทางดังกล่าว

Address	
Lifetime	เวลาเป็นวินาทีของโนดที่ได้รับข้อความ RREP เพื่อพิจารณาว่าเส้นทางดังกล่าวถูกต้องหรือไม่

2.5.3.3 รูปแบบข้อความความผิดพลาดเส้นทาง (Route Error Message Format; RERR)

เมื่อเกิดความเสียหายของเส้นทางที่เคยปฏิบัติงานได้ ข้อความ RRER จะถูกนำมาใช้ อีกทั้งโนดยังไม่สามารถซ่อมแซมเฉพาะที่ (Local repair) โนดที่ใกล้เส้นเชื่อมเสียหายที่สุดจะเป็นโนดที่ส่งข้อความ RRER ไปยังโนดต้นทาง เพื่อแจ้งให้ทราบว่า มีเส้นทางที่ต้องการส่งข้อมูลได้เกิดความเสียหายขึ้นกับเส้นเชื่อม หากโนดต้นทางยังคงต้องการส่งข้อมูลจะทำการค้นหาเส้นทางใหม่ โดยรูปแบบข้อความ RRER เป็นดังรูปที่ 2.9 ซึ่งมีรายละเอียดตามตารางที่ 2-4



รูปที่ 2.9 รูปแบบข้อความความผิดพลาดเส้นทาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

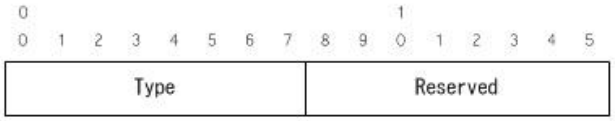
ตารางที่ 2-4 รายละเอียดของข้อความ RRER

ข้อมูล	ความหมาย
Type	ประเภทของแพ็คเกต RRER มีค่าเท่ากับ 3
N	No delete flag จะถูกตั้งค่าเมื่อโนดมีการทำงานในส่วนของ local repair เกิดขึ้นและโนดที่ตรวจพบว่าเกิดเส้นทางเสียหายนั้นจะไม่ลบเส้นทางเก่า
Reserved	เมื่อได้รับแพ็คเกต โนดจะไม่สนใจแพ็คเกตดังกล่าว
DestCount	จำนวนของโนดปลายทางที่ไม่สามารถส่งข้อมูลไปถึงได้ โดยจะต้องมีค่าอย่างน้อยเท่ากับหนึ่ง
Unreachable Destination IP Address	ที่อยู่ไอพีของโนดปลายทางที่ไม่สามารถส่งข้อมูลไปถึงได้เนื่องจากเส้นทางเกิดความเสียหาย

Unreachable Destination Sequence Number	ลำดับหมายเลขปลายทางในข้อมูลเส้นทางแต่ละเส้นทางต่อหนึ่งเป้าหมายสำหรับรายชื่อของหมายเลขโนดปลายทาง

2.5.3.4 การรับรู้การตอบกลับเส้นทาง (Route Reply Acknowledgment Message Format; RREQ-ACK)

รูปแบบข้อความของการตอบกลับการร้องข้อเป็นไปดังรูปที่ 2.1 ซึ่งมีแค่สองช่องได้แก่ ประเภทแพ็คเกตและสงวนไว้



รูปที่ 2.10 รูปแบบการรับรู้การตอบกลับเส้นทาง

2.5.4 การดำเนินการของ AODV

การทำงานของ AODV ภายหลังที่โนดได้มีการผลิตข้อความ RREQ RREP และRERR ขึ้นมาเพื่อสื่อสารแบบทางเดียวไปยังปลายทางและยังกล่าวถึงวิธีการถือครองข้อความ เมื่อมีกระบวนการประมวลผลข้อความที่ถูกต้อง ข่าวสารที่แน่นอนจะถูกคงไว้ในข้อมูลตารางการเส้นทางไปยังปลายทางที่ต้องการ

2.5.4.1 การคงอยู่ของลำดับหมายเลข (Maintaining Sequence Numbers)

ข้อมูลทุกอย่างในตารางเส้นทางของทุกโนด**ต้อง**รวมข่าวสารล่าสุดของลำดับหมายเลขของที่อยู่ไอพีของโนดปลายทางไว้เพื่อคงข้อมูลตารางเส้นทาง โดยลำดับหมายเลขนี้ถูกเรียกว่า “ลำดับหมายเลขปลายทาง” ซึ่งจะถูกปรับปรุงข้อมูลเพื่อให้เป็นปัจจุบันเมื่อมีข่าวสารใหม่เกี่ยวกับลำดับหมายเลขจากข้อความ RREQ RREP หรือ RERR ที่อาจเกี่ยวข้องกับปลายทางนั้น โดยการทำงาน AODV ขึ้นอยู่กับแต่ละโนดในโครงข่ายที่มีและคงลำดับหมายเลขปลายทางของตัวเองเพื่อเป็นหลักประกันว่าจะไม่มีการเกิดวงวนในทุกเส้นทางที่ไปยังโนดปลายทางนั้น ซึ่งโนดปลายทางจะเพิ่มลำดับหมายเลขของตัวเองในสองสถานการณ์ดังนี้:

- ทันทีก่อนที่โนดหนึ่งๆจะเริ่มต้นการค้นหาเส้นทาง โนด**ต้อง**นับลำดับหมายเลขของตัวเองขึ้น เพื่อป้องกันการขัดแย้งกับเส้นทางย้อนกลับที่สร้างไปยังโนดต้นทางของ RREQ ก่อนหน้านี้

- ทันทีก่อนที่โนดปลายทางจะเริ่มต้นส่ง RREP เพื่อตอบสนองการร้องขอของ RREQ โดยโนดปลายทาง**ต้อง**เพิ่มลำดับหมายเลขของตัวเองให้เป็นหมายเลขล่าสุด

เมื่อปลายทางเพิ่มลำดับหมายเลขของตัวเองแล้วจะต้องรักษาลำดับหมายเลขราวกับว่าไม่เคยใส่หมายเลข โดยการเพิ่มค่าให้ลำดับหมายเลข ถ้าลำดับหมายเลขถูกใส่ค่ามากที่สุดเท่าที่จะแสดงเป็นจำนวนเต็ม 32 บิตได้เช่น 4294967295 เมื่อนั้นลำดับหมายเลขที่ถูกเพิ่มขึ้นถัดไปจะมีค่าเป็นศูนย์ นอกเหนือจากนี้ถ้าลำดับหมายเลขมีค่าเป็น 2147483647 ซึ่งเป็นเลขมากที่สุดที่เลขจำนวนเต็มบวกจะเป็นได้ ถ้าเรากำลังคำนึงถึงเลขฐาน 2 ที่ใช้ในเลขจำนวนเต็ม 32 บิต ดังนั้นค่าต่อไปที่จะทำการเพิ่มได้ก็คือ 2147483648 ซึ่งเป็นเลขมากที่สุดของจำนวนเต็มลบในระบบเดิมแล้ว การแสดงผลเป็นเลขจำนวนเต็มลบไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของลำดับหมายเลขของ AODV ซึ่งแตกต่างกันเมื่อเทียบลำดับหมายเลขสองลำดับที่ถูกรักษาอยู่ เพื่อให้แน่ใจว่าข่าวสารเกี่ยวกับปลายทางนั้นไม่ใช่ข้อมูลข่าวสารเก่า โนดจะทำการเปรียบเทียบกับค่าลำดับหมายเลขปัจจุบันที่กำลังจะได้รับข้อความที่กำลังจะมาใหม่ของ AODV โดยการเปรียบเทียบนี้ทำโดยใช้เลขฐาน 32 บิตซึ่งมีความจำเป็นในการเพิ่มลำดับหมายเลข ถ้าผลลัพธ์ที่ได้จากลำดับหมายเลขปัจจุบันลบกับลำดับหมายเลขที่กำลังจะมาน้อยกว่าศูนย์ เมื่อนั้นข่าวสารที่เกี่ยวกับปลายทางนั่นในข้อความ AODV ถูกเปรียบเทียบแล้วว่าเก่ากว่าข่าวสารของโนดที่เพิ่งบรรจุใส่ไป ทำให้ข่าวสารนั้นต้องถูกละทิ้งไป

สถานการณ์เดียวที่โนดจะสามารถเปลี่ยนลำดับหมายเลขปลายทางในการเข้าถึงตารางเส้นทางได้ก็ต่อเมื่อเกิดการสูญเสียเส้นเชื่อมหรือเส้นเชื่อมหมดอายุ ซึ่งปลายทางจะเจาะจงฮอปถัดไปโดยใช้ตารางเส้นทางมาช่วยในการตัดสินใจ ซึ่งปลายทางที่ใช้ฮอปถัดไปจะเพิ่มลำดับหมายเลขแล้วใส่สัญลักษณ์ในเส้นทางว่า ‘ใช้ไม่ได้’ แต่เมื่อไรก็ตามที่มีเส้นทางที่ใหม่พอ (เช่น ประกอบไปด้วยลำดับหมายเลขที่มีค่าอย่างน้อยเท่ากับค่าลำดับหมายเลขที่บันทึกไว้อยู่) จะมีโนดที่รับข่าวสารการหาเส้นทางสำหรับปลายทางที่ได้รับผลกระทบ ซึ่งโนดนั้นจะทำสัญลักษณ์การเข้าถึงตารางเส้นทางว่า ‘ใช้ไม่ได้’ โดยที่โนดควรเพิ่มข้อมูลใหม่เข้าไปในข่าวสารของตารางเส้นทาง โนดหนึ่งๆจะทำการเปลี่ยนลำดับหมายเลขในการเข้าถึงตารางเส้นทางของปลายทางก็ต่อเมื่อ:

- ตนเองเป็นโนดปลายทาง และเสนอเส้นทางใหม่ให้ตัวเอง หรือ
- ตนเองได้รับข้อความ AODV ที่มีข่าวสารใหม่เกี่ยวกับลำดับหมายเลขสำหรับโนดปลายทาง หรือ
- เส้นทางที่มุ่งหน้าไปยังโนดปลายทางหมดอายุหรือไม่สามารถใช้งานได้

2.5.4.2 การเข้าถึงตารางเส้นทางและรายชื่อตัวก่อนหน้า (Route table Entries and Precursor Lists)

เมื่อโนดได้รับแพ็คเกตควบคุมของ AODV จากโนดข้างเคียงหรือโนดจะสร้างหรือเพิ่มเติมเส้นทางสำหรับโนดปลายทางที่เจาะจงโนดนั้นจะตรวจสอบตารางเส้นทางที่จะเข้าไปสู่ปลายทางจึงค่อยกรอกข้อมูลเข้าไป ลำดับหมายเลขก็เช่นกัน มีการบ่งชี้จากข่าวสารที่ถูกรวมไว้ในแพ็คเกตควบคุมหรืออีกอย่างคือ มีช่องลำดับหมายเลขที่ตั้งไว้ผิด เส้นทางที่จะถูกปรับปรุงก็ต่อเมื่อลำดับหมายเลขใหม่เป็นไปดังนี้

- มีค่ามากกว่าค่าลำดับหมายเลขปลายทางในตารางเส้นทาง หรือ
- ลำดับหมายเลขทั้งสองมีค่าเท่ากันแต่จำนวนฮอปของข่าวสารอันใหม่บวกหนึ่งต้องมีค่าน้อยกว่าจำนวนฮอปอันเก่าในตารางเส้นทาง หรือ
- ไม่ทราบค่าลำดับหมายเลขช่องอายุชีวิต (Lifetime field) ของตารางเส้นทางสามารถถูกบ่งชี้มาจากทั้งแพ็คเกตควบคุมหรือ ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT เส้นทางนี้จะถูกใช้ในการส่งข้อมูลแพ็คเกตไปรอคอย (Queued) และเติมเต็มการร้องขอในเส้นทางที่มีอยู่

ทุกครั้งที่เส้นทางถูกใช้ในการส่งแพ็คเกตจะมีช่องข้อมูลที่ได้รับการปรับปรุงให้เป็นปัจจุบันซึ่งมีค่าไม่น้อยกว่าเวลาปัจจุบันบวกกับ ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT ซึ่งช่องข้อมูลดังกล่าวมีช่วงชีวิตของเส้นทางที่ปฏิบัติงานได้ของโนดต้นทาง โนดปลายทางและฮอปถัดไปที่พาไปยังโนดปลายทาง สำหรับแต่ละเส้นทางที่ยังปฏิบัติงานได้และยังคงอยู่ โนดจะเป็นตัวที่คงไว้ซึ่งรายชื่อโนดก่อนหน้า ซึ่งจะทำการส่งแพ็คเกตไปตามเส้นทางนี้ โดยโนดก่อนหน้าเหล่านี้จะได้รับการแจ้งเตือนจากโนดที่อยู่ในเหตุการณ์ของการตรวจจับความเสียหายของเส้นเชื่อมในฮอปถัดไป ซึ่งรายชื่อของโนดก่อนหน้าในข้อมูลตารางเส้นทางจะประกอบไปด้วยโนดข้างเคียงที่ RREP ถูกผลิตหรือส่งต่อมา

2.5.4.3 การผลิตข้อความร้องขอเส้นทาง (Generate route request)

เมื่อโนดนั้นจำเป็นต้องเข้าถึงเส้นทางที่นำไปสู่ปลายทาง โนดจะแพร่กระจาย RREQ แต่หากไม่มีเส้นทางที่ปฏิบัติงานได้ปรากฏอยู่เลย ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้ กรณีที่ปลายทางไม่มีโนดไหนรู้จักมาก่อนหน้านี้หรือเคยมีเส้นทางที่นำไปสู่ปลายทางนี้แต่หมดอายุหรือมีสัญลักษณ์ว่า ‘ใช้ไม่ได้’ ช่องข้อมูลของลำดับหมายเลขปลายทางในข้อความ RREQ จะใส่ลำดับหมายเลขปลายทางสุดท้ายที่โนดรู้และถูกคัดลอกมาจากช่องข้อมูลของลำดับหมายเลขปลายทางในตารางเส้นทาง ถ้าไม่มีลำดับปลายทางไหนเป็นที่รู้จักเลย ธงสัญลักษณ์ของลำดับหมายเลขที่ไม่มีใครรู้จักจะถูกตั้งค่าขึ้น โดยลำดับหมายเลขของตัวกำเนิดในข้อความ RREQ คือลำดับหมายเลขของโนดนั่นเอง ซึ่งจะถูกเพิ่มขึ้นก่อนจะใส่เข้าไปใน RREQ นอกเหนือจากนี้ช่องข้อมูลการระบุ RREQ จะถูกเพิ่มขึ้นมาหนึ่งจากการระบุ RREQ ของโนด

ปัจจุบัน โดยแต่ละโนดจะคงการระบุ RREQ ไว้เพียงหนึ่งเดียว ในขณะที่การนับฮอปถูกตั้งค่าไว้ที่ศูนย์ ก่อนจะแพร่กระจาย RREQ โนดต้นกำเนิดจะสร้าง RREQ สำรอง $\mathbf{RREQ_{ID}}$ แล ที่อยู่ไอพีของต้นกำเนิด (ของตัวเอง) เพื่อรองรับ $\mathbf{PATH_{DISCOVERY_{TIME}}}$ ดังนั้นเมื่อโนดได้รับแพ็คเกตจากโนดข้างเคียงอีกครั้ง โนดจึงไม่ต้องทำการประมวลผลและส่งใหม่ซ้ำอีก

ปกติโนดต้นกำเนิดจะมีการสื่อสารกับโนดปลายทางแบบสองทิศทาง (Bidirectional communication) แต่บางกรณีโนดต้นกำเนิดก็ไม่สามารถใช้เส้นทางไปยังโนดปลายทางได้อย่างเพียงพอ ดังนั้นโนดปลายทางจึงต้องมีการสร้างเส้นทางกลับมายังโนดต้นทางเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยทุกครั้งที่มีการผลิต RREP ออกมาจากโนดข้างเคียงไว้ส่งต่อไปยังโนดต้นกำเนิดควรจะมีการกระทำบางอย่างเพื่อเป็นการแจ้งแก่โนดปลายทางเกี่ยวกับเส้นทางกลับมายังโนดต้นกำเนิด โดยที่โนดต้นกำเนิดจะเป็นคนเลือกโหมดการทำงานของโนดข้างเคียงเองโดยใส่สัญลักษณ์ให้เป็นธง ‘G’

โนดจะไม่ส่งข้อความ RREQ ออกมาเกินกว่าที่ได้มีการกำหนดค่าไว้ใน $\mathbf{RREQ_{RATELIMIT}}$ ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดมาเพื่อจำกัดการผลิตข้อความ RREQ ว่าออกผลิตได้มากที่สุดกี่ข้อความต่อวินาที หลังจากแพร่กระจาย RREQ ไปแล้ว โนดจะรอการตอบกลับมาของ RREP ในกรณีที่ไม่ได้รับภายในระยะเวลาที่กำหนด $\mathbf{NET_{TRAVERSE_{TIME}}}$ มิลลิวินาที โนดตัวกำเนิด RREQ จะทำการค้นหาเส้นทางใหม่อีกครั้งโดยแพร่กระจาย RREQ ข้อความใหม่ การส่งใหม่นี้สามารถทำได้หลายครั้งตราบเท่าที่ $\mathbf{RREQ_{RETRIES}}$ กำหนดจำนวนครั้งไว้เป็นค่า TTL สูงสุด ทุกครั้งที่มีการพยายามส่ง RREQ ออกไปใหม่ต้องทำการเพิ่มจำนวนนับและปรับปรุงข้อมูลการระบุ RREQ ใหม่ทุกครั้ง นอกเหนือจากนี้ในช่องข้อมูล TTL ของไอพีเฮดเดอร์จะถูกตั้งค่าไว้ค่าหนึ่งเพื่อให้สามารถเปิดใช้งานการควบคุมระยะการส่งของ RREQ ว่าในแต่ละครั้งจะส่ง RREQ ไปได้ไกลเท่าไร

แพ็คเกตข้อมูลจะทำการรอเส้นทาง (เช่น ส่ง RREQ ไปแล้วรอ RREP ส่งมาเพื่อสร้างเส้นทาง) ดังนั้นควรทำบัฟเฟอร์ให้กับการรอนี้ ซึ่งบัฟเฟอร์ที่เหมาะสมได้แก่ มาก่อนได้ก่อน (FIFO: First-in, First-out) ถ้าการค้นหาเส้นทางได้มีการพยายามส่ง RREQ ไปจนถึงค่า TTL สูงสุดโดยไม่ได้รับ RREP สักข้อความ แพ็คเกตข้อมูลทั้งหมดที่กำลังจะถูกส่งไปยังปลายทางที่เกี่ยวข้องจะต้องถูกละทิ้งไปจากบัฟเฟอร์ทั้งหมดและส่งข้อความว่า “ไม่สามารถเข้าถึงปลายทาง” ไปยังโปรแกรมประยุกต์ เพื่อจุดประสงค์ในการลดความแออัดในโครงข่ายจะต้องใช้ประโยชน์ของเอ็กโพเนนเชียลให้ได้มากที่สุดในการพยายามส่งข้อความในการค้นหาเส้นทางซ้ำเพื่อที่จะได้เส้นทางสำหรับปลายทาง เมื่อโนดต้นกำเนิดแพร่กระจาย RREQ ข้อความแรก โนดนั้นจะรอรับข้อความ RREP เป็นระยะเวลา $\mathbf{NET_{TRAVERSAL_{TIME}}}$ มีหน่วยเป็นมิลลิวินาที ซึ่งถ้า RREP ไม่ได้ถูกรับในช่วงระยะเวลานั้น โนดต้นกำเนิดจะแพร่กระจาย RREQ ข้อความใหม่ออกมา เมื่อคำนวณเวลาในการรอ RREP ตัวแรกหลังจากส่ง RREQ ข้อความที่สองออกมาแล้วจะเท่ากับ $2 * \mathbf{NET_{TRAVERSAL_{TIME}}}$ (มิลลิวินาที) ดังนั้นเมื่อ RREP จาก

การส่ง RREQ ข้อความที่สองไป ยังไม่มีการตอบกลับในระยะเวลานั้น RREQ ข้อความที่สามจะถูกส่งออกไป ทำให้ทุกครั้งที่มีการส่ง RREQ ข้อความใหม่ออกไป เวลาในการรอข้อความ RREP กลับมาจะถูกคูณสอง ดังนั้นเวลาในการพยายามส่งข้อความ RREQ และรอการตอบกลับมาของ RREP จึงออกมาเป็นเอ็กโพเนนเชียลฐานสอง

2.5.4.4 การควบคุมการส่งข้อความ RREQ (Controlling Dissemination of Route Request Message)

โนดต้นกำเนิดควรใช้เทคนิคการค้นหาแบบขยายวงแหวน (Expanding ring search) เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการส่ง RREQ ที่ไม่จำเป็นออกไปทั่วโครงข่าย จากเทคนิคนี้โนดต้นกำเนิดจะเริ่มต้นด้วยการใช้เวลา TTL เท่ากับ $\mathrm{TTL_{START}}$ ในแพ็คเกตไอพีเฮดเดอร์ของ RREQ และกำหนดเวลาในการรับ RREP ไว้เป็น $\mathrm{RING_{TRAVERSAL_{TIME}}}$ (มิลลิวินาที) ค่า $\mathrm{TTL_{VALUE}}$ ที่ใช้ในการคำนวณ $\mathrm{RING_{TRAVERSAL_{TIME}}}$ จะถูกตั้งค่าไว้เท่ากับค่าของ TTL ในไอพีเฮดเดอร์ เมื่อ RREQ ได้หมดอายุลงโดยไม่มีการตอบสนองจาก RREP โนดต้นกำเนิดจะแพร่กระจาย RREQ ออกไปอีกครั้งโดยที่เพิ่ม TTL ซึ่ง $\mathrm{TTL_{INCREMENT}}$ ซึ่งจะเพิ่มจนกว่า TTL ที่ตั้งไว้ใน RREQ เท่ากับ $\mathrm{TTL_{THRESHOLD}}$ และ $\mathrm{TTL} = \mathrm{NET_{DIAMETER}}$ ถูกใช้ในการพยายามส่งแต่ละครั้งด้วย การกำหนดอายุเวลาของ RREP ในทุกครั้งจะมีค่าเท่ากับ $\mathrm{RING_{TRAVERSAL_{TIME}}}$ เมื่ออยากทราบค่าที่มีการส่งข้อความผ่านไปทั่วทั้งโครงข่ายสามารถทราบได้โดยการทำให้ค่า $\mathrm{TTL_{START}}$ และค่า $\mathrm{TTL_{INCREMENT}}$ เท่ากับค่า $\mathrm{NET_{DIAMETER}}$

จำนวนฮอปที่บรรจุในเส้นทางที่ใช้ไม่ได้ในข้อมูลตารางเส้นทางสามารถบ่งชี้ถึงจำนวนฮอปสุดท้ายที่ปลายทางนั้นทราบได้ เมื่อใดก็ตามที่เส้นทางใหม่มีโนดปลายทางโนดเดิม แต่มีความต้องการร้องขอมาภายหลังที่เกิดการสูญเสียเส้นทางไปแล้ว TTL ในไอพีเฮดเดอร์ของ RREQ จะเริ่มตั้งค่าเป็นจำนวนฮอปบวกกับ $\mathrm{TTL_{INCREMENT}}$ หลังจากนั้นการหมดเวลาของ TTL จะถูกเพิ่มใน $\mathrm{TTL_{INCREMENT}}$ จนกว่า $\mathrm{TTL} = \mathrm{TTL_{THRESHOLD}}$ แล้ว TTL ที่มีค่าเท่ากับ $\mathrm{NET_{DIAMETER}}$ จึงจะถูกนำมาใช้ และเมื่อ TTL ที่มีค่าเท่ากับ $\mathrm{NET_{DIAMETER}}$ การหมดเวลาในการรอ RREP จะถูกตั้งค่าไปที่ $NET_{TRAVERSAL_{TIME}}$ โดยข้อมูลของเส้นทางอายุแล้วในตารางเส้นทางไม่ควรถูกลบทิ้งก่อนเวลา $\mathrm{CURRENT_{TIME}} + \mathrm{DELETED_{PERIOD}}$ นอกจากที่กล่าวข้างต้นแล้วสถานะที่เกี่ยวข้องกับเส้นทางที่หมดอายุ เช่น จำนวนฮอปล่าสุดสามารถโดนลบทิ้งได้ ยิ่งไปกว่านี้เวลาการกำจัดข้อมูลในตารางเส้นทางทิ้งสมควรให้มีการคำนวณด้วย โดยที่ข้อมูลในตารางเส้นทางสามารถรอ RREP โดยที่ไม่ถูกกำจัดทิ้งภายในเวลา $\mathrm{CURRENT_{TIME}} + 2 * \mathrm{NET_{TRAVERSAL_{TIME}}}$

2.5.4.5 การประมวลผลและการเดินหน้าการร้องขอเส้นทาง (Processing and Forwarding Route Requests)

เมื่อโนดได้รับ RREQ โนดจะปรับปรุงข้อมูลเส้นทางให้เป็นปัจจุบันเพื่อไปยังฮอปก่อนหน้าโดยไม่ใช้ลำดับหมายเลข หลังจากนั้นจึงจะตรวจสอบเพื่อบ่งชี้ว่า RREQ ที่ได้รับเป็นข้อความเดียวกับข้อความที่เคยได้รับหรือไม่ โดยเทียบที่อยู่ไอพีของโนดต้นทาง (Originator IP Address) และการระบุ RREQ ว่าอย่างน้อยอยู่ในช่วงของ $\mathbf{PATH_{DISCOVERY_{TIME}}}$ หรือไม่ ถ้าตรวจสอบแล้วพบว่า RREQ ตัวใหม่นั้นซ้ำกับตัวที่เคยได้รับมาแล้ว โนดจะทำการละทิ้ง RREQ ตัวใหม่นี้ไป แต่หาก RREQ ใหม่ที่ได้รับไม่ซ้ำกับข้อความ RREQ ที่เคยได้รับ โนดจะไม่ละทิ้ง RREQ ข้อความใหม่นี้ แต่จะทำการเพิ่มค่าจำนวนฮอปใน RREQ ขึ้นมาหนึ่งเพื่อให้เป็นฮอปใหม่ที่พาไปยังโนดข้างเคียง หลังจากนั้นจึงทำการค้นหาเส้นทางย้อนกลับไปยังที่อยู่ไอพีของโนดต้นทางโดยการใช้การจับคู่คำหน้าที่ยาวที่สุด (Longest-prefix matching) แล้วจึงสร้างหรือปรับปรุงเส้นทางขึ้นมาโดยใช้ลำดับหมายเลขของต้นกำเนิดจาก RREQ ในตารางเส้นทางของตัวโนดเอง เมื่อโนดได้รับ RREP จะเกิดเส้นทางย้อนกลับมายังต้นกำเนิด RREQ โดยบ่งชี้จากที่อยู่ไอพีของโนดต้นทาง และเมื่อใดก็ตามที่มีการสร้างเส้นทางย้อนกลับหรือปรับปรุงเส้นทางย้อนกลับจะต้องทำดังต่อไปนี้

1. ลำดับหมายเลขของต้นกำเนิดจาก RREQ จะถูกเปรียบเทียบไปยังลำดับหมายเลขของปลายทางที่เกี่ยวข้องจากข้อมูลตารางเส้นทางและคัดลอกเอามาเมื่อมีค่ามากกว่าค่าเดิมในนั้น
2. ช่องลำดับหมายเลขที่ใช้ได้ถูกตั้งค่าให้เป็นถูก (TRUE)
3. ฮอปถัดไปในตารางเส้นทางจะกลายเป็นโนดที่ได้รับ RREQ
4. จำนวนฮอปจะถูกคัดลอกมาจากจำนวนฮอปในข้อความ RREQ

เมื่อโนดได้รับข้อความ RREQ แล้วข้อมูลของเวลาอายุเส้นทางย้อนกลับของที่อยู่ไอพีตัวต้นกำเนิดจะถูกตั้งค่าให้มากที่สุดจาก (ExistingLifetime, MinimalLifetime) โดยที่

$$\mathbf{MinimalLifetime} = \left(\mathbf{current\ time} + 2 * \mathbf{NET_{TRAVERSAL_{TIME}}}\right) - 2 * \mathbf{HopCount} * \mathbf{NODE_{TRAVERSAL_{TIME}}}$$

หากโนดยังไม่ได้ส่งข้อความ RREP กลับมา อีกทั้งไอพีเฮดเดอร์ที่กำลังจะมามี TTL มากกว่าหนึ่ง โนดจะปรับปรุงการแพร่กระจาย RREQ ไปยังแอดเดรส 255.255.255.255 แทน และเพื่อที่จะปรับปรุง RREQ จะต้องลด TTL หรือการจำกัดของช่องข้อมูลฮอปในไอพีเฮดเดอร์ขาออก (The outgoing IP header) โดยลดลงมาหนึ่ง และช่องข้อมูลการนับฮอปในข้อความ RREQ นับขึ้นมาหนึ่งเพื่อรายงานฮอปใหม่ผ่านโนดข้างเคียง สุดท้ายลำดับหมายเลขปลายทางของปลายทางที่ถูกร้องขอจะถูกตั้งค่าเป็น

ค่าสูงสุดที่สามารถรับได้ในข้อความ RREQ และค่าลำดับปลายค่าล่าสุดให้คงไว้จากโนดที่ร้องขอปลายทางมา แต่อย่างไรก็ตามโนดที่ทำการส่งต่อต้องไม่เคยแก้ไขค่าลำดับหมายเลขปลายทางมาก่อน แม้ว่าค่าที่ได้รับใน RREQ ที่ใกล้เข้ามาจะมากกว่าค่าที่มีอยู่ปัจจุบันของโนดที่กำลังจะเป็นผู้ส่งต่อ

นอกเหนือจากที่กล่าวข้างต้น เมื่อโนดแพร่กระจายข้อความ RREP แล้วโนดจะละทิ้ง RREQ ไป สังเกตได้ว่าเมื่อโนดข้างเคียงทำการตอบกลับ RREQ ทุกตัวที่มีปลายทางเดียวกัน นั่นอาจเป็นการปิดทางทำให้ปลายทางไม่ได้รับข้อความในการค้นหาเลย ด้วยเหตุนี้อาจทำให้ปลายทางไม่ได้เรียนรู้เส้นทางกลับไปยังโนดต้นกำเนิดจากข้อความ RREQ จึงเป็นเหตุให้โนดปลายทางต้องเริ่มต้นการค้นหาและเรียนรู้เส้นทางกลับไปยังโนดต้นกำเนิดเอง ในที่นี้โนดต้นกำเนิดควรตั้งค่า “RREP ให้เปล่า (gratuitous RREP)” และ ธง ‘G’ ใน RREQ สำหรับให้ปลายทางที่ต้องการเส้นทางมายังโนดต้นกำเนิดอย่างกรณีที่กล่าวไว้ข้างต้น เมื่อโนดข้างเคียงได้รับ RREQ ที่ตั้งค่าไว้เป็นธง G จึงส่ง “RREP ให้เปล่า” กลับไป ซึ่งเป็นอันเดียวกันกับที่ไปยังโนดปลายทาง

2.5.4.6 การส่งข้อความ RREPS (Generating Route Replies)

โนดหนึ่งๆจะส่งข้อความ RREP เมื่อ:

1. ตัวเองเป็นปลายทาง หรือ
2. มีเส้นทางซึ่งทำงานอยู่มุ่งไปยังปลายทาง โดยลำดับหมายเลขปลายทางในข้อมูลตารางเส้นทางที่มีอยู่ของโนดยังใช้งานได้และมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับลำดับหมายเลขปลายทางของ RREQ และ “ปลายทางเท่านั้น” หรือ ธง‘D’ ยังไม่ได้ถูกตั้งค่า

เมื่อส่งข้อความ RREP ออกมา โนดจะคัดลอกที่อยู่ไอพีปลายทางและลำดับหมายเลขตัวกำเนิดจากข้อความ RREQ ลงในข้อความ RREP การทำงานของโนดแต่ละโนดจะแตกต่างกันเล็กน้อยขึ้นอยู่กับว่าโนดนั้นเป็นตัวที่ร้องขอปลายทางเองหรือไม่ หรืออาจเป็นแค่โนดข้างเคียงที่มีเส้นทางที่ใหม่พอไปยังปลายทาง

เมื่อมีการสร้าง RREP มาแล้วข้อความ RREP จะถูกส่งกลับไปแบบทางเดียว (Unicast) เพื่อไปยังฮอปถัดไปและต่อไปยังต้นกำเนิด RREQ ตามข้อมูลตารางเส้นทางที่ถูกบ่งชี้ไว้ไปยังตัวต้นกำเนิด เมื่อ RREP ถูกส่งต่อไปยังโนดต้นกำเนิดแล้วช่องข้อมูลจำนวนฮอปจะเพิ่มขึ้นทีละหนึ่งฮอป ดังนั้นเมื่อ RREP เดินทางไปถึงโนดต้นกำเนิด จำนวนฮอปนั้นแสดงถึงระยะทางเป็นฮอปจากโนดต้นทางมายังโนดปลายทาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.5.4.6.1 การส่งข้อความ RREP จากปลายทาง (Route Reply Generation by the Destination)

ถ้าโนดที่ส่งข้อความ RREP เป็นโนดปลายทางเอง โนดนั้นต้องนับเพิ่มลำดับหมายเลขของตัวเองขึ้นมาหนึ่ง หากว่าลำดับหมายเลขในแพ็คเกต RREQ มีค่าเท่ากับลำดับหมายเลขที่ถูกเพิ่มขึ้นถ้านอกเหนือจากที่กล่าว โนดปลายทางจะไม่เปลี่ยนแปลงลำดับหมายเลขของตัวเองก่อนที่จะมีการส่งข้อความข้อความ RREP โดยเมื่อมีการส่งข้อความ RREP โนดปลายทางจะใส่ลำดับหมายเลขของตัวเองไว้ในช่องข้อมูลลำดับหมายเลขปลายทางและใส่ค่าเป็นศูนย์ไว้ในช่องข้อมูลจำนวนฮอปของ RREP

2.5.4.6.2 การส่งข้อความ RREP จากโนดข้างเคียง (Route Reply Generation by an Intermediate Node)

หากว่าโนดที่ส่งข้อความ RREP ออกมาไม่ใช่โนดปลายทาง แต่เป็นโนดข้างเคียงที่อยู่ตามเส้นทางจากต้นกำเนิดไปยังปลายทาง โนดนั้นจะคัดลอกลำดับหมายเลขของตัวเองไปยังช่องข้อมูลของลำดับหมายเลขปลายทางในข้อความ RREP โดยที่โนดข้างเคียงจะปรับปรุงข้อมูลเส้นทางด้วยการใส่โนดที่เป็นฮอปสุดท้ายไว้ในรายชื่อโนดที่มาก่อน (Precursor list) เพื่อให้เป็นข้อมูลเส้นทางในการส่งต่อ นอกจากนี้โนดข้างเคียงยังต้องปรับปรุงข้อมูลตารางเส้นทางของตัวเอง เพื่อให้เป็นข้อมูลแก่โนดต้นกำเนิด RREQ โดยการใส่ข้อมูลฮอปถัดไปที่ไปยังปลายทางในรายชื่อโนดที่มาก่อนเพื่อให้เป็นข้อมูลเส้นทางย้อนกลับ สุดท้ายการคำนวณเวลาอายุทำได้โดยนำเวลาปัจจุบันลบออกจากเวลาหมดอายุของข้อมูลตารางเส้นทาง

2.5.4.6.3 การส่งข้อความ RREP ให้เปล่า (Generating Gratuitous RREPs)

หลังจากโนดได้รับ RREQ แล้วจึงตอบกลับไปด้วย RREP โนดนั้นจะทิ้ง RREQ ไป แต่ถ้า RREQ มีธงสัญลักษณ์ ‘G’ และโนดข้างเคียงเป็นโนดที่ส่ง RREP กลับไปยังโนดต้นกำเนิด โนดนั้นจะต้องส่ง RREP ให้เปล่าไปยังโนดปลายทางแบบทางเดียว ซึ่ง RREP ให้เปล่านี้จะถูกส่งไปยังโนดปลายทางที่ต้องการซึ่งประกอบไปด้วยช่องข้อมูลในข้อความ RREP ดังต่อไปนี้:

- จำนวนฮอป บ่งชี้ข้อมูลตารางเส้นทางของโนดไปยังโนดต้นกำเนิด
- ที่อยู่ไอพีปลายทาง เป็นที่อยู่ไอพีของโนดที่กำเนิด RREQ
- ลำดับหมายเลขปลายทาง เป็นลำดับหมายเลขต้นกำเนิดจาก RREQ
- ที่อยู่ไอพีต้นกำเนิด เป็นที่อยู่ไอพีของโนดปลายทางใน RREQ
- อายุเวลา อายุเวลาที่เหลืออยู่ของเส้นทางที่ตรงไปยังตัวกำเนิดของ RREQ ซึ่งเป็นที่ทราบดีจากโนดข้างเคียง

2.5.4.6.4 การรับและส่งต่อ RREPs (Receiving and Forwarding Route Replies)

เมื่อโนดได้รับข้อความ RREP โนดจะทำการค้นหาเส้นทางของฮอปก่อนหน้าและถ้าเป็นไปได้เส้นทางจากฮอปก่อนหน้าจะถูกสร้างขึ้นโดยที่ยังไม่มีลำดับหมายเลขที่ใช้ได้ จากนั้นโนดจึงทำการเพิ่มจำนวนฮอปขึ้นหนึ่งฮอปใน RREP เพื่อเป็นฮอปใหม่ไปยังโนดข้างเคียง ซึ่งการเพิ่มค่าฮอปนี้เรียกว่า “จำนวนฮอปใหม่” หลังจากนั้นถ้าเส้นทางที่ตรงไปยังปลายทางยังไม่มีโนดจึงสร้างเส้นทางขึ้นมา นอกเหนือจากนี้โนดจะทำการเปรียบเทียบลำดับหมายเลขปลายทางในข้อความกับลำดับหมายเลขปลายทางที่บรรจุอยู่ของตัวเองเพื่อให้ถูกต้องกับที่อยู่ไอพีปลายทางในข้อความ RREP หลังจากที่มีการเปรียบเทียบไปเรียบร้อยแล้วข้อมูลที่มีอยู่จะถูกปรับปรุงก็ต่อเมื่อเหตุการณ์เป็นดังนี้:

1. ลำดับหมายเลขในตารางเส้นทางมีเครื่องหมายว่า ‘ใช้ไม่ได้’
2. ลำดับหมายเลขปลายทางใน RREP มากกว่าของโนดที่ได้ทำการคัดลอกมาและค่าที่ทราบก็ใช้ได้ หรือ
3. ลำดับหมายเลขทุกตัวมีค่าเท่ากัน แต่เส้นทางมีสัญลักษณ์ว่า ‘งดปฏิบัติงาน’ (Inactive)
4. ลำดับหมายเลขทุกตัวมีค่าเท่ากันและจำนวนฮอปใหม่มีค่าน้อยกว่าฮอปในข้อมูลตารางเส้นทาง

หากข้อมูลตารางเส้นทางที่ไปยังปลายทางมีการสร้างหรือปรับปรุงจะต้องดำเนินการดังต่อไปนี้:

- ทำสัญลักษณ์เส้นทางว่า ‘ปฏิบัติงาน’
- ลำดับหมายเลขปลายทางมีสัญลักษณ์ว่า ‘ปฏิบัติงาน’
- ฮอปถัดไปในข้อมูลเส้นทางจะเป็นโนดรับ RREP ซึ่งมีช่องข้อมูลที่อยู่ไอพีต้นทางบ่งชี้ไว้ในไอพีเฮดเดอร์
- จำนวนฮอปถูกตั้งค่าให้เป็นจำนวนฮอปใหม่
- เวลาหมดอายุคือเวลาปัจจุบันบวกกับค่าของอายุชีวิตในข้อความ RREP
- ลำดับหมายเลขปลายทางคือลำดับหมายเลขปลายทางในข้อความ RREP

โนดปัจจุบันต่อมาจึงสามารถใช้เส้นทางที่ส่งข้อมูลแพ็คเกตไปยังปลายทางได้ ทั้งนี้ถ้าโนดปัจจุบันไม่ใช่โนดที่มีที่อยู่ไอพีของตัวกำเนิดในข้อความ RREP แล้วเส้นทางที่ใช้ส่งต่อจะถูกสร้างหรือปรับปรุงตามที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ โนดจะดูจากข้อมูลตารางเส้นทางของโนดต้นกำเนิดเพื่อบ่งชี้ว่าฮอปใดที่จะส่งแพ็คเกต RREP หลังจากนั้นจึงจะส่งต่อ RREP ไปที่โนดต้นกำเนิดโดยใช้ข้อมูลที่มีอยู่ในตารางเส้นทาง แต่หากโนดเกิดส่งข้อมูลไปยังเส้นเชื่อมที่ผิดพลาดหรือขาดหรือส่งได้ทิศทางเดียว โนดควรจะตั้งค่าสัญลักษณ์เป็นธง ‘A’ เพื่อจะให้โนดตัวที่รับ RREP แจ้งว่าได้รับ RREP แล้วโดยการส่งข้อความ RREP-ACK กลับมา เมื่อไรก็ตามที่มีโนดใดโนดหนึ่งส่ง RREP รายชื่อโนดก่อนหน้าที่ตอบสนองต่อโนดปลายทางจะถูกปรับปรุงโดยการเติมฮอปถัดไปเข้าไปใน RREP ที่จะถูกส่งต่อ

2.5.5 ข้อความ Hello (Hello message)

หากโนดอยากทราบข่าวสารในการเชื่อมต่อกับโนดข้างเคียงจะใช้วิธีแพร่กระจายข้อความ Hello ไปยังโนดรอบข้าง ซึ่งข้อความ Hello ควรใช้เฉพาะเวลาที่ตัวโนดเองเป็นส่วนหนึ่งของเส้นทางที่ปฏิบัติงานได้ ซึ่งทุกๆช่วงเวลา $\mathrm{HELLO_INTERVAL}$ มิลลิวินาที โนดจะมีการตรวจสอบว่า มีการแพร่กระจายข้อความ Hello ไปหรือยัง หากยัง โนดจะส่งแพร่กระจาย RREP ที่มี TTL ซึ่งมีค่าเป็นหนึ่งหรือที่เรียกว่าข้อความ Hello ซึ่งมีช่องข้อมูลดังต่อไปนี้:

ที่อยู่ไอพีปลายทาง	ที่อยู่ไอพีของโนด
ลำดับหมายเลขของปลายทาง	ลำดับหมายเลขล่าสุดของโนด
จำนวนฮอป	0
เวลาอายุ	$\mathrm{ALLOWED_{HELLO_{LOSS}}} * \mathrm{HELLO_{INTERVAL}}$

โนดจะบ่งชี้การเชื่อมต่อโดยคอยรับฟังแพ็คเกตจากโนดข้างเคียงทั้งหมด ซึ่งถ้าโนดได้รับข้อความ Hello จากโนดข้างเคียงช่วงเวลาก่อนหน้า $\mathrm{DELETE_{PERIOD}}$ และเมื่อโนดข้างเคียงไม่ได้รับแพ็คเกตใดๆเลยมากกว่า $\mathrm{ALLOWED_{HELLO_{LOSS}}} * \mathrm{HELLO_{INTERVAL}}$ มิลลิวินาที โนดควรคาดว่าเส้นเชื่อมของโนดข้างเคียงนี้ได้ขาดไปแล้ว เมื่อโนดได้รับข้อความ Hello จากโนดข้างเคียง โนดต้องมั่นใจว่าตัวเองมีเส้นทางที่ปฏิบัติงานได้ ไปยังโนดข้างเคียง และหากจำเป็นจึงสร้างเส้นทางขึ้นมาใหม่ แต่หากมีเส้นทางอยู่แล้วค่าเวลาอายุของเส้นทางจะถูกเพิ่มขึ้นเป็นเวลาอย่างน้อย $\mathrm{ALLOWED_{HELLO_{LOSS}}} * \mathrm{HELLO_{INTERVAL}}$ ส่วนเส้นทางไปยังโนดข้างเคียงต้องประกอบไปด้วยลำดับหมายเลขปลายทางล่าสุดจากข้อความ Hello ซึ่งทำให้โนดปัจจุบันสามารถเริ่มส่งแพ็คเกตข้อมูลไปตามเส้นทางได้

2.5.6 ข้อความความผิดพลาดเส้นทาง เส้นทางหมดอายุและการลบข้อมูลเส้นทาง

โดยทั่วไปการประมวลผลของความผิดพลาดเส้นทาง (Route error) และการขาดของเส้นเชื่อม (Link breakage) ต้องอาศัยขั้นตอนดังต่อไปนี้:

- ไม่มีเส้นทางที่ใช้ได้
- รายชื่อโนดมีผลต่อปลายทาง
- บ่งชี้ว่าโนดข้างเคียงใดได้รับผลกระทบ
- ส่งข้อความ RERR ที่เหมาะสมไปยังโนดข้างเคียงนั้น

หากมีรายชื่อโนดก่อนหน้าหลายโนด ข้อความ RERR จะถูกส่งได้ทั้งแบบแพร่กระจายและแบบทางเดียวหากมีรายชื่อก่อนหน้าเพียงหนึ่งโนด หรือถ้ามีหลายรายชื่อโนดก่อนหน้าอาจจะส่งแบบทางเดียวไปยังทุกรายชื่อทีละตัว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3

อัลกอริทึมที่นำเสนอ: การประยุกต์ใช้งานช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงในการพิจารณาเลือกเส้นทางการส่งข้อมูลในโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางพื้นฐาน AODV

ในบทที่ผ่านมาได้กล่าวถึงหลักการทำงานของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงการทำงานของโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานและหลักการทำงานของอุปกรณ์บนอากาศยานเชิงพาณิชย์ ซึ่งนำมาประกอบสำหรับงานวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทั้งการทำงานของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV และการทำงานของ AANET ที่มีสภาพแวดล้อมที่ทอพอโลยีเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและตลอดเวลาจึงทำให้การวิจัยต้องอาศัยสมมติฐานเพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์ในการศึกษา อีกทั้งการส่งสัญญาณท่ามกลางโนดที่มีความเร็วสูงมากยังเป็นปัญหาหลักของการทำงานของโพรโทคอลสื่อสารต่างๆที่ได้ถูกพัฒนาขึ้น นอกเหนือจากนี้ ADS-B ที่เป็นอุปกรณ์ที่จะทำให้สมมติฐานของ AANET สมจริงก็ยังมีใช้ในทางปฏิบัติน้อยอยู่ จึงทำให้ AANET กลายเป็นงานที่ท้าทายในการจำลองสถานการณ์ให้สมจริง

ในบทนี้จึงได้นำเสนออัลกอริทึมการจัดเส้นทางสำหรับโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานพาณิชย์ โดยวัตถุประสงค์ของอัลกอริทึมการจัดเส้นทางนี้ก็เพื่อหาเส้นทางการส่งข้อมูลจากโนดต้นทางไปยังโนดปลายทางโดยคำนึงถึงคุณลักษณะของอากาศยานเป็นสำคัญ ซึ่งการจัดหาเส้นทางให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมและโนดเคลื่อนที่เป็นสิ่งที่นักวิจัยได้พยายามศึกษาค้นคว้าเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพต่อการส่งข้อมูลมากที่สุด ดังเช่นในการวิจัยนี้ได้มีการนำช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงมาประยุกต์เข้ากับการหาเส้นทางของโพรโทคอลพื้นฐาน AODV ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนักของเส้นเชื่อมที่เน้นเลือกเส้นทางจากช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงเป็นหลัก แล้วจึงพิจารณาเส้นทางที่สั้นที่สุดรองลงมา โดยช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงนี้ได้จำลองมาจากการพิจารณาระยะห่างระหว่างอากาศยานสองลำใดๆ ซึ่งความสูงของอากาศยานที่อยู่คนละระดับความสูงไม่มีผลต่อการคิดเนื่องจากระยะทางในแนวนอนนั้นมีค่ามากเมื่อเทียบกับความสูงที่มีค่าน้อยกว่าระยะทางในแนวนอนถึง 15 เท่าเป็นอย่างน้อย [25] และเพื่อให้เกิดการส่งข้อมูลไปตามโนดที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขนาดนี้ จึงต้องใช้โพรโทคอลพื้นฐานที่สามารถรองรับความเปลี่ยนแปลงของทอพอโลยีได้ดี ซึ่งในที่นี้โพรโทคอล AODV ถูกนำมาใช้เนื่องจากคุณลักษณะเป็นแบบรีแอคทีฟ (Reactive) นั่นคือทำงานต่อเมื่อมีความต้องการจึงทำให้สามารถปรับเปลี่ยนเส้นทางได้อยู่ตลอดเวลา ดังนั้น เมื่อมีโนดข้างเคียงซึ่งเป็นตัวส่งต่อ (Relay) ข้อมูลอยู่ในระยะการส่งข้อมูลจะถูกส่งออกไป แต่ถ้าไม่มีโนดข้างเคียงอยู่ในระยะการส่งข้อมูลจะไม่ถูกส่งต่อ (Loss) แล้วโนดต้นทางจะเริ่มหาเส้นทางใหม่ในการส่งข้อมูล โดยที่มีตัวแปรที่สำคัญคือ ขนาด

ของแพ็คเกต (Packet size) และช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงระหว่าง 2 โนดซึ่งเป็นตัวแปรที่ให้ค่าในการประเมินเส้นทางที่เหมาะสมกับขนาดของข้อมูล

บทที่ 3 ได้แบ่งเป็นหัวข้อดังนี้

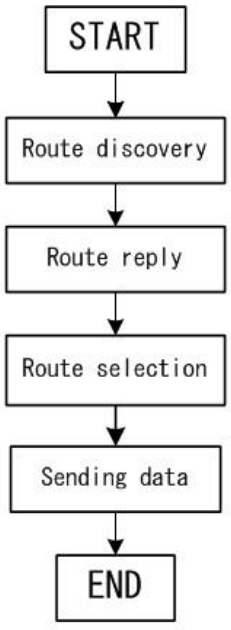
3.1 จุดอ่อนของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV

3.2 ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยง (Link longevity)

3.3 การประยุกต์ใช้ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงในขั้นตอนการเลือกเส้นทางของโพรโทคอล AODV

3.1 จุดอ่อนของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV

โดยพื้นฐานโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV เป็นโพรโทคอลที่มีการค้นหาเส้นทางแบบรีแอคทีฟซึ่งมีความยืดหยุ่นในการทำงานค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาบางสถานการณ์โพรโทคอล AODV กลับให้ผลลัพธ์ที่ไม่เป็นที่น่าพอใจ เนื่องจากโพรโทคอล AODV จะทำการค้นหาเส้นทางตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 เมื่อค้นหาเส้นทางเรียบร้อยจึงเลือกเส้นทาง ซึ่งการเลือกเส้นทางของโพรโทคอล AODV นี้เองมีผลทำให้วิธีการ AODV มีประสิทธิภาพในการส่งต่ำ เนื่องจากการเลือกเส้นทางสั้นที่สุดไม่เป็นผลดีในด้านการส่งข้อมูลเพราะอาจทำให้ข้อมูลที่ต้องการส่งไปถึงปลายทางได้ไม่ครบถ้วนสมบูรณ์ อีกทั้งโนดมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลาทำให้ทอพอโลยีเปลี่ยนบ่อย นอกจากนี้การที่ติดต่อกันได้ไม่ได้สามารถรับรองได้ว่า จะสามารถส่งข้อมูลได้ครบถ้วน โดยการทำงานอย่างง่ายของโพรโทคอล AODV เป็นไปดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังอย่างง่ายของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV

จากรูปที่ 3.1 เป็นการอธิบายการค้นหาเส้นทางอย่างง่ายของโพรโทคอล AODV ซึ่งเริ่มจากการค้นหาเส้นทาง (Route discovery) ซึ่งในที่นี้คือการแพร่กระจายข้อความ RREQ ไปยังโนดข้างเคียง หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการตอบกลับเส้นทาง (Route reply) ของโนดข้างเคียงและโนดปลายทางไปยังโนดต้นกำเนิด เมื่อโนดต้นทางได้รับข้อความตอบกลับเส้นทาง RREP แล้วจึงดำเนินขั้นตอนการเลือกเส้นทาง (Route selection) โดยทำการเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุด แต่เมื่อใดก็ตามที่มีเส้นทางที่สั้นที่สุดมากกว่าหนึ่งเส้นทาง โพรโทคอล AODV จะเลือกโดยอาศัยลำดับหมายเลขปลายทาง (Destination Sequence Number; DSN) ซึ่งลำดับหมายเลขปลายทางนี้เส้นทางใดมีค่ามากที่สุด ซึ่งหมายความว่าเป็นเส้นทางที่มีการอัพเดทล่าสุดจึงจะถูกเลือกเป็นเส้นทางในการส่งข้อมูลในที่สุด

$$DSN_{P_i} > DSN_{P_j}$$

โดยที่ P_i เป็นเส้นทางที่มีค่าลำดับหมายเลขปลายทางอัพเดทล่าสุด

P_j เป็นเส้นทางที่มีค่าลำดับหมายเลขปลายทางเก่า

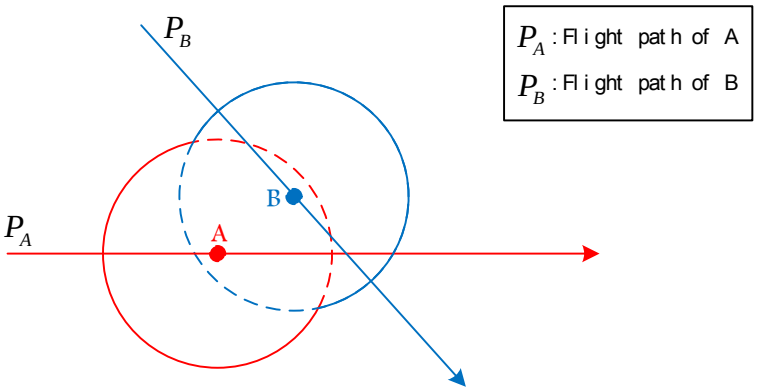
เมื่อ DSN_{P_i} มีค่ามากที่สุด โพรโทคอล AODV จึงทำการเลือกเส้นทาง P_i ในการส่งข้อมูล

3.2 ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยง (Link longevity)

หากคำนึงถึงประสิทธิภาพการส่งแพ็คเกตใดๆก็ตาม ควรคำนึงถึงระยะเวลาในการเชื่อมต่อของโนดด้วยว่า ใช้เวลาเพียงพอในการส่งข้อมูลหรือแพ็คเกตครบถ้วนหรือไม่ มิเช่นนั้นอาจเป็นการส่งที่รวดเร็วแต่ส่งข้อความได้ไม่สมบูรณ์ ทำให้ต้องเสียเวลาในการเริ่มการส่งข้อความซ้ำ นอกจากว่าจะมีการคำนวณไว้อย่างครบถ้วนแล้วว่าระยะเวลาเท่าใดที่จะส่งแพ็คเกตได้สมบูรณ์ ดังที่เสนอในวิทยานิพนธ์นี้คือ การนำตัวชี้วัดของช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงที่มาใช้ในการเลือกเส้นทางเพื่อเพิ่มอัตราการส่งข้อความสำเร็จให้สูงมากขึ้น

กำหนดให้ทุกโนดในโครงข่ายมีระยะการส่งเท่ากัน โนดสองโนดใดๆจะมีช่วงเวลาที่สามารถติดต่อสื่อสารกันได้ในช่วงเวลาหนึ่ง ซึ่งได้จำลองดังรูปที่ 3.2 เมื่อทั้งสองโนดเคลื่อนที่เข้ามาอยู่ในระยะการส่งของกันและกันจนกระทั่งเคลื่อนที่ออกจากระยะการส่งของกันและกันไปในที่สุด ซึ่งเรียกช่วงเวลาดังกล่าวว่า “ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยง”

ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงเกิดจากการจำลองและจินตนาการภาพอากาศยานเป็นคู่โดยมีค่าระยะการส่งค่าหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานในการส่ง เมื่อนำช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงเข้ามาพิจารณาในการหาเส้นทาง โนดทั้งคู่ต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์ ADS-B เพื่อให้สามารถทราบถึงทิศทางและความเร็วของโนดข้างเคียงของตัวเองได้จาก [17] จึงได้มีการสร้างสมการเพื่อหาช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงของโนดสองโนดใดๆขึ้นมา



รูปที่ 3.2 การเคลื่อนที่ของสองโนดที่ทำให้เกิดช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยง

โดยรูปที่ 3.3 (ก) เป็นรูปแสดงค่าของการประมาณช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงและรูปที่ 3.3 (ข) แสดงระยะเวลาที่เหลืออยู่ก่อนจะเข้ามาในระยะการส่งของโนดตัวส่ง

กำหนดให้ : x_A, x_B แทนพิกัดตามแนวแกน x ของโนด A และ B ตามลำดับ

y_A, y_B แทนพิกัดตามแนวแกน y ของโนด A และ B ตามลำดับ

z_A, z_B แทนพิกัดตามแนวแกน z ของโนด A และ B ตามลำดับ

$\vec{D}_{BA}$ แทนระยะทางสัมพัทธ์ของโนด A ถึงโนด B

D_{BA} แทนระยะทางของโนด A ถึงโนด B

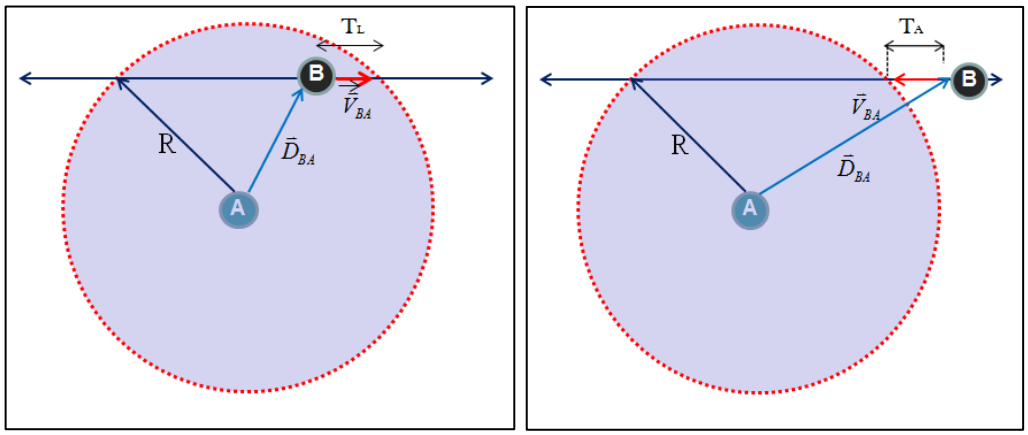
$\vec{V}_{BA}$ แทนความเร็วสัมพัทธ์ของโนด A ถึงโนด B

V_{BA} แทนความเร็วของโนด A ถึงโนด B

โดยที่โนด A เป็นโนดต้นทางและโนด B เป็นโนดปลายทาง ให้พารามิเตอร์ของตำแหน่งและความเร็วของโนด A และโนด B เมื่อโนด B ได้รับสัญญาณจากโนด A เป็นดังนี้:

พิกัดของโนด $A: A(x_A, y_A, z_A), \vec{V}(v_{xA}, v_{yA}, v_{zA})$

พิกัดของโนด $B: B(x_B, y_B, z_B), \vec{V}(v_{xB}, v_{yB}, v_{zB})$



รูปที่ 3.3 (ก) อายุของเส้นเชื่อมโยง (ข) ระยะเวลาที่เหลือก่อนที่จะอยู่ในรัศมีการส่งสัญญาณ

โดยที่:

$$x = x_B - x_A, y = y_B - y_A, z = z_B - z_A \quad (1.1)$$

$$v_x = v_{xB} - v_{xA}, v_y = v_{yB} - v_{yA}, v_z = v_{zB} - v_{zA} \quad (1.2)$$

จากข้อมูลข้างต้นจะได้ว่า

$$\overrightarrow{D}_{BA}(x, y, z) = (x_B - x_A, y_B - y_A, z_B - z_A) \quad (1.3)$$

$$D_{BA} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (1.4)$$

$$\overrightarrow{V}_{BA}(v_x, v_y, v_z) = (v_{xB} - v_{xA}, v_{yB} - v_{yA}, v_{zB} - v_{zA}) \quad (1.5)$$

$$V_{BA} = \sqrt{v_x^{\,2} + v_y^{\,2} + v_z^{\,2}} \quad (1.6)$$

เมื่อเวลาผ่านไปเป็น t วินาที จะสามารถหาระยะทางสัมพัทธ์ของโนด B ถึงโนด A จะได้ว่า

$$\overrightarrow{D}_{BA_t}(x_t, y_t, z_t) = (x + v_x t, y + v_y t, z + v_z t) \quad (1.7)$$

ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงจากโนด A ไปถึงโนด B จะหาได้จากระยะเวลาที่โนด B ยังคงอยู่ในขอบเขตของระยะการส่งของโนด A สังเกตได้จากเวลาที่โนด B เคลื่อนที่จากตำแหน่งปัจจุบันไปยังขอบของระยะการส่งของโนด A จะได้ค่าที่ไม่ติดลบดังนี้

$$R = D_{BA} = \sqrt{x_t^{\,2} + y_t^{\,2} + z_t^{\,2}} \quad (1.8)$$

โดยที่ R แทนระยะการส่งสัญญาณของตัวส่งซึ่งสอดคล้องกับ

$$\| \overrightarrow{D}_{BA} + \overrightarrow{V}_{BA} T \|^2 = R^2 \quad (1.9)$$

$$V_{BA}{}^2 T^2 + 2(\overrightarrow{D}_{BA} \cdot \overrightarrow{V}_{BA}) T + D^2{}_{BA} - R^2 = 0 \quad (1.10)$$

$$\overrightarrow{D}_{BA} \cdot \overrightarrow{V}_{BA} = x v_x + y v_y + z v_z \quad (1.11)$$

อย่างไรก็ตาม การแก้ปัญหาสมการที่ (1.10) นี้ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่ปรากฏอยู่ในนิพจน์ด้วยทั้งนี้อาจเกิดกรณีที่ไม่สามารถหาคำตอบได้ ก็ต่อเมื่อโนด B อยู่นอกระยะการส่งของโนด A หรือแม้กระทั่งไม่ได้เคลื่อนที่เข้ามาในระยะการส่งของโนด A เลย เมื่อ T_L เป็นช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยง (Link longevity) และ T_A เป็นเวลาการมาถึง (Arrival time) ซึ่งสามารถหาค่าของ T_L ได้ดังนี้

$$T_L = \frac{-\overrightarrow{D}_{BA} \cdot \overrightarrow{V}_{BA} + \sqrt{(\overrightarrow{D}_{BA} \cdot \overrightarrow{V}_{BA})^2 + (R^2 - D_{BA}{}^2) V_{BA}{}^2}}{V_{BA}^2} \quad (1.12)$$

$$T_A = \frac{-\overrightarrow{D}_{BA} \cdot \overrightarrow{V}_{BA} - \sqrt{(\overrightarrow{D}_{BA} \cdot \overrightarrow{V}_{BA})^2 + (R^2 - D_{BA}{}^2) V_{BA}{}^2}}{V_{BA}^2} \quad (1.13)$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ดังนั้น เวลาทั้งหมดที่โนด B อยู่ในระยะการส่งของโนด A คือ

$T_L - T_A = \frac{2\sqrt{(\vec{D}_{BA} \cdot \vec{V}_{BA})^2 + (R^2 - {D_{BA}}^2){V_{BA}}^2}}{V_{BA}^2}$ เมื่อเวลาเริ่มต้นคือเวลาที่ตั้งไว้เป็นเวลาปัจจุบัน ซึ่งมี T_A เป็นเวลาเข้ามาถึงเมื่อโนด B เข้ามาในระยะการส่งของโนด A และ T_L เป็นเวลาที่โนด B ออกจากระยะการส่งของโนด A ซึ่งทำให้ ณ เวลานั้นโนด B กำลังอยู่ในระยะการส่งของโนด A นั้นหมายความว่า $D_{BA} < R$ สำหรับกรณีที่พิเศษเมื่อโนด A และโนด B เคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่เท่ากัน จะได้ว่า $\vec{V}_{BA} = 0$ ดังนั้นสามารถสรุปการคาดการณ์ของช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงได้ดังนี้

1. เมื่อระยะทางจากโนด A ถึงโนด B มีค่าน้อยกว่าระยะการส่งสัญญาณของโนด A $(D_{BA} \le R)$ และเมื่อความเร็วสัมพัทธ์จากโนด A ถึงโนด B มีค่าเท่ากับศูนย์ $(\vec{V}_{BA} = 0)$ ค่าของอายุเส้นเชื่อมจะมีค่าเป็นอนันต์ $(T_L = \infty)$
2. เมื่อระยะทางจากโนด A ถึงโนด B มีค่าน้อยกว่าระยะการส่งสัญญาณของโนด A $(D_{BA} \le R)$ และเมื่อความเร็วสัมพัทธ์จากโนด A ถึงโนด B มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ $(\vec{V}_{BA} \neq 0)$ ค่าของอายุเส้นเชื่อมโยงสามารถหาได้จากสูตรดังนี้

$$T_L = \frac{-\vec{D}_{BA} \cdot \vec{V}_{BA} + \sqrt{(\vec{D}_{BA} \cdot \vec{V}_{BA})^2 + (R^2 - {D_{BA}}^2){V_{BA}}^2}}{V_{BA}^2}$$

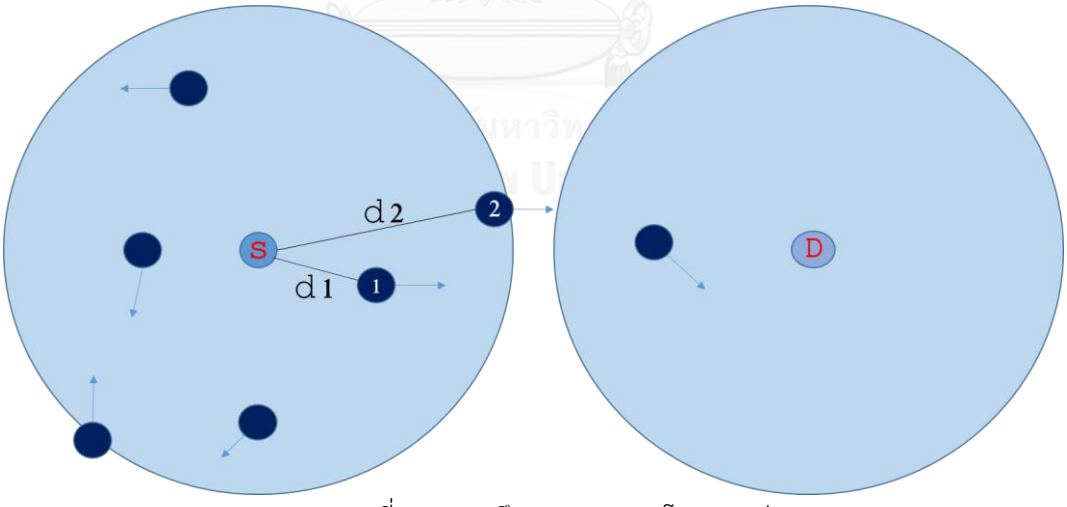
3. เมื่อระยะทางจากโนด A ถึงโนด B มีค่ามากกว่าระยะการส่งสัญญาณของโนด A $(D_{BA} > R)$ และเมื่อความเร็วสัมพัทธ์จากโนด A ถึงโนด B มีค่าเท่ากับศูนย์ $(\vec{V}_{BA} = 0)$ ค่าของอายุเส้นเชื่อมโยงจะหาค่าไม่ได้ $(T_A = \infty)$
4. เมื่อระยะทางจากโนด A ถึงโนด B มีค่ามากกว่าระยะการส่งสัญญาณของโนด A $(D_{BA} > R)$ และเมื่อความเร็วสัมพัทธ์จากโนด A ถึงโนด B มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ $(\vec{V}_{BA} \neq 0)$ ในขณะที่ $\vec{D}_{BA}\vec{V}_{BA} \le 0$ จะสามารถหาค่าของเวลาที่โนด B จะเข้ามาในระยะการส่งของโนด A ได้จากสูตรดังนี้

$$T_A = \frac{-\vec{D}_{BA} \cdot \vec{V}_{BA} - \sqrt{(\vec{D}_{BA} \cdot \vec{V}_{BA})^2 + (R^2 - {D_{BA}}^2){V_{BA}}^2}}{V_{BA}^2}$$

5. เมื่อระยะทางจากโนด A ถึงโนด B มีค่ามากกว่าระยะการส่งสัญญาณของโนด A $(D_{BA} > R)$ และเมื่อความเร็วสัมพัทธ์จากโนด A ถึงโนด B มีค่าเท่ากับศูนย์ $(\vec{D}_{BA}\vec{V}_{BA} > 0)$ ค่าของอายุเส้นเชื่อมโยงจะมีค่าเป็นศูนย์

3.2.1 การศึกษาระยะที่เหมาะสมของโนดระหว่างกลาง

เนื่องจากการจำลองโปรแกรมที่มีขึ้น ได้กำหนดให้โนดระหว่างกลางที่อยู่ในระยะการส่งของโนดต้นทางทั้งหมดสามารถรับและส่งข้อมูลได้ด้วยความแรงของสัญญาณส่งที่เท่ากันโดยมิได้มีการลดทอนสัญญาณส่งตามระยะทางเลย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดการศึกษาว่า หากมีโนดระหว่างกลางที่จะทำการส่งแพ็คเกตต่อไปให้หลายๆโนดแล้ว โนดระหว่างกลางตัวใดจะให้ประสิทธิผลดีที่สุดระหว่างตัวที่อยู่ใกล้ขอบสัญญาณส่งกับตัวที่อยู่ไกลขอบสัญญาณส่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 กำหนดให้โนด S คือโนดต้นทางและ D คือโนดปลายทาง โดยโนดที่ 1 และโนดที่ 2 เป็นโนดระหว่างกลางของโนดต้นทางและปลายทางซึ่งทั้งสองโนดนี้กำลังเคลื่อนที่ไปในทิศทางมุ่งหน้าเข้าหาโนดปลายทาง ซึ่งโนดที่ 1 นั้นอยู่ห่างจากโนดต้นทางเป็นระยะทาง $d1$ และโนดที่ 2 อยู่ห่างเป็นระยะทาง $d2$ เมื่อ $d1 < d2$ และ $d2 = R$ และ R คือระยะการส่งของโนด S นอกจากนี้ทั้งโนด 1 และโนด 2 ยังอยู่ในรัศมีการส่งของโนดต้นทางทั้งคู่ ในกรณีที่ให้ทุกโนดสามารถรับ-ส่งของมูลได้ 100% หากว่าโนดนั้นอยู่ในรัศมีการรับ-ส่งแล้วโนดที่ 2 เหมาะจะเป็นโนดส่งต่อแพ็คเกตมากที่สุด เพราะอยู่ใกล้โนดปลายทางมากกว่าโนดที่ 1 จำนวนฮอปที่ใช้ไปถึงอาจน้อยกว่า เป็นการลดจำนวนฮอปในขณะที่คุณภาพการส่งเท่ากัน



รูปที่ 3.4 การศึกษาระยะของโนดระหว่างกลาง

3.3 การประยุกต์ใช้ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงในขั้นตอนการเลือกเส้นทางของโพรโทคอล AODV

โดยปกติของ AODV เมื่อค้นหาเส้นทางแล้วจะเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นอันดับแรก แต่หากมีเส้นทางที่สั้นที่สุดหลายเส้นทาง AODV จะเลือกจากหมายเลขลำดับเส้นทางของโนดปลายทางที่

ปัจจุบันที่สุด ซึ่งอัลกอริทึมที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นจาก AODV นั้นจะแตกต่างออกไป โดยการเพิ่มขั้นตอนการเลือกเส้นทางที่มีการใช้ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงเป็นน้ำหนักของเส้นเชื่อมแทนการเลือกจากเส้นทางที่สั้นที่สุด ซึ่งช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงทำให้การส่งข้อมูลของโนดใดๆมีเปอร์เซ็นต์ความสำเร็จมากขึ้นเมื่อเทียบกับโพรโทคอล AODV ที่เลือกเส้นทางเพียงบนพื้นฐานของเส้นทางที่สั้นที่สุดเท่านั้น

3.3.1 การเพิ่มช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงในข้อความ RREQ

ตามที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 2.5.4.2-2.5.4.4 ถึงการผลิต การควบคุมการส่ง และการประมวลผลของข้อความ RREQ โดยหากมีความต้องการเส้นทาง โนดต้นทางจะเริ่มกระจายข้อความร้องขอเส้นทางไปยังโนดข้างเคียงที่อยู่ในรัศมีการส่ง ซึ่งในข้อความร้องขอเส้นทางนี้เอง ที่ได้ถูกเพิ่มปัจจัยในการเลือกเส้นทางเข้าไปด้วย นั่นคือ ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยง ซึ่งโนดที่ได้รับข้อความ RREQ ก็จะเป็นโนดที่คำนวณและเปรียบเทียบเวลาการเชื่อมต่อกับเวลาของแพ็คเก็ตที่โนดต้นทางต้องการส่งว่ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับหรือไม่ หากไม่ โนดจะไม่กระจายข้อความร้องขอเส้นทางนั้นต่อไป แต่ถ้าใช่ โนดข้างเคียงนั้นจะกระจายข้อความร้องขอเส้นทางต่อไปยังโนดข้างเคียงของตนและโนดข้างเคียงอื่นจะทำเช่นนี้ต่อไปจนกระทั่งถึงโนดปลายทาง เมื่อโนดปลายทางส่งข้อความตอบกลับเส้นทางมายังโนดต้นทาง นั่นหมายความว่าเส้นทางนั้นเพียงพอที่จะทำให้การส่งแพ็คเกต จากต้นทางไปยังปลายทางเป็นไปได้อย่างสมบูรณ์ครบถ้วน

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1							
type	J	R	G	D	U	Link longevity	Hop Count
RREQ ID							
Destination IP Address							
Destination Sequence Number							
Originator IP Address							
Originator Sequence Number							

รูปที่ 3.6 RREQ ที่มีการเพิ่มช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยง

3.3.2 การทำงานในขั้นตอนการร้องขอเส้นทาง

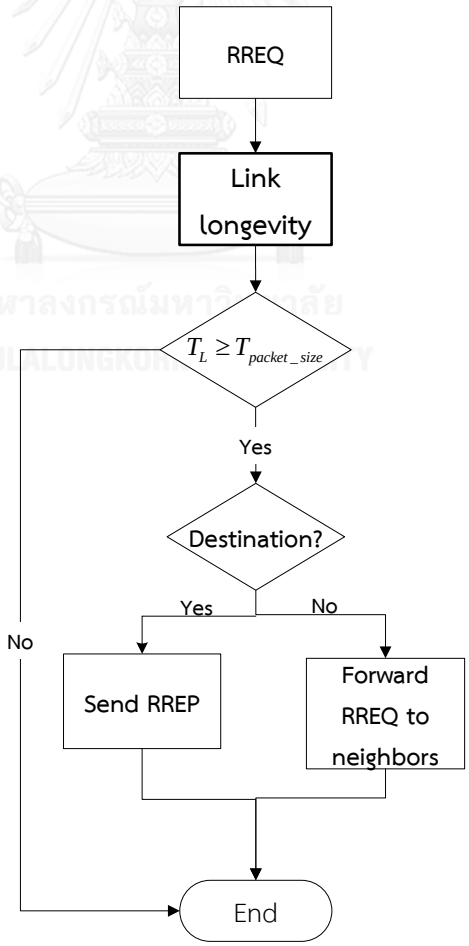
$$T_{packet_size} = \frac{packet_size}{data_rate} \quad (1.14)$$

$$T_L < T_{packet_size} \quad (1.15)$$

$$T_L \geq T_{packet_size} \quad (1.16)$$

โดยที่

การทำงานของอัลกอริทึมที่นำเสนอเป็นไปดังแผนผังที่ 3.7 โดยได้มีการเพิ่มปัจจัยในการเลือกเส้นทางไปในขั้นตอนการหาเส้นทางของการค้นหาเส้นทางของโพรโทคอล AODV หรือที่ข้อความร้องขอเส้นทาง RREQ ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ โนดต้นทางจะร้องขอ เส้นทางโดยการส่งแพร่กระจายข้อความ RREQ ไปยังโนดข้างเคียงที่อยู่ในระยะการรับ-ส่ง จากนั้นโนดข้างเคียงจะคำนวณช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงระหว่างตนกับโนดต้นทาง ซึ่งจะบันทึก ไว้ในข้อความ RREQ แล้วจึงทำการเปรียบเทียบช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงที่คำนวณได้กับช่วงเวลาสื่อสาร (Session time) ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก (1.14) แต่ในวิทยานิพนธ์นี้คำนึงถึงข้อมูลเสียงเป็นหลัก จึงได้คิดออกมาเป็นช่วงเวลาสื่อสารเลย หลังจากการเปรียบเทียบแล้วหากได้ออกมาเป็นดัง (1.15) นั่นคือ ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงมีเวลาน้อยกว่าการใช้ช่วงเวลาสื่อสาร โนดข้างเคียงจะละทิ้งข้อความ RREQ นั้นไป แล้วโนดต้นทางจึงต้องเริ่มการค้นหาเส้นทางใหม่ แต่หากเปรียบเทียบเวลาแล้วออกมา ได้ดัง (1.16) นั่นคือ ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงมีช่วงระยะเวลายาวนานกว่าช่วงเวลาสื่อสาร โนดข้างเคียงนั่นจึงจะพิจารณาว่าตนเป็นโนดปลายทางหรือไม่ หากไม่ก็แพร่กระจาย RREQ ไปยังโนดข้างเคียงต่อๆไป แต่หากใช่จะส่ง RREP กลับไปยังโนดต้นทาง แล้วโนดต้นทางจะเริ่มการส่ง ข้อมูลต่อไป



รูปที่ 3.7 แผนผังการทำงานในขั้นตอนการส่งข้อความร้องขอเส้นทาง

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

บทนี้เป็นบทที่กล่าวถึงผลการทดลองรวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ซึ่งจะมีการแบ่งการศึกษาไปตามสถานการณ์ โดยการจำลองโปรแกรมของวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้โปรแกรม MATLAB ในการทำผลการทดลอง เมื่อมีเส้นทางการบินที่ถูกนำมาจากเส้นทางการบินของประเทศไทยของจริงที่มีการปรับปรุงล่าสุดในปี 2557 มาลอกแบบและจำลองเป็นทอพอโลยีที่มีอากาศยานเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางนั้นๆ โดยต้นทางและปลายทางของอากาศยานได้อิงจากแผนการบิน (Flight plan) ทั่วประเทศ ณ ปี 2557 เช่นกัน นอกเหนือจากนี้ยังได้มีการปรับความหนาแน่นของเส้นทางการบินให้มีความสอดคล้องกับการจำลองโปรแกรม ซึ่งในการทำงานของการประยุกต์ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงเข้ากับโพรโทคอลพื้นฐาน AODV นี้เป็นการเปลี่ยนแปลงปัจจัยเป็นช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงมีผลทำให้เกิดการปรับปรุงค่าบางค่าให้ดียิ่งขึ้นซึ่งจะได้ทราบต่อไป โดยสำหรับบทที่ 4 ได้แบ่งการเขียนออกเป็นหัวข้อดังนี้

4.1 ผลการจำลองเบื้องต้น

4.2 สภาพแวดล้อมของการจำลอง

4.2.1 แบบจำลองโครงข่าย

4.2.2 การตั้งค่าสมมติฐานของการจำลอง

4.3 พารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

4.4 ผลการจำลองและการวิเคราะห์

4.5 สรุปผลการทดลอง

4.1 ผลการจำลองเบื้องต้น

4.1.1 การเคลื่อนที่ของโนดและเวลาประวิงในโครงข่าย

โดยแบบจำลองอย่างง่ายที่มีโนดสองโนดกำลังส่งข้อมูลถึงกันดังรูปที่ 3.2 ทำให้สามารถสมมติได้ว่า ณ เวลาที่ส่งข้อมูล ไม่ว่าโนดตัวรับจะหยุดนิ่งหรือกำลังเคลื่อนที่ก็จะให้เวลาไม่แตกต่างกัน ด้วยเหตุว่า ความเร็วของการเคลื่อนที่ของโนดตัวรับใดๆมีค่าเท่ากับ v ซึ่งน้อยกว่าความเร็วแสง c หรือ

ความเร็วของการเคลื่อนที่ของแพ็คเกต ดังนั้นในการคำนวณการประวิงเวลาที่สั้นที่สุด สามารถแบ่งพิจารณาเวลาประวิงได้เป็น 3 ส่วนดังนี้

- เวลาการรอคอย (Waiting time) พิจารณาเวลาตั้งแต่เริ่มร้องขอการติดต่อจนถึงการติดต่อสำเร็จ หมายความว่า เป็นเวลาที่รอให้มีเส้นเชื่อมว่างเพื่อติดต่อได้รวมกับเวลาที่แพ็คเกตทั้งหมดออกจากเส้นเชื่อม
- เวลาประวิงการส่ง (Transmission delay) พิจารณาเวลาที่ส่งแพ็คเกตเข้าสู่เส้นเชื่อมได้สำเร็จทั้งข้อมูล
- เวลาประวิงการแพร่กระจาย (Propagation delay) พิจารณาเวลาตั้งแต่เริ่มส่งข้อมูลจนส่งสำเร็จ

นิยามตัวแปร

- c คือความเร็วการเคลื่อนที่ของข้อมูลหรือความเร็วของแสงมีค่า 3×10^8 เมตรต่อวินาที
- v คือความเร็วสัมพัทธ์ของโนดตัวรับ (เมตรต่อวินาที)
- d คือระยะทางที่ข้อมูลจะส่งถึงโนดตัวรับในขณะที่โนดตัวรับกำลังเคลื่อนที่ (เมตร)
- D คือระยะทางระหว่างโนดตัวส่งกับโนดตัวรับ (เมตร)
- t คือระยะเวลาตั้งแต่ข้อมูลถูกส่งออกจากเครื่องส่งจนกระทั่งข้อมูลถึงเครื่องรับ (วินาที)

จากรูปที่ 3.2 ขณะที่ทั้งสองโนด (โนดตัวส่งและโนดตัวรับ) เคลื่อนที่อยู่ เมื่อข้อมูลถูกส่งระยะทางที่ข้อมูลจะส่งไปถึงโนดตัวรับมีค่าเป็น d เมตร โดยที่ข้อมูลถูกส่งด้วยความเร็วแสง $c=3\times10^8$ เมตรต่อวินาที ซึ่งใช้เวลาทั้งหมด t วินาที ทำให้กล่าวได้ว่า $d=ct$ ในขณะที่โนดตัวรับที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว v (โดยปกติมีค่า 200-270 เมตรต่อวินาทีจะเคลื่อนที่จากจุดเดิม (ด้วยระยะทางเท่ากับความเร็วของโนดตัวรับคูณกับเวลา (vt) และเมื่อรวมกับระยะทางก่อนที่ข้อมูลจะถูกส่งจากโนดตัวรับ ซึ่งมีระยะทาง D แล้ว จะมีค่าเท่ากับระยะทางที่ข้อมูลเดินทาง อย่างไรก็ตามความเร็วของโนดทั้งสองมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความเร็วแสงที่แพ็คแกตใช้เคลื่อนที่ ดังนั้นเราสามารถตั้งสมมุติฐานได้ว่า เราสามารถพิจารณาโนดที่กำลังเคลื่อนที่ได้เสมือนโนดเหล่านั้นหยุดนิ่งเพื่อประเมินสมรรถนะหาค่าเฉลี่ยเวลาประวิงต่อไป

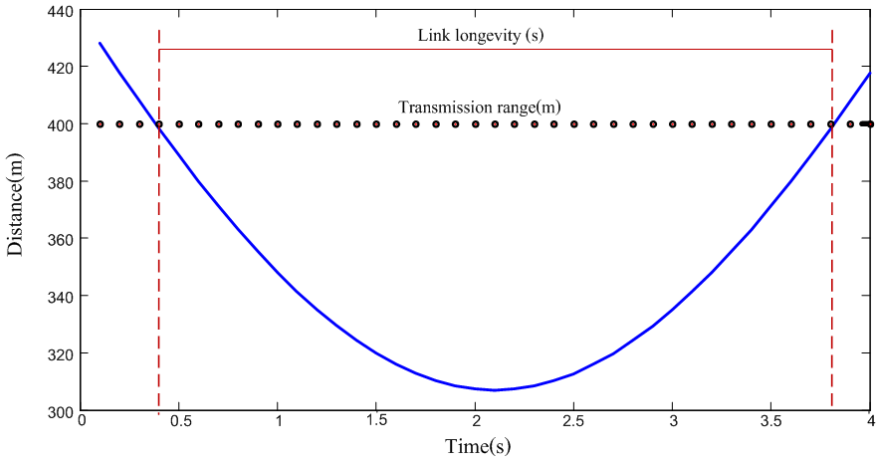
จากผลการทดลองของการประมาณค่าช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงดังสมการที่ (1.12) โดยมองจากมุมบน (Top view) ของการเชื่อมต่อระหว่างโนดสองโนดแบบจำลองเป็นดังรูปที่ 3.3 จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมแมทแลบ กำหนดให้ P_A เป็นเส้นทางบินของโนด A ที่มีความเร็วเป็น $\overrightarrow{V_A}$ และ P_B เป็นเส้นทางบินของโนด B ที่มีความเร็วเป็น $\overrightarrow{V_B}$ โดยที่ทั้งสองโนดเคลื่อนที่เป็นสมการเส้นตรงตลอดเส้นทางการ บินโดยที่ทราบตำแหน่งเริ่มต้นของทั้งสองโนด ส่วนระยะทางแรกเริ่มของทั้งสองโนดนั้น

ห่างกัน 430 เมตร ซึ่งโนด B อยู่นอกระยะการส่งของโนด A ซึ่งข้อมูล ณ จุดนี้เราสามารถคำนวณเวลาเข้าถึง (T_A) ของโนด B ไปยังโนด A หลังจากนั้นทั้งสองเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางการบินเรื่อยๆ จนกระทั่งเส้นทางการบินของทั้งสองตัดกัน ทำให้เกิดการเชื่อมต่อระหว่างกันและกัน เมื่อโนด B ได้เริ่มการเชื่อมต่อหรือว่าเคลื่อนที่เข้าไปในระยะการส่งของโนด A จะเกิดการคำนวณช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยง (T_L) ขึ้น ดังนั้นจึงสามารถหาค่าของช่วงเวลาการเชื่อมต่อของสองโนดใดๆ ได้จากการทราบข้อมูลดังนี้ได้แก่ ตำแหน่ง ความเร็ว และทิศทาง โดยค่าพารามิเตอร์ที่ตั้งไว้ของผลการทดลองอย่างง่ายนี้เป็นดังต่อไปนี้

- ระยะการส่งสัญญาณของแต่ละโนด (R) 400 เมตร
- ความเร็วของโนด A 480 กม/ชม
- ความเร็วของโนด B 350 กม/ชม

โดยผลการทดลองเบื้องต้นนี้ต้องการแสดงให้เห็นว่าช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงมีผลต่อการประยุกต์ใช้ในการค้นหาเส้นทาง หรือในที่นี้ได้ประยุกต์เข้ากับขั้นตอนการเลือกเส้นทาง ซึ่งทำให้ทราบว่าโนดต้นทางจะสามารถคงสภาพการเชื่อมต่อในเส้นทางนั้นๆ โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงบ่อยและก่อให้เกิดรูปที่ 4.1 เมื่อแกนนอน (x-axis) แสดงถึงเวลาและแกนตั้ง (y-axis) แสดงถึงระยะทาง โดยมีเส้นประสีแดงแสดงถึงจุดเริ่มต้นและสิ้นสุดการเชื่อมต่อ เส้นทึบสีน้ำเงินแสดงระยะการเคลื่อนที่เข้าหาและออกจากกันของสองโนด เส้นประสีดำแสดงถึงระยะการส่งซึ่งมีค่าเท่ากับ 400 เมตร ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า โนดสองโนดที่อยู่ไกลจากกันจะค่อยๆเคลื่อนที่เข้าใกล้กันจนกระทั่งทั้งสองโนดได้เข้าสู่ระยะการส่งของกันและกันดังรูปที่ 4.1 เมื่อนั้นโนดทั้งสองจึงเริ่มการเชื่อมต่อจนกระทั่งเคลื่อนที่ไกลกันออกไปพ้นระยะการส่งจึงส่งผลให้การเชื่อมต่อขาดหาย ซึ่งช่วงเวลาที่เริ่มการเชื่อมต่อจนกระทั่งสิ้นสุดการเชื่อมต่อนั่นคือ ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงนั่นเอง จากที่กล่าวข้างต้น หากสามารถคาดการณ์ระยะเวลาการเชื่อมต่อของโนดสองโนดได้จะสามารถนำช่วงเวลานั้นมาประมวลผลเพื่อให้เกิดการส่งข้อมูลที่ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 4.1 ผลการทดลองแสดงความสำคัญของช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยง

ในทางการบินอากาศยานได้ถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มตามน้ำหนักของอากาศยานตอนบินขึ้น (Take-off) คือ เล็ก กลาง และใหญ่ ซึ่งความเร็วโดยปกติแล้วจะมีความเร็วมาก-น้อยไปตามกลุ่มที่แบ่งนี้ด้วย นอกเหนือจากนี้ในทางปฏิบัติความเร็วของอากาศยานมีหลายความเร็วเหมือนกันซึ่งเป็นไปตามที่กำหนดไว้ในแผนผังของแต่ละสนามบิน (Aerodrome chart) หรือแต่ละการเข้าถึงสนามบิน (En-route chart) เช่น ความเร็วตอนขึ้น (Take-off speed) ความเร็วไต่ขึ้น (Climbing speed) ความเร็วในเส้นทาง (En-route speed or cruising speed) ความเร็วไต่ลง (Descending speed) และความเร็วตอนลง (Landing speed) เป็นต้น

โดยความเร็วที่นำมาพิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้เป็นความเร็วเฉลี่ยของอากาศยานพาณิชย์ที่ใช้ในช่วงของการบินในเส้นทาง (En-route or cruising speed) และอากาศยานขนาดเล็กไม่พิจารณาในวิทยานิพนธ์นี้ เนื่องจากอากาศยานเล็กจะบินที่ความสูงต่ำกว่า และด้วยความเร็วน้อยกว่าอากาศยานขนาดกลางและขนาดใหญ่ซึ่งก็เป็นไปตามสมรรถนะของอากาศยานลำเล็ก อีกทั้งอากาศยานพาณิชย์ที่เน้นขนส่งผู้โดยสารจะเป็นอากาศยานขนาดกลางและขนาดใหญ่อยู่แล้ว

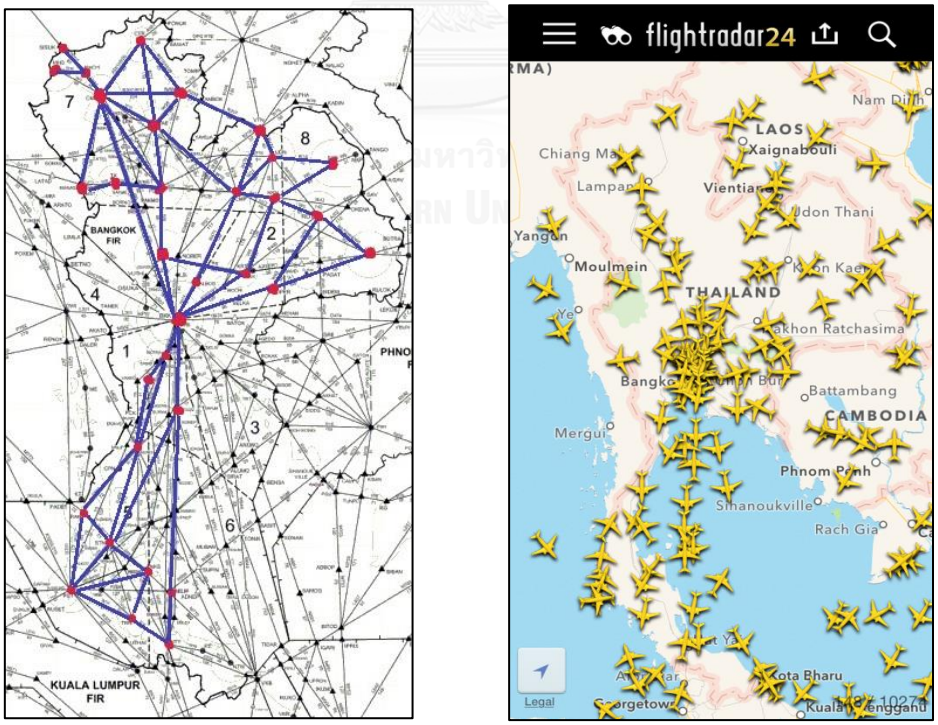
4.2 สภาพแวดล้อมของการจำลอง (Simulation Environment)

โปรแกรมในการจำลองกระบวนการทั้งหมดในวิทยานิพนธ์นี้ได้แก่โปรแกรมแมทแลบซึ่งเป็นโปรแกรมใช้ที่จำลองเหตุการณ์โดยอาศัยพื้นฐานคณิตศาสตร์ ที่สามารถจำลองเหตุการณ์ตามลำดับและสามารถออกแบบให้โปรแกรมทำงานภายใต้สถานการณ์ต่างๆตามที่กำหนดได้ โดยการเขียนโปรแกรมจำลองนี้เจาะจงที่ชั้นเครือข่าย (Network layer) แต่ในบางกรณีที่เกี่ยวข้องกับการนับเวลาตั้งแต่การส่งถึงการรับอาจไม่สามารถให้ค่าเวลาได้ตามจริงและต้องอาศัยการสมมติขึ้น เนื่องจากการส่งแพ็คเกตเริ่มตั้งแต่ชั้นที่จับต้องได้ (Physical layer) ชั้นแมค (MAC layer) ไปจนถึงชั้นการใช้ (Application layer) ทำให้การที่เจาะจงเขียนโปรแกรมจำลองขึ้นมาที่ชั้นเน็ตเวิร์คอาจต้องละเลย

เวลาจากชั้นอื่นๆ เมื่อเทียบกับบางโปรแกรมที่มีการเขียนโปรแกรมสำเร็จของชั้นอื่นๆที่นอกเหนือจากชั้นเครือข่ายไว้แล้ว

4.2.1 แบบจำลองโครงข่าย (Network model)

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้เส้นทางการบินซึ่งเป็นเส้นทางการบินที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบันของน่านฟ้าประเทศไทย แม้ว่าพื้นที่ของประเทศไทยจากเหนือ-ใต้มีความยาว 1,700 กิโลเมตรและจากตะวันตก-ตะวันออกมีความกว้าง 850 กิโลเมตร (1,7000กมx850กม) แต่น่านฟ้าไทยไม่ได้มีความยาวเท่ากับทางภาคพื้นแบบพอดี แต่ยังรวมพื้นที่น่านฟ้าเหนืออ่าวไทยและทะเลอันดามันบางส่วนเข้ามาด้วยจึงทำให้น่านฟ้าไทยมีขนาดใหญ่กว่าภาคพื้นดินอยู่มากดังรูปที่ 4.2 (ก) เพื่อให้สอดคล้องกับการศึกษาและจำลองสถานการณ์ วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเส้นทางการบินมาบางเส้นทางซึ่งเป็นเส้นทางที่มุ่งตรงไปยังสนามบินที่อากาศยานโดยสารทำการขึ้น-ลงอยู่เป็นประจำในปัจจุบัน ทั้งเส้นทางที่มีอากาศยานหนาแน่นและเส้นทางที่มีอากาศยานเบาบาง อย่างไรก็ตามยังคงไว้ซึ่งเส้นทางการบินที่สำคัญที่จะทำให้เห็นผลการศึกษาบางอย่างต่อการวิจัย รูปที่ 4.2 (ข) มาจากการจับภาพ (Capture) จากโปรแกรมประยุกต์ไฟล์ทเรดาร์24 (Flightrasar24) ณ วันที่ 2 มิย 58 เวลา 17.06 น. สังเกตได้ว่าการบินของอากาศยานนั้นบินอย่างมีหลักการและแบบแผน ซึ่งบินไปตามเส้นทางบินที่ถูกสร้างขึ้นมาโดยมีสัญญาณนำร่องไปตามสถานีต่างๆที่อยู่ระหว่างเส้นทาง



รูปที่ 4.2 (ก)รูปจำลองทอพอโลยีของโครงข่าย (ข) อากาศยานเหนือน่านฟ้าประเทศไทย

จากที่กล่าวข้างต้นนั้นมีเส้นทางการบินหลายเส้นทางที่อยู่เหนือมหาสมุทรและบางเส้นทางที่เป็นเส้นต่อเนื่องมาจากน่านฟ้าประเทศเพื่อนบ้านทั้งเหนือ ใต้ ตะวันออกและตะวันตก ซึ่งอาจไม่ได้ผ่านสนามบินใดของประเทศไทยเลย จึงเรียกเส้นทางบินเหล่านั้นว่า เส้นทางบินผ่าน (Overfly) ซึ่งมีอัตราการเข้าของอากาศยานที่มากกว่าอากาศยานที่บินขึ้น-ลงสนามบินต่างๆ นอกเหนือจากนี้อัตราการบินขึ้น-ลงของอากาศยานของแต่ละสนามบินมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากบางสนามบินเป็นสนามบินนานาชาติที่มีเที่ยวบินบินตรงจากต่างประเทศมากมาย ในขณะที่บางสนามบินเป็นสนามบินเล็กๆ ต่างจังหวัดมีเที่ยวบินพาณิชย์มาลงวันละ 2-4 เที่ยวบินเท่านั้น จากบทที่ 2 ที่ว่าอากาศยานต้องมีการจัดระยะห่างระหว่างกันตามกฎการบินขององค์การการบินพลเรือนสากล ทำให้การเกิดของอากาศยานแต่ละสนามบินได้อ้างอิงจากการจัดระยะห่างนั้นเป็นหลักและปรับให้เหมาะสมกับการจำลองสถานการณ์ ซึ่งอัตราการเกิดของอากาศยานเป็นการสุ่มแบบสม่ำเสมอ (Uniform) การจึงทำให้ช่วงเกิดอากาศยานของแต่ละสนามบินเป็นไปดังตารางที่ 4-1 นี้ ยกตัวอย่างเช่น สนามบินเชียงใหม่ มีช่วงเวลาการเกิดของเครื่องบินเป็น 360-780 วินาที หากเครื่องบินลำแรกเกิดที่เวลา t1=0 ลำที่สองจะเกิดขึ้นมาจากการสุ่มช่วงเวลาดังกล่าว เช่นอาจสุ่มมาได้ t2=400 ลำต่อมาจะทำการ สุ่มเวลาตามช่วงเวลานี้ไปเรื่อยๆจนถึงเวลาที่กำหนดไว้ โดยจะเริ่มค้นหาเส้นทางเมื่อเวลาผ่านไป 80,000 วินาที เนื่องจากการจำลองจะรอให้โนดถูกสร้างขึ้นมาจนเต็มพื้นที่ก่อน

ตารางที่ 4-1 ช่วงเวลาการเกิดอากาศยานของแต่ละสนามบิน

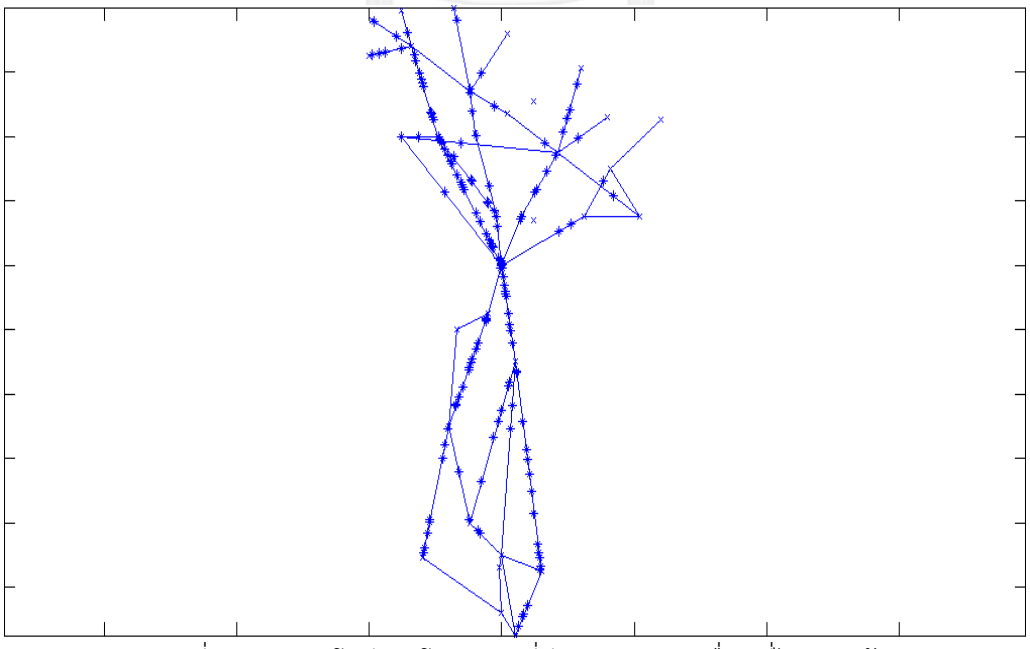
สนามบิน	**ช่วงเวลา(วินาที)**
Overfly	120 - 540
เชียงราย	1800 - 2220
น่าน	1800 - 2220
เชียงใหม่	360 - 780
แพร่	1800 - 2220
อุดรธานี	1800 - 2220
พิษณุโลก	1800 - 2220
ขอนแก่น	1800 - 2220
สกลนคร	1800 - 2220
ร้อยเอ็ด	1800 - 2220
อุบลราชธานี	1800 - 2220
สุวรรณภูมิ/ดอนเมือง*	180 - 600
หัวหิน	1800 - 2220

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ระนอง	1800 - 2220
สุราษฎร์ธานี	1800 - 2220
ภูเก็ต	360 - 740
กระบี่	500 - 920
ตรัง	1800 - 2220
หาดใหญ่	500 - 920

*ในงานวิจัยได้รวมสนามบินสุวรรณภูมิและสนามบินดอนเมืองเป็นสนามบินเดียวเนื่องจากสองสนามบินนี้อยู่ใกล้กันมาก ทำให้การบินขึ้นมาถึงระดับบินแยกไม่ออกเลยว่าขึ้นมาจากสนามบินใดเพราะพื้นที่ศึกษานั้นกว้างกว่ามาก

นอกเหนือจากนี้ตารางที่ 4-1 ยังบ่งบอกได้อีกว่า สนามบินใหญ่ๆซึ่งได้แก่ เชียงใหม่ หาดใหญ่ ภูเก็ต และสุวรรณภูมิ/ดอนเมือง* จะมีอัตราการเกิดของอากาศยานมากกว่าสนามบินต่างจังหวัดตามภูมิภาคต่างๆ เนื่องจากสุวรรณภูมิดอนเมืองเป็นสนามบินของ/จังหวัดกรุงเทพมหานครซึ่งเป็นเมืองหลวงของประเทศไทย ส่วนทั้งเชียงใหม่ หาดใหญ่หรือภูเก็ตต่างก็เป็นเมืองท่องเที่ยวที่นอกจากจะมีเที่ยวบินภายในประเทศมากมายแล้วยังมีอากาศยานเช่าเหมาลำมาจากต่างประเทศบินตรงมายังเมืองท่องเที่ยวทั้งสามแห่งนั้นอีกด้วย ทำให้มีอากาศยานขึ้นลงตลอดเวลา โดยเฉพาะภูเก็ตและเชียงใหม่ที่-มีจำนวนเที่ยวบินมากที่สุดเป็นอันดับสองและสามรองจากสนามบินสุวรรณภูมิดอนเมือง/



รูปที่ 4.3 ทอพอโลยีของโครงข่ายที่มีอากาศยานเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางบิน

รูปแบบของโครงข่ายที่มีเส้นทางการบินเหนือน่านฟ้าไทยของรูปที่ 4.2 เมื่อนำมาเปลี่ยนเป็นสมการเส้นตรงและเขียนแผนที่ขึ้นมา (Plot) อีกทั้งเพิ่มข้อมูลการเกิดของอากาศยานจากตารางที่ 4-1 ทำให้เกิดเป็นรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นรูปแสดงทอพอโลยีของโครงข่ายของวิทยานิพนธ์นี้ เห็นได้ชัดว่าเมื่อมีการเกิดอากาศยานของแต่ละสนามบินไม่เท่ากัน ส่งผลให้เส้นทางการบินบางเส้นทางมีความหนาแน่นมาก ในขณะที่บางเส้นทางมีความหนาแน่นน้อยรวมถึงบางเส้นทางก็ยังไม่มีอากาศยานบินขึ้นมาเลย เนื่องจากขณะจำลองและจับภาพนั้น อาจยังไม่ถึงเวลาที่อากาศยานถูกสร้างขึ้นมา หากเราขยายภาพและพิจารณาเส้นทางบินที่มีจำนวนโนดเยอะจะพบว่า โนดเหล่านั้นมีระยะที่ห่างกันพอสมควรทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของภาพด้วย นอกจากนี้การที่โนดอยู่ติดหรือซ้อนกันนั่นหมายความว่า โนดเหล่านั้นได้บินอยู่ที่เส้นทางบินเดียวกันแต่คนละความสูง ทำให้เมื่อมองจากมุมสูงโนดจะดูเหมือนซ้อนทับกัน

4.2.2 การตั้งค่าสมมติฐานให้กับการจำลอง

1. ลูกข่ายเคลื่อนที่ของโครงข่ายเป็นอากาศยานเชิงพาณิชย์ที่เคลื่อนที่ด้วยทิศทางและความเร็วคงที่บนพื้นฐานของโปรแกรมประยุกต์ ADS-B ที่ทำให้อากาศยานแต่ละลำทราบพิกัดและความเร็วของตนเองและโนดข้างเคียงอยู่ที่อยู่ในรัศมีการรับส่ง-
2. สามารถคาดเดาทอพอโลยีของโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานได้จากแผนการบินและเส้นทางการบินที่มีอยู่
3. ระยะการส่งของอากาศยานแต่ละลำสัญญาณจะถูกส่งโดยรอบทิศทาง)Omnidirectional) ท่ามกลางการเชื่อมต่อของอากาศยาน
4. เมื่อไม่มีโนดข้างเคียงอยู่ในระยะการส่งข้อมูลจะถูกทำให้สูญเสีย)Loss) แล้วโนดต้นทางต้องเริ่มร้องขอเส้นทางใหม่ และจะมีแต่ส่งสำเร็จหรือไม่ส่งเลย
5. ระดับความสูงของอากาศยานไม่มีผลต่อการพิจารณา

4.3 พารามิเตอร์ที่บ่งบอกประสิทธิภาพของอัลกอริทึม

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการชี้วัดประสิทธิภาพอัลกอริทึมของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นพารามิเตอร์ที่วิทยานิพนธ์ใช้วัดผลการทดลองโดยทั่วไปซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพในงานวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- อัตราการส่งแพ็คเกตสำเร็จ (Packet delivery success rate) สามารถคำนวณได้จากจำนวนแพ็คเกตที่ปลายทางได้รับส่วนด้วยจำนวนแพ็คเกตทั้งหมดที่ส่งไป

$$PDR = \frac{Total_Packet_{received}}{Total_Packet_{sent}}$$

- จำนวนฮอปเฉลี่ย (Average number of hops) ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้จำนวนฮอปเฉลี่ยเป็นการแสดงสมรรถภาพของโครงข่ายแทนการวัดเวลาประวิง (Time delay) เนื่องจากการจำลองโปรแกรมนั้นได้เขียนขึ้นมาโดยสมมติว่า เวลาจากชั้นการส่งอื่นๆนอกเหนือจากชั้นโครงข่ายเป็นเวลาในอุดมคติ (Idealistic)

$$Avg.number\ of\ hops = \frac{Total\ delivery\ success\ hops}{Total\ Number\ of\ success}$$

- จำนวนแพ็คเกตทั้งหมด (Total number of packets) ในการค้นหาเส้นทาง โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นับแพ็คเกตของการค้นหาเส้นทางทั้ง RREQ และ RREP

4.4 ผลการจำลองและการวิเคราะห์

4.4.1 การตั้งค่าการจำลอง

การตั้งค่าของโปรแกรมมีการตั้งค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์ ช่วงเวลาการเกิดอากาศยานแบบสุ่มของแต่ละสนามบิน ซึ่งส่งผลให้การจำลองทอพอโลยีออกมาตามรูปที่ได้แสดงด้านล่างต่อไป ในการทดลองได้เลือกตัวรับและตัวส่งมาจากการสุ่มแบบยูนิฟอร์ม ทั้งนี้ผลการทดลองที่ปรากฏออกมานี้มาจากการจำลองทั้งหมด 10,000 ครั้ง จากนั้นนำผลการทดลองทั้งหนึ่งหมื่นครั้งมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อแสดงออกมาเป็นผลการทดลองดังที่แสดงในหัวข้อผลการทดลองต่อไป ระยะการส่งสัญญาณของโนดทุกโนดในระบบมีค่า 60 ไมล์ทะเล หรือประมาณ 112 กิโลเมตร ช่วงเวลาที่ใช้ส่งเซสชั่นกำหนดเป็นวินาที เนื่องจาก แอพพลิเคชั่นที่สนใจคือ เสียงที่โต้ตอบกัน ทางด้านความเร็วของโนดได้นำมาจากความเร็วของอากาศ ยานพาณิชย์ที่ใช้งานอยู่จริง ซึ่งมีความเร็วอยู่ที่ 200-250 กิโลเมตรต่อชั่วโมง จำนวนฮอปในแต่ละ เส้นทางมีค่าตั้งแต่ 2-7 ฮอป โดยพารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกันในการทดลองสรุปได้ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-2 พารามิเตอร์ที่ร่วมกันใช้ตั้งค่าในการจำลอง

พารามิเตอร์	ค่า
ขนาดพื้นที่ (ตารางกิโลเมตร)	1700*850
ระยะการส่งสัญญาณ (กิโลเมตร)	112

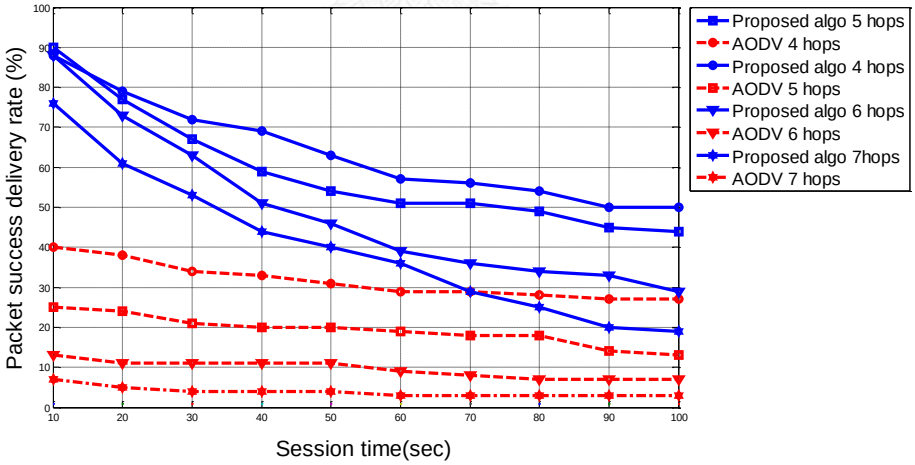
ช่วงเวลาเซสชั่น (วินาที)	10-100
ความเร็วของโนด (เมตร/วินาที)	200-250
จำนวนฮอปที่น้อยที่สุด (ฮอป)	2
TTLที่มากที่สุด (ฮอป)	7

4.4.2 ขั้นตอนการศึกษาและประมวลผลการทดลอง

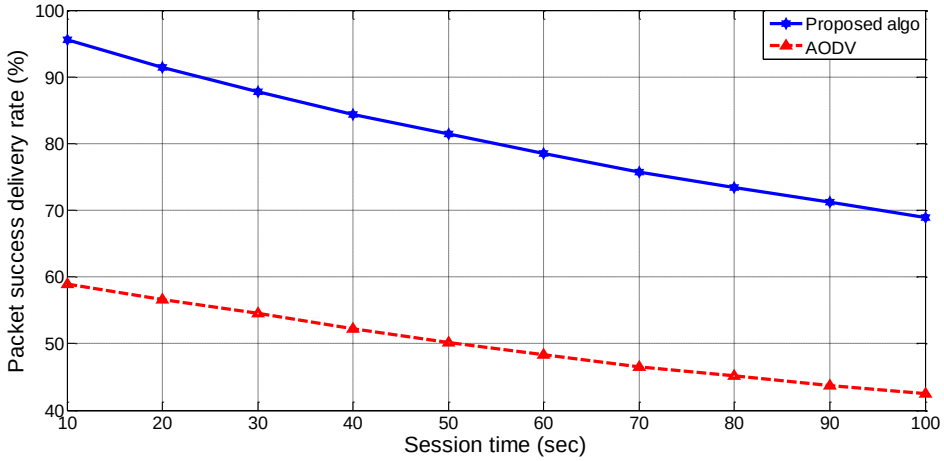
เมื่อได้ตั้งค่าเริ่มต้นแล้ว จึงลงมือศึกษาระบบซึ่งได้มีการจำแนกกระบวนการศึกษาออกเป็นหัวข้อ ซึ่งแต่ละหัวข้อสามารถบ่งบอกความสำคัญของการพัฒนาอัลกอริทึมได้เป็นอย่างดี

4.4.2.1 ผลการศึกษาอัตราการส่งสำเร็จ

เนื่องจากอัลกอริทึมที่นำเสนอมีความสนใจเวลาของเซสชั่นที่ต้องการส่งว่า เพียงพอที่ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงจะส่งหรือไม่ เพราะหากเวลาของช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงได้คำนวณแล้วว่าเพียงพอ นั่นหมายความว่าเซสชั่นที่โนดต้นทางต้องการส่งนั้น อัลกอริทึมที่นำเสนอได้รับรองแล้วว่าสามารถส่งข้อมูลได้ครบถ้วน ด้วยเหตุนี้อัตราความสำเร็จในการส่งเซสชั่นของอัลกอริทึมที่นำเสนอจึงได้เปรียบโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV อยู่มาก



รูปที่ 4.4 อัตราการส่งสำเร็จเมื่อมีจำนวนฮอป 4 - 7 ฮอป



รูปที่ 4.5 อัตราการส่งสำเร็จเมื่อสนใจจำนวนฮอปเฉลี่ยเมื่อ TTL=7

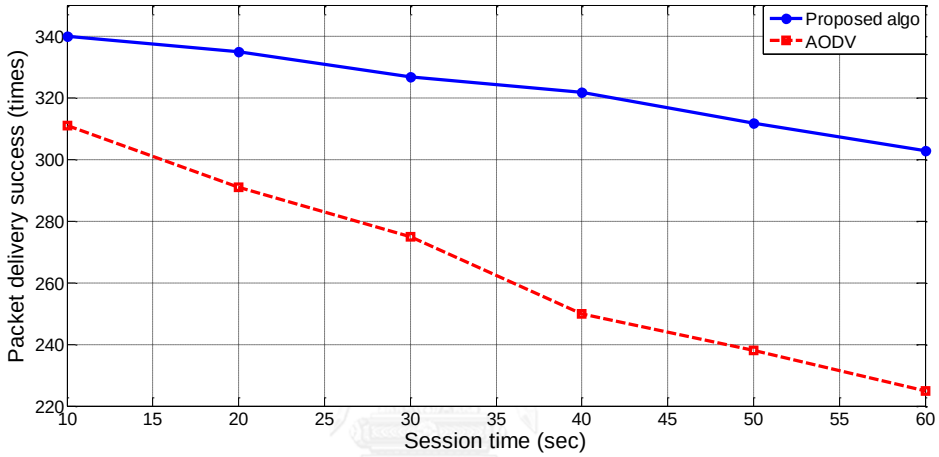
ผลการทดลองที่ปรากฏมาสามารถอธิบายได้ดังนี้

- แกนนอน (X-axis) เป็นเวลาที่ใช้ส่งเซสชั่นมีหน่วยเป็นวินาที
- แกนตั้ง (Y-axis) เป็นอัตราสำเร็จในการส่งเซสชั่นมีหน่วยเป็น%
- กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน แสดงผลการทดลองของอัลกอริทึมที่นำเสนอ
- กราฟเส้นประสีแดง แสดงผลการทดลองของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV

ในส่วนของรูปที่ 4.4 นั้นเป็นการแยกจำนวนโนดออกมาแต่ละเส้นเพื่อความชัดเจนยิ่งขึ้นเมื่อแต่ละเส้นทางต้องใช้จำนวนโนดตั้งแต่ 4 ถึง 7 ฮอป โดยกำหนดให้ ณ เวลา t1=0 โนดต้นทางและโนดปลายทางสามารถติดต่อกันได้เลย โดยที่อัตราการส่งสำเร็จสูงสุดเกิดจากจำนวนฮอปที่น้อยที่สุดในการทดลองครั้งนี้นั่นก็คือ 4 ฮอป เนื่องจากยิ่งจำนวนฮอปน้อย โอกาสส่งเซสชั่นสำเร็จจึงมีมากขึ้น ซึ่งอัตราการส่งแพ็คเก็ตสำเร็จของอัลกอริทึมที่นำเสนอให้ผลที่ดีกว่าของโพรโทคอล AODV ประมาณ 1 เท่า เมื่อดูจากจำนวนฮอป 4 ฮอป โดยที่อัตราการส่งสำเร็จจะลดลงไปตามช่วงเวลาที่ต้องใช้ส่งเซสชั่นมากขึ้น โดยเฉพาะอัลกอริทึมที่นำเสนอ จะมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด เพราะต้องพิจารณาปัจจัยอายุข่ายเชื่อมโยงก่อนว่าเพียงพอหรือไม่ หากไม่ก็จะไม่ส่งเลย ทางด้านโพรโทคอล AODV นั้น กราฟมีแนวโน้มลดลงเช่นกัน แต่ค่อยๆลดลง เนื่องจากปัจจัยที่พิจารณาไม่ได้ส่งผลมากนัก อีกทั้งเดิมก็มีอัตราการส่งที่ค่อนข้างต่ำอยู่แล้ว

ทางด้านรูปที่ 4.5 ผลการทดลองที่แสดงนั้นต่างมีการกำหนดตัวแปรต่างจากรูปที่ 4.4 โดยที่ไม่ได้จำกัดจำนวนฮอป แต่ได้ให้ TTL มีค่าเป็น 7 ซึ่งในแต่ละครั้งที่หาเส้นทางมาได้ จำนวนฮอปที่ได้ก็จะไม่เท่ากัน ซึ่งเห็นได้ชัดว่า กราฟสองเส้นมีแนวโน้มลดลง และอัลกอริทึม ที่นำเสนอได้ให้ผลที่มีอัตราการส่งเซสชั่นสำเร็จสูงถึง 95 % และผลจะลดลงไปตามเวลาที่ใช้ส่งเซสชั่นที่มากขึ้น ซึ่งวิเคราะห์

ได้ว่า เมื่อเวลาของเซสชั่นที่ต้องการส่งมากขึ้นหรือขนาดของข้อมูลใหญ่ขึ้น ทั้งโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV และอัลกอริทึมที่นำเสนอจะประสบความสำเร็จในการส่งลดลงทั้งคู่ อย่างไรก็ตาม อัลกอริทึมที่นำเสนอได้มีการเทียบเวลาของเซสชั่นกับช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงของเส้นทางที่จะใช้ส่งเซสชั่นก่อนที่จะส่งอยู่แล้ว ทำให้เวลาของเซสชั่นที่เท่ากันอัลกอริทึมที่นำเสนอมีอัตราการส่งเซสชั่นสำเร็จมากกว่าโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV เกือบเท่าตัว ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเส้นทางที่ยาวหรือจำนวนฮอปที่มากก่อให้เกิดอัตราส่งสำเร็จที่ต่ำลง ในขณะที่หากจำนวนฮอปเท่ากันอัตราการส่งสำเร็จของอัลกอริทึมที่เสนอจะมีเปอร์เซ็นต์สูงกว่าโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV



รูปที่ 4.6 การส่งเซสชั่นสำเร็จของระบบ

ผลการทดลองดังรูปที่ 4.6 สามารถอธิบายได้ดังนี้

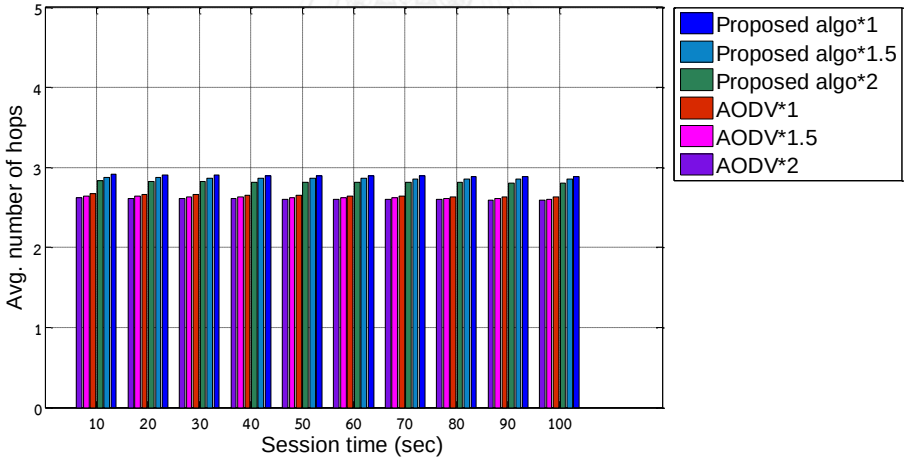
- แกนนอน (X-axis) เป็นเวลาที่ใช้ส่งเซสชั่นมีหน่วยเป็นวินาที
- แกนตั้ง (Y-axis) เป็นความสำเร็จในการส่งเซสชั่นมีหน่วยเป็นครั้ง
- กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน แสดงผลการทดลองของอัลกอริทึมที่นำเสนอ
- กราฟเส้นประสีแดง แสดงผลการทดลองของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV

โดยได้ทำการทดลองจำนวน 1,000 ครั้ง ซึ่งการจำลองครั้งนี้ได้มีความสมจริงมากขึ้น เนื่องจากเวลา t1=0 โนดต้นทางและโนดปลายทางอาจจะติดต่อกันได้หรือไม่ได้เลย ซึ่งผลการทดลองที่ปรากฏมานั้น อัลกอริทึมที่นำเสนอสามารถส่งเซสชั่นได้สำเร็จมากที่สุด 340 ครั้ง หรือ อัตราส่งสำเร็จ 34 % เมื่อเวลาที่ใช้ส่งเซสชั่นเป็น 10 วินาที ในขณะที่โพรโทคอล AODV ส่งได้สำเร็จน้อยกว่าซึ่งส่งสำเร็จได้แค่ 310 ครั้ง หรืออัตราส่งสำเร็จแค่ 31% นอกจากนี้การส่งสำเร็จ จะลดลงตามช่วงเวลาที่ต้องใช้ส่งเซสชั่นมากขึ้น ที่สำคัญ เหตุที่ผลการทดลองออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ ความสำเร็จที่ต่ำกว่าผลการทดลองในรูปที่ 4.5-4.6 เหลือ 1 ใน 3 เท่านั้น เนื่องมาจากบางเหตุการณ์ โนดต้นทาง

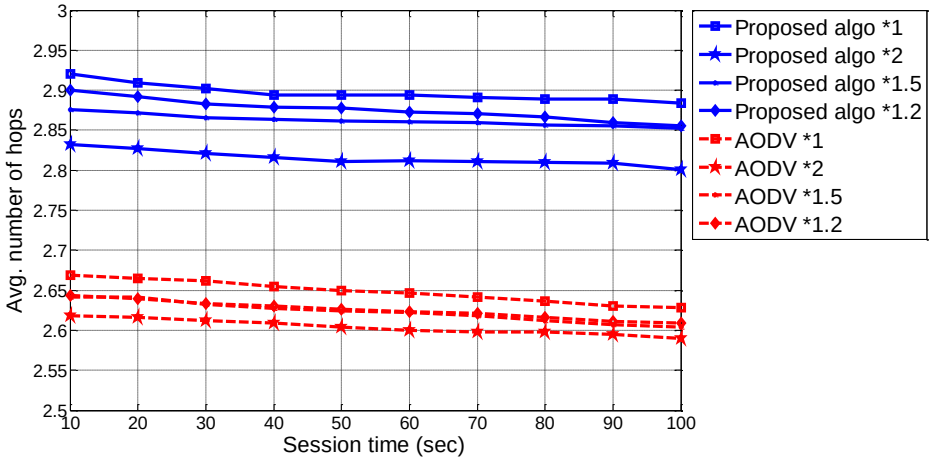
และโนดปลายทางอาจอยู่ห่างกันเกินกว่า 7 ฮอป อย่างไรก็ตามแนวโน้มการส่งเซสชั่น สำเร็จของอัลกอริทึมที่นำเสนอก็ยังคงมากกว่าโพรโทคอล AODV

4.4.2.2 ผลการศึกษาจำนวนฮอปของเส้นทาง

การเลือกเส้นทางของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV ได้เลือกจากเส้นทางที่สั้นที่สุด ซึ่งต่างจากอัลกอริทึมที่นำเสนอตรงที่อัลกอริทึมที่นำเสนอได้นำช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงมาเป็นตัวกรองเส้นทางก่อนที่จะเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดเป็นลำดับต่อมา โดยจำนวนฮอปนี้สามารถเป็นตัวชี้วัดแทนเวลาประวิงได้ เช่น หากขนาดเซสชั่นเท่ากัน แต่โพรโทคอลใดใช้จำนวนฮอปมากกว่า แสดงว่าโพรโทคอลนั้นใช้เวลาประวิงมากกว่านั่นเอง ซึ่งจากผลการทดลองที่แสดงอัตราการส่งสำเร็จในหัวข้อ 4.4.2.1 โพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV ไม่เหมาะสมที่จะใช้ในโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานพาณิชย์เนื่องจากอัตราการส่งสำเร็จต่ำทำให้ความน่าเชื่อถือของระบบลดลง แต่แม้ว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอจะมีอัตราการส่งสำเร็จมากกว่า แต่ก็มีข้อเสียเปรียบคือมีการใช้จำนวนฮอปมากกว่าหรือเท่ากับโพรโทคอล AODV ดังรูปที่ 4.7-4.8 ซึ่งเป็นข้อเสียเปรียบของอัลกอริทึมที่นำเสนอ แต่ก็เป็นสัดส่วนน้อย เมื่อเทียบกับที่เพิ่มอัตราการส่งเซสชั่นสำเร็จได้เกือบ 2 เท่า



รูปที่ 4.7 กราฟแท่งแสดงภาพรวมของการใช้จำนวนฮอปเฉลี่ยแต่ละอัตราการเกิด



รูปที่ 4.8 กราฟเส้นแสดงภาพรวมของการใช้จำนวนฮอปเฉลี่ยแต่ละอัตราการเกิด

ผลการทดลองที่ปรากฏมาสามารถอธิบายได้ดังนี้

- แกนนอน (X-axis) เป็นเวลาที่ใช้ส่งเซสชั่นมีหน่วยเป็นวินาที
- แกนตั้ง (Y-axis) เป็นอัตราสำเร็จในการส่งเซสชั่นมีหน่วยเป็น%
- กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน แสดงผลการทดลองของอัลกอริทึมที่นำเสนอ
- กราฟเส้นประสีแดง แสดงผลการทดลองของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV

รูปที่ 4.7-4.8 เป็นการศึกษาจำนวนเฉลี่ยของฮอป โดยกำหนดจำนวนฮอปตั้งแต่ 2-4 ฮอป และใช้ช่วงเวลาการเกิดเครื่องบินจากตารางที่ 4-1 โดยเมื่อเวลาเซสชั่นน้อยโนดต้นทางและปลายทางสามารถติดต่อกันได้ โดยการจำลองจะนับเฉพาะการส่งสำเร็จ แต่เมื่อเวลาเซสชั่นเพิ่มมากขึ้น ทั้งสองอาจไม่สามารถติดต่อกันได้หรืออาจติดต่อกันได้แต่ต้องใช้เส้นทางที่ยาวมากขึ้น จากการพิจารณาปัจจัยในการเลือกเส้นทาง โดยได้ศึกษาความหนาแน่นของอากาศยานเป็น 4 ช่วง นั้นคือ

1.ช่วงเวลาการเกิดอากาศยานตามตารางที่ 4-1

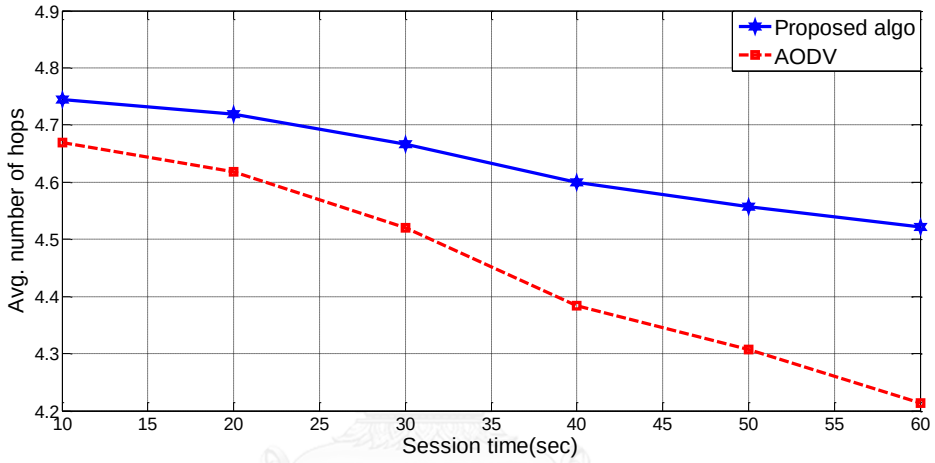
2. ช่วงเวลาการเกิดเป็น 1.2 เท่าของตารางที่ 4-1

3. ช่วงเวลาการเกิดอากาศยานเป็น 1.5 เท่าของตารางที่ 4-1

4. ช่วงเวลาการเกิดอากาศยานเป็น 2 เท่าของตารางที่ 4-1

ยิ่งตัวคูณมากนั่นหมายความว่า อากาศยานในโครงข่ายมีความหนาแน่นน้อย ซึ่งในที่นี้ หากช่วงเวลาการเกิดของอากาศยานเป็นไปตามตารางที่ 4-1 จะเกิดเป็นความหนาแน่นมากที่สุดแล้วซึ่งผลที่ออกมามีแนวโน้มเหมือนกันทั้ง 4 อัตราการเกิด ซึ่งจำนวนฮอปเฉลี่ยจากผลที่ได้นั้น อัลกอริทึมที่นำเสนอให้ค่าจำนวนฮอปเฉลี่ยมากกว่าโพรโทคอล AODV โดยสรุปได้ว่า อัลกอริทึมที่นำเสนอทำให้เกิดเวลาประวิงมากกว่าโพรโทคอล AODV เนื่องจากการเพิ่มปัจจัย ในการเลือกเส้นทางเข้าไป

แต่ที่น่าสังเกตคือ เมื่อมีช่วงเวลาการเกิดมากขึ้นโดยเฉพาะเมื่อเป็นสองเท่าจากตารางที่ 4-1 หรือความหนาแน่นของอากาศยานน้อย จำนวนฮอปเฉลี่ยที่ใช้นั้นลดลงทั้งอัลกอริทึมที่นำเสนอและโพรโทคอล AODV เนื่องจากโนดมีความหนาแน่นลดลง ทำให้จำนวนฮอปเฉลี่ยลดลงไปด้วย นอกเหนือจากนี้เมื่อเวลาของเซสชั่นมากขึ้น ในขณะที่อัตราส่งสำเร็จจึงกลับมีมากขึ้น ทำให้ผลออกมาเป็นดังกราฟด้านบน อย่างไรก็ตามอัลกอริทึมที่นำเสนอมีจำนวนฮอปเฉลี่ยมากกว่าโพรโทคอล AODV ในทุกช่วงเวลาการเกิดของอากาศยาน เนื่องจากอัลกอริทึมที่นำเสนอมีการรับรองว่าเส้นทางที่เลือกต้องสามารถส่งข้อมูลจากโนดต้นทางไปโนดปลายทางได้ภายในเวลาที่กำหนด ทำให้ในบางสถานการณ์ต้องใช้จำนวนฮอปมากขึ้นเพื่อเพิ่มอัตราการส่งสำเร็จและความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 4.9 ค่าเฉลี่ยของจำนวนฮอป

ผลการทดลองดังรูปที่ 4.9 สามารถอธิบายได้ดังนี้

- แกนนอน (X-axis) เป็นเวลาที่ใช้ส่งเซสชั่นมีหน่วยเป็นวินาที
- แกนตั้ง (Y-axis) เป็นค่าเฉลี่ยของจำนวนฮอปมีหน่วยเป็นฮอป
- กราฟเส้นทึบสีน้ำเงิน แสดงผลการทดลองของอัลกอริทึมที่นำเสนอ
- กราฟเส้นประสีแดง แสดงผลการทดลองของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV

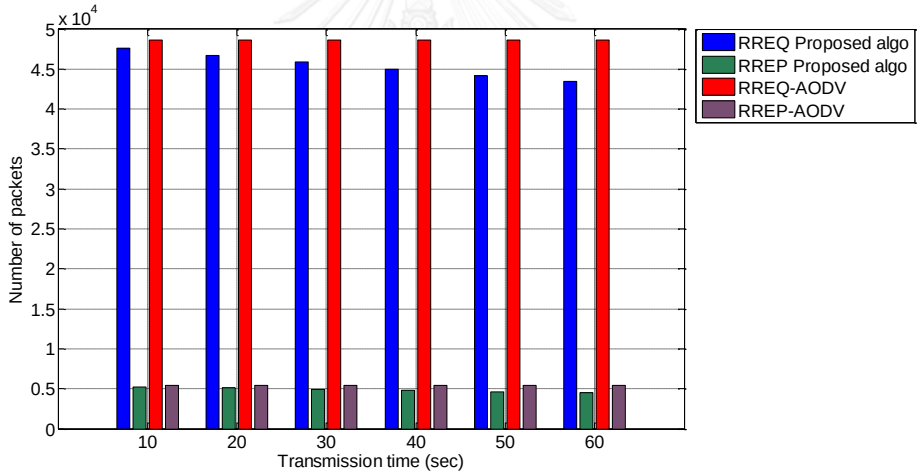
รูปที่ 4.9 เป็นการศึกษาจำนวนฮอปเฉลี่ยที่ใช้ในเส้นทาง แต่ไม่ได้จำกัดจำนวนฮอป โดยให้ TTL เท่ากับ 7 และมีโนดต้นทางและปลายทางเพียงแค่ 1 คู่ต่อหนึ่งเส้นทาง แต่ผลการทดลองของ ทั้งสองโพรโทคอลกลับได้ผลไม่เท่ากัน โดยอัลกอริทึมที่นำเสนอยังคงใช้จำนวนฮอปเฉลี่ยมากกว่า เนื่องจากปัจจัยที่ใส่เพิ่มเข้าไปของอายุข่ายเชื่อมโยงเทียบกับเวลาที่ต้องใช้ส่งเซสชั่น และเนื่องจากไม่ได้จำกัดจำนวนฮอปดังเช่นรูปที่ 4.8 จึงทำให้ผลการทดลองออกมานั้น ใช้จำนวนฮฮปเฉลี่ยมากกว่า

อย่างไรก็ตามแนวโน้มผลลัพธ์ที่ได้ยังคงเป็นเช่นเดิม ซึ่งส่งผลให้เวลาประวิงระบบของอัลกอริทึมที่นำเสนอนั้นมากกว่าเวลาประวิงของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางพื้นฐาน AODV

4.4.2.3 ผลการศึกษาจำนวนเซสชั่นในการค้นหาเส้นทาง

ผลการทดลองด้านล่างได้เกิดจากการจำลองทั้งสิ้น 1,000 ครั้ง ซึ่งจำนวนแพ็คเกตที่ใช้ในการค้นหาเส้นทาง ในที่นี้หมายถึงแพ็คเกตของ RREQ และ RREP สามารถบ่งบอกถึงโอเวอร์เฮดของระบบโดยมองการส่ง RREQ และ RREP แต่ละครั้งเป็น 1 แพ็คเกต

ในการส่งข้อความค้นหาเส้นทางนั้นมีทั้งข้อความ RREQ และ RREP ที่ถูกส่งไปในระบบ ในกรณีของ RREQ จะถูกส่งแบบแพร่กระจาย ส่วน RREP ถูกส่งแบบทางเดียว ซึ่งไม่ว่าจะส่งแบบใด สิ่งที่สำคัญคือ ทำให้ระบบต้องมีโอเวอร์เฮดเพิ่มมากขึ้น โดยผลการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นว่า อัลกอริทึมที่นำเสนอนั้นได้ช่วยลดโอเวอร์เฮดของระบบ ในขณะที่ทำการส่งข้อความเพื่อค้นหาเส้นทางเท่ากัน



รูปที่ 4.10 จำนวนแพ็คเกต RREQ และ RREP ที่ระบบใช้

จากกราฟแท่งดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่า ในขณะที่มีต้นกำเนิดและปลายทางเดียวกัน อัลกอริทึมที่นำเสนอมีการส่งแพ็คเกตในการค้นหาเส้นทางน้อยกว่าโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV โดยแพ็คเกต RREQ ของอัลกอริทึมที่นำเสนอนั้น มีแนวโน้มลดลงแปรผกผันกับเวลาต้องการส่งเซสชั่น เนื่องจากยิ่งเวลาที่ใช้ส่งเซสชั่นมากเท่าใด ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงก็ต้องมากเพียงพอด้วย แต่หากไม่เพียงพอ ระบบจะเลือกไม่ส่งข้อความค้นหาเส้นทาง เพราะยังไงข้อมูลก็ไม่สามารถส่งได้ครบถ้วน ในขณะที่ RREQ ของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV นั้นแนวโน้มคงที่ ทางด้านของแพ็คเกต RREP ของทั้งสองอัลกอริทึมมีแนวโน้มเช่นเดียวกับแพ็คเกต RREQ แต่สำหรับอัลกอริทึมที่นำเสนอเหตุที่แพ็คเกต RREP ลดลงเนื่องมาจากจำนวนข้อความ RREQ น้อยลง ทำให้ RREP น้อยลงตามไปด้วย ดังนั้น หากนำแพ็คเกต RREQ และRREP ของแต่ละอัลกอริทึมมารวมกันผลลัพธ์จะเห็นได้ชัดว่า แพ็คเกตที่ถูกส่งใน

ระบบของอัลกอริทึมที่นำเสนอมีจำนวนน้อยกว่าโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางพื้นฐาน AODV ซึ่งบ่งบอกถึงโอเวอร์เฮดของระบบได้ว่า เมื่อระบบทำงานโดยใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอจะส่งผลให้มีโอเวอร์เฮดน้อยกว่าโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางพื้นฐาน AODV

4.5 สรุปผลการทดลอง

ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอได้ให้ผลลัพธ์ตามที่ได้คาดการณ์ไว้คือ สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การส่งสำเร็จจากต้นทางไปยังปลายทาง โดยให้ผลลัพธ์สูงกว่าโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง ADOV อีกทั้งยังช่วยลดโอเวอร์เฮดในระบบได้มากขึ้น แต่ทั้งนี้อัลกอริทึมยังคงมีข้อเสียเปรียบที่ทำให้เกิดเวลาประวิงมากขึ้นกว่าโพรโทคอลพื้นฐาน AODV อย่างไรก็ตามอากาศยานพาณิชย์ต้องการความน่าเชื่อถือมาเป็นหลักและสามารถยอมรับเวลาประวิงที่เกิดขึ้นได้ ทำให้อัลกอริทึมที่นำเสนอก่อให้เกิดข้อดีมากกว่าข้อเสีย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 บทสรุป

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้เกี่ยวข้องกับการจัดสรรเส้นทางของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV และช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยาน ซึ่งได้พัฒนาการเลือกเส้นทางของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV ด้วยการประยุกต์ใช้ช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงมาเป็นพารามิเตอร์ในขั้นตอนการเลือกเส้นทาง สิ่งแรกที่ได้ทำการศึกษาคือโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยาน จึงพบว่า AANET เป็นโครงข่ายที่มีความท้าทายอยู่พอสมควรเพราะโนดในโครงข่ายมีการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วที่สูงมาก ส่งผลให้ทอพอโลยีของโครงข่ายเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

จึงวิเคราะห์สมการของช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงถึงตัวแปรต่างๆที่มีว่าสามารถประยุกต์ใช้กับงานที่จะเกิดขึ้นได้หรือไม่ ผลปรากฏว่า สมการช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้กับวิทยานิพนธ์นี้ เนื่องจากต้นแบบการสร้างสมการได้มองโนดเป็นคู่เพื่อหาช่วงเวลาที่จะติดต่อสื่อสารกันได้ อีกทั้งยังเป็นสมการที่ได้ถูกคิดค้นมาเพื่อโนดที่มีความเร็วสูงโดยเฉพาะทำให้เหมาะต่อการนำไปใช้งานในโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์เป็นอย่างมาก การศึกษาการทำงานของโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางต่างๆที่มีอยู่ เริ่มศึกษาจากโพรโทคอลจัดสรรเส้นทางของโครงข่ายไร้สายเคลื่อนที่ซึ่งมีโพรโทคอลรองรับการทำงานจัดสรรเส้นทางอยู่มากมาย โดยเฉพาะโพรโทคอลแบบรีแอคทีฟและโพรแอคทีฟ ซึ่งเมื่อได้ศึกษาทั้งสองแบบอย่างละเอียดแล้ว จึงได้ข้อสรุปว่า ข้อเสียเปรียบของโพรโทคอลโพรแอคทีฟที่มีนั้นก่อให้เกิดผลเสียมากกว่าข้อเสียเปรียบของโพรโทคอลรีแอคทีฟ เนื่องจากโพรโทคอลโพรแอคทีฟต้องค้นหาเส้นทางที่มีทั้งหมดไว้ก่อนแม้จะไม่มีความต้องการเส้นทาง ณ ตอนนั้นก็ตาม ในขณะที่โพรโทคอลรีแอคทีฟจะหาเส้นทางเฉพาะเมื่อเกิดความต้องการเส้นทางเท่านั้น นอกเหนือจากนี้โพรโทคอลรีแอคทีฟยังเหมาะกับสภาพแวดล้อมของโครงข่ายและลักษณะของโนดในโครงข่ายอีกด้วย เนื่องจากโนดเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงทำให้ทอพอโลยีของโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา จึงเลือกใช้โพรโทคอลรีแอคทีฟในการจัดสรรเส้นทางกับโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์

อย่างไรก็ตามเพื่อให้วิทยานิพนธ์มีความเป็นเอกลักษณ์ แบบจำลองโครงข่ายเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องกำหนดให้ชัดเจน โดยวิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบจำลองเส้นทางการบินเหนือน่านฟ้าไทยที่ได้มีการเลือก

สนามบินและเส้นทางบางส่วนออกมาเพื่อให้เหมาะสมกับการจำลองเหตุการณ์ โดยแบบของโครงข่ายเป็นเสมือนถนนบนฟ้าที่ให้อากาศยานหรือโนดเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่มีอยู่ ซึ่งอากาศยานที่ได้รับความสนใจให้เป็นโนดในโครงข่ายคืออากาศยานพาณิชย์ ด้วยเหตุว่าอากาศยานพาณิชย์มีแผนการบินที่ระบุระดับการบิน ความเร็วและเส้นทางการบินที่ชัดเจน ทำให้การเคลื่อนที่ของอากาศยานที่แม้จะเร็วแต่สามารถคาดการณ์ได้ นอกเหนือจากนี้จำนวนของอากาศยานยังได้อ้างอิงตามสถิติเที่ยวบินของสนามบินนั้นๆ รวมทั้งช่วงเวลาห่างกันของอากาศยานแต่ละลำก็เป็นไปตามกฎการบินซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานการบินสากลโลกอีกด้วย

หลังจากที่มีองค์ประกอบในการจำลองเหตุการณ์ครบจึงเข้าสู่กระบวนการจำลองโปรแกรมเพื่อให้บรรลุผลตามที่คาดการณ์ไว้ โดยเริ่มจำลองผลการทดลองอย่างง่ายเพื่อให้เห็นถึงความสำคัญของช่วงชีวิตข่ายเชื่อมโยงที่มีผลต่อความน่าเชื่อถือของการส่งข้อมูล หลังจากนั้นจึงเขียนโปรแกรมผนวกองค์ประกอบทั้งหมดเข้าไป ตั้งแต่แบบจำลองโครงข่าย จำนวนโนดในระบบ การเคลื่อนที่ต้นทางและปลายทาง อัตราการเกิด อัลกอริทึมตั้งแต่การค้นหาเส้นทางจนถึงการเลือกเส้นทางจนกระทั่งการส่งข้อมูล ซึ่งก่อให้เกิดผลตามที่ คาดการณ์ไว้นั่นคือ อัลกอริทึมที่นำเสนอได้ให้อัตราการส่งสำเร็จที่ดีกว่าโพรโทคอลจัดเส้นทาง AODV แต่ในขณะเดียวกันข้อเสียที่อัลกอริทึมที่นำเสนอทำได้แย่กว่าก็คือ เวลาประวิงซึ่งได้มีการวัดผลจากจำนวนของฮอปเมื่อขนาดข้อมูลเท่ากันซึ่งอัลกอริทึมที่นำเสนอใช้จำนวนฮอปน้อยกว่าโพรโทคอลจัดสรรเส้นทาง AODV

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากการจำลองโปรแกรมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ การส่งข้อความค้นหาเส้นทางและข้อความอื่นๆ นั้นเป็นแบบแพร่กระจายไม่ได้คำนึงถึงทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศยาน ดังนั้นหากอากาศยานบินในทิศตรงข้ามหรือบินไปทิศทางเดียวกันแต่ความเร็วต่ำกว่าและไม่มีท่าทีว่าจะบินเข้าหาระยะการรับ-ส่งสัญญาณกันได้เลยนั้น ไม่ควรจะได้รับข้อความค้นหาเส้นทางใดๆ ซึ่งจะทำให้ลดโอเวอร์เฮดของระบบลงไปได้อีก
2. ในอนาคตหากทำการศึกษาการส่งข้อมูลระหว่างโนดโดยที่เปลี่ยนจากเครื่องบิน-เครื่องบิน เป็นเครื่องบิน-สนามบิน จะเป็นการเพิ่มศักยภาพของโครงข่ายมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1.*http://www.gbu.ac.in/CentralComp.aspx?cnt=77*, available on May 1, 2015

2.*http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/solutions/Enterprise/Mobility/secwlandg20/sw2dg/ch7_2_SPMb.html*, available on May 2, 2015

3.*http://www.ics.uci.edu/~keldefra/manet.htm*, available on May 4, 2015

4.Conti, M.a.G., S., *Mobile ad hoc networking: milestones, challenges, and new research directions*. Communications Magazine, IEEE, 2014. **52**(1): p. 85-96.

5.Paul, B.R., A. and Paul, S.K., *Comparison of DSR, AODV, and DSDV Routing Protocols with Varying Pause Time & Node Density over TCP & CBR Connections in VANET*, in *Computational Intelligence and Com_munication Networks (CICN)*. 2014, IEEE: Bhopal. p. 374-379.

6.Karras, K., Kyritsis, T., Amirfeiz, M. and Baiotti, S., *Aeronautical Mobile Ad Hoc Networks*. Wireless Conference. 14th European, 2008: p. 1 - 6.

7.Sakhaee, E., Jamalipour, A. and Kato, N., *Aeronautical ad hoc networks*. Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2006. IEEE, 2006. **1** p. 246 - 251.

8.Schnell, M.a.S., S. , *NEWSKY - Concept for Networking the SKY for Civil Aeronautical Communications*, in *Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE* 2007. p. 25 - 29.

9.Morshed, M.M.K., F.I.S. ; Dongwook Lim ; Rahman, M.H. ; Mazumder, M.R.R. and Ghosh, J. , *Performance evaluation of DSDV and AODV routing protocols in Mobile Ad-hoc Networks*. New Trends in Information Science and Service Science (NISS), 4th International Conference, 2010: p. 399 -

403.

10. Basagni, S.C., I. and Syrotiuk, V.R., *Dynamic source routing for ad hoc networks using the global positioning system*. Wireless Communications and Networking Conference, WCNC, 1999. **1**: p. 301 - 305.
11. Perkins, C.E.a.R., E.M., *Ad-hoc on-demand distance vector routing*. Mobile Computing Systems and Applications, WMCSA 1999: p. 90 - 100.
12. Tseng, C.-C.Y.a.L.-P., *Fisheye zone routing protocol for mobile ad hoc networks*. Consumer Communications and Networking Conference, CCNC, 2005: p. 1 - 6.
13. Boleng, J.a.C., T., *Adaptive location aided mobile ad hoc network routing*. Performance, Computing, and Communications, 2004: p. 423 - 432.
14. Mohapatra, P.L., J. and Gui, C., *QoS in Mobile Ad Hoc Netowrks*. IEEE Wireless Communication, Special Issue on QoS in Next-Generation Wireless Multimedia Communications Systems, 2003. **10**(3): p. 44-52.
15. Bheemarjuna, T., *Quality of Service Provisioning in Ad Hoc Wireless Networks: A Survey of Issues and Solutions*, 2006. **4**(1): p. 83-124.
16. Rui Huang ; Zaruba, G.V.a.H., M. , *Link longevity Kalman-estimator for ad hoc networks*, in *Vehicular Technology Conference*. 2003, IEEE. p. 2819 - 2823.
17. Nguyen Thi Xuan My ; Miyanaga, Y.S., C. , *Link longevity-based routing mechanisms for aviation ad hoc network*, in *Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*. 2011, IEEE: Kyoto. p. 46 - 50.
18. Ben Mahmoud, M.S.a.L., N., *An ADS-B Based Secure Geographical Routing Protocol for Aeronautical Ad Hoc Networks*, in *Conmputer*

Software and Applications Conference Workshops (COMPSACW). 2013, IEEE: Japan. p. 556-562.

19. Michael, I.D., Y. ; Georgios, B. ; Georgios, D. ; Massimiliano, A. ; Giorgio, C and Stefano, B. , *Ad-hoc Routing Protocol for Aeronautical Mobile Ad-Hoc Networks(ARPAM)*. 5th International Symposium Communication Systems Networks and Digital Signal Processing, 2006.
20. Nguyen Thi Xuan My ; Miyanaga, Y.a.S., C., *Connectivity analytical modelling for a single flight path ad hoc aeronautical network*, in *Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*. 2010, IEEE: Chaing Mai. p. 51 - 55.
21. Chen, H.L.B.Y.a.C., *Connectivity of Aeronautical Ad hoc Networks*, in *GLOBECOM Workshops (GC Wkshps)*. 2010, IEEE: Miami, FL. p. 1788-1792.
22. Wang, H.Z.X.C.B.Z.a.Y., *Analysis of connectivity requirement for aeronautical Ad hoc networks*, in *Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT)*. 2011, IEEE: Harbin, Heilongjiang. p. 3943 - 3946.
23. *http://www.ads-b.com/.*, available on May 4, 2015
24. http://www.pacificsoaring.org/articles/ADSB_ramsey06.pdf. *ADS-B Technology Overview*. 2006., available on May 5, 2015
25. Committee, A.T.C., *Procedures for Air Navigation Services - Air Traffic Management (PANS-ATM)*, I.C.A. Organization, Editor. 2007. p. 69-115.

รายการอ้างอิง

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวชนัญญ์ธร นิลนิธิวัฒน์

วันเกิด: 24 ตุลาคม 2531

สถานที่เกิด : รพ.รามาธิบดี, กรุงเทพมหานคร, ประเทศไทย

จบปริญญาตรี :

สำนักวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ สาขาวิศวกรรมศาสตร์การสื่อสารและสารสนเทศ มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง ปีการศึกษา 2553

และได้รับเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ปีการศึกษา 2554

ซึ่งได้สนใจในงานวิจัยด้านโครงข่ายแอดฮอกเพื่ออากาศยานเชิงพาณิชย์

ระหว่างที่กำลังศึกษาระดับปริญญาโท ได้สอบเข้าทำงานในบริษัท วิทยุการบินแห่งประเทศไทย จำกัด เมื่อเดือนมิถุนายน 2556

ในตำแหน่งเจ้าหน้าที่ควบคุมจราจรทางอากาศ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University