

การพัฒนาวิธีการปรับเปลี่ยนช่วงระยะเวลาการส่งเพื่อการจัดการพลังงานในโครงข่ายแอดฮอกให้สอดคล้อง  
กับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์



นาย ปกรณ์ กุลศิริมงคล

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

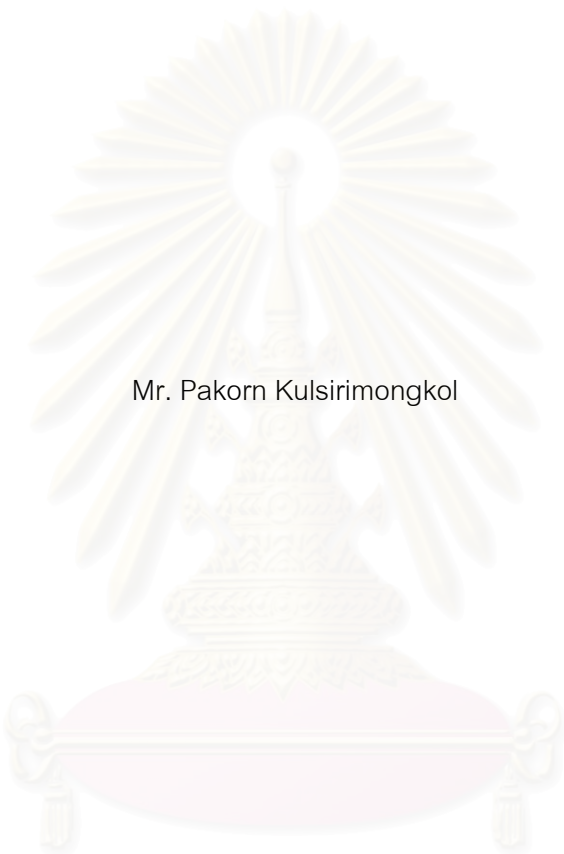
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-3898-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF TRANSMISSION RANGE ADJUSTMENT FOR POWER MANAGEMENT IN  
AD HOC NETWORKS ACCORDING TO THEIR RELATIVE MOVEMENT



Mr. Pakorn Kulsirimongkol

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-3898-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาวิธีการปรับเปลี่ยนช่วงระยะเวลาส่งเพื่อการจัด  
การพลังงานในโครงข่ายแอดฮอกให้สอดคล้องกับการ  
เคลื่อนที่สัมพัทธ์

โดย

นายปกรณ์ กุลศิริมงคล

สาขาวิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า


อาจารย์ที่ปรึกษา

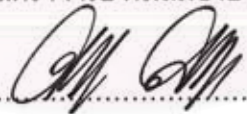
อาจารย์ ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร

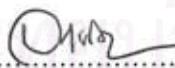
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

  
..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัญย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(อาจารย์ ดร.ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร)

  
..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวนิตศ อัครกุล)

นาย ปกรณ์ กุลศิริมงคล : การพัฒนาวิธีการปรับเปลี่ยนช่วงระยะเวลาการส่งเพื่อการจัดการพลังงาน  
ในโครงข่ายแอดฮอคให้สอดคล้องกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์. (DEVELOPMENT OF  
TRANSMISSION RANGE ADJUSTMENT FOR POWER MANAGEMENT IN AD HOC  
NETWORKS ACCORDING TO THEIR RELATIVE MOVEMENT) อ. ที่ปรึกษา: อ. ดร.  
ชัยเชษฐ์ สายวิจิตร, 125 หน้า. ISBN 974-17-3898-6.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล เพื่อลดการใช้  
พลังงานในโครงข่ายแอดฮอค และเพิ่มปริมาณของแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้โดยรวมของ  
โครงข่ายให้มีความมากขึ้น ส่วนแรกที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ วิธีการปรับเปลี่ยน  
พลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแอดฮอคแบบสถิตย์ ซึ่งโหนดในโครงข่ายจะพยายามจัด  
รูปการเชื่อมต่อให้เป็นโครงข่ายต้นไม้ และทำการปรับเปลี่ยนจำนวนสายเชื่อมโยงในโครงข่าย  
ให้มีจำนวนเพิ่มขึ้นเพื่อให้โครงข่ายทนทานต่อการถูกแบ่งเป็นโครงข่ายย่อย นอกจากนี้จะได้  
เสนอการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่ง โดยการสร้างสายเชื่อมโยงบนพื้นฐานของพลังงานที่  
เหลือในแต่ละโหนด ซึ่งเมื่อโหนดในโครงข่ายต้นไม้มีพลังงานลดต่ำลงก็จะทำการเปลี่ยนสาย  
เชื่อมโยงใหม่เพื่อลดการใช้พลังงานที่โหนดนั้น ส่วนที่สองเป็นการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่ง  
ข้อมูลเมื่อโหนดมีความสามารถในการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่จะแบ่งเป็น 2 แบบ แบบแรกคือ  
โหนดเคลื่อนที่แบบรายคาบ ระเบียบวิธีนี้โหนดจะพยายามหาค่าพลังงานในการส่งข้อมูลที่น้อย  
ที่สุดที่ซึ่งทำให้โครงข่ายยังสามารถเชื่อมต่อถึงกันได้หมด ณ เวลาใดๆ แล้วนำค่าต่างๆเหล่านี้  
มาปรับเปลี่ยนใช้งานในคาบถัดๆ ไปเพื่อลดเวลาของการคำนวณใหม่ การเคลื่อนที่แบบที่สอง  
นั้นโหนดจะเคลื่อนที่เป็นแบบสุ่มระเบียบวิธีนี้จะทำการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล ให้  
โครงข่ายมีการเชื่อมต่อแบบโครงข่ายต้นไม้ที่มีระยะทางระหว่างโหนดต่ำ โดยจะมีการปรับเปลี่ยน  
สายเชื่อมโยงภายในและระหว่างโครงข่ายย่อย ระเบียบวิธีที่น่าสนใจนี้สามารถที่จะช่วยลด  
พลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลลงได้อย่างชัดเจน

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

## 4570724821 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: POWER EFFICIENCY, DISTRIBUTED SPANNING TREE, MANETS, POWER CONTROL

PAKORN KULSIRIMONGKOL : DEVELOPMENT OF TRANSMISSION RANGE  
ADJUSTMENT FOR POWER MANAGEMENT IN AD HOC NETWORKS  
ACCORDING TO THEIR RELATIVE MOVEMENT. THESIS ADVISOR:  
CHAIYACHET SAIVICHIT, Ph.D. 125 pp. ISBN 974-17-3898-6.

In this thesis, transmission range adjusting algorithm is proposed in order to reduce total energy consumption and increase the throughput in ad hoc network. The first part of thesis proposes transmission range adjustment in static ad hoc network of which nodes shall adjust their transmission range to create a minimum spanning tree connection and then increase network connectivity to achieve higher network reliability. Moreover, transmission range adjusting algorithm based on node's remaining energy is proposed to solve the bottleneck problem of a spanning tree network. A node which has low energy will remove its farthest link to decrease energy consumption. In the second part, a dynamic situation is considered nodes could have mobility. The movement of nodes can be categorized into two parts. The first is for a periodic movement. The proposed algorithm shall be used to calculate suitable transmission range which will be adjusted at various period accordingly. The second is for a random movement. For this proposed algorithm, There are two sub-algorithms to be applied to interconnection within subnetwork (intra-subnetwork) and between subnetwork (inter-subnetwork). Nodes in network try to adjust transmission range for minimum spanning tree connection. Those algorithms can subsequently save total energy consumption.

Department Electrical Engineering Student's signature ปกรณ์ กุลศิริมงคล  
Field of study Electrical Engineering Advisor's signature ชัยชิต ไชยวิชิต  
Academic year .....2005.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้เป็นอย่างดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ อาจารย์ ดร.ชัยเชษฐ สหายวิจิตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เชาวน์ ดิศ อัครกุล ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในการวิจัย ตลอดจนความเมตตา และเอาใจใส่ต่อผู้ทำวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่ให้กำเนิด ครอบครัวที่มีความรัก ความอบอุ่น และกำลังใจแก่ผู้วิจัยในทุก ๆ ด้านเสมอมา

ขอขอบคุณโครงการเสริมสร้างความเชื่อมโยงระหว่างภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า และภาคเอกชนทางด้านการวิจัยและพัฒนา (Cooperative Project between Department of Electrical Engineering and Private sector for Research and Development) ที่ให้ทุนสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการวิจัย และจัดทำวิทยานิพนธ์จนสำเร็จลุล่วง

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการสื่อสารซึ่งเป็นสถานที่ทำวิจัย รวมถึงเพื่อนพี่น้องนิสิตทุกท่าน ที่มีส่วนช่วยเหลือในการให้ข้อคิดเห็น คำแนะนำ และกำลังใจ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ลุล่วงไปได้ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญภาพ.....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ฒ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์.....	5
1.3 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....	6
1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	6
1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ.....	6
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.7 ประมวลวิทยานิพนธ์.....	7
2 ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่การเดินแบบสุ่ม (Random Walk Mobility Model).....	10
2.2 มาตรฐาน IEEE 802.11.....	12
2.2.1 ชั้นสื่อสารกายภาพ (Physical Layer).....	13
2.2.2 พื้นฐานกลไกในชั้นสื่อสารย่อย MAC.....	14
2.2.3 กลไกของ CSMA/CA.....	16
2.3 การหาเส้นทางในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแอ็ดฮอก.....	23
2.3.1 การเลือกเส้นทางแบบพิจารณาสถานะการเชื่อมต่อ (Link-State Routing Protocol).....	23
2.3.2 การทำความเข้าใจกับโนดข้างเคียง.....	24
2.3.3 การคำนวณค่าใช้จ่ายของแต่ละเส้นทาง.....	24
2.3.4 การสร้างแพ็กเกตบอกสถานะการเชื่อมต่อ.....	24
2.3.5 การกระจายแพ็กเกตบอกสถานะการเชื่อมต่อ.....	25

บทที่	หน้า
2.3.6	คำนวณระยะทางที่สั้นที่สุดสำหรับการติดต่อไปยังแต่ละโนด.....26
2.4	การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแอคฮอกแบบสถิตย์.....26
2.4.1	การปรับเปลี่ยนพลังงานในการเชื่อมต่อโดยทราบตำแหน่งของโนด.....26
2.4.2	การปรับเปลี่ยนพลังงานในการเชื่อมต่อโดยใช้ข้อมูลเฉพาะพื้นที่.....28
2.5	การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแอคฮอกแบบพลวัต.....33
2.6	ปัญหาที่พบจากงานวิจัยในอดีต.....35
2.7	สรุป.....35
3	การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแอคฮอกแบบสถิตย์ที่เสนอ.....36
3.1	ระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนให้เป็นกราฟต้นไม้แบบกระจาย.....36
3.1.1	พารามิเตอร์และลักษณะของแพ็กเกตที่ใช้ในระเบียบวิธีนี้.....37
3.1.1.1	พารามิเตอร์.....37
3.1.1.2	ชนิดของแพ็กเกต.....38
3.1.2	กลไกของระเบียบวิธีการจัดตัวรูปต้นไม้แบบกระจาย.....39
3.1.3	การปรับเปลี่ยนพลังงานในการเชื่อมต่อเพื่อให้ได้จำนวนข่ายเชื่อมโยงตาม ต้องการ ( <i>i</i> -connected).....41
3.2	ระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลโดยขึ้นกับพลังงานที่ยังคง เหลืออยู่ในแต่ละโนด.....44
3.2.1	พารามิเตอร์และลักษณะของแพ็กเกตที่ใช้ในระเบียบวิธีนี้.....46
3.2.1.1	พารามิเตอร์.....46
3.2.1.2	ชนิดของแพ็กเกต.....46
3.2.2	กลไกของระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลโดยขึ้นกับ พลังงานที่ยังคงเหลืออยู่ในแต่ละโนด.....48
3.3	การจำลองเทคนิคการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลที่นำเสนอ.....52
3.3.1	สภาวะแวดล้อมของการจำลอง.....53
3.3.2	ผลการจำลองและการวิเคราะห์.....54
3.3.2.1	ปรับเปลี่ยนจำนวนของโนดในโครงข่าย.....54
3.3.2.2	ปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่จำลอง.....58
3.4	สรุป.....62
4	การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแอคฮอกแบบพลวัตที่นำเสนอ.....63



4.1	การปรับเปลี่ยนพลังงานการส่งข้อมูลเมื่อการเคลื่อนที่ของโนดเป็นแบบรายคาบ	63
4.1.1	แบบจำลองการเคลื่อนที่ของโนด	64
4.1.2	กลไกและหลักการในการเรียนรู้ค่าพลังงานในการส่งข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้เพื่อ เชื่อมโครงข่ายเป็นต้นไม้ที่มีระยะรวมทางต่ำสุด (Minimum Spanning Tree)	64
4.1.3	วิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในแต่ละคาบ	70
4.1.4	การจำลองผลของการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเมื่อโนดมีการเคลื่อนที่แบบรายคาบ	71
4.1.4.1	สภาวะแวดล้อมของการจำลอง	71
4.1.4.2	ผลการจำลองและการวิเคราะห์	72
4.1.5	สรุปผลของการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเมื่อการเคลื่อนที่ของโนดเป็นแบบรายคาบ	77
4.2	การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเมื่อการเคลื่อนที่ของโนดเป็นแบบสุ่ม	77
4.2.1	พารามิเตอร์ของโนดและชนิดของแพ็กเก็ต	79
4.2.2	สภาวะเริ่มต้นของโครงข่าย	82
4.2.3	การปรับเปลี่ยนโครงข่ายรูปต้นไม้ระหว่างโครงข่ายย่อย	83
4.2.4	การปรับเปลี่ยนโครงข่ายรูปต้นไม้ภายในโครงข่ายย่อย	89
4.2.5	การจำลองระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่ง	92
4.2.5.1	สภาวะแวดล้อมของการจำลอง	92
4.2.5.2	ผลการจำลองและการวิเคราะห์	94
4.2.5.2.1	ปรับเปลี่ยนจำนวนของโนดในโครงข่าย	94
4.2.5.2.2	ปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่จำลอง	99
4.2.6	สรุปผลของการปรับเปลี่ยนพลังงานการในส่งข้อมูลเมื่อการเคลื่อนที่ของโนดเป็นแบบสุ่ม	103
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	104
5.1	สรุปผลการวิจัย	104
5.2	ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	105
	รายการอ้างอิง	106
	ภาคผนวก	109

บทที่

หน้า

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....

125



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการส่งข้อมูลระหว่างโนด A และโนด B.....	9
รูปที่ 2.2 รูปแบบการเคลื่อนที่ของโนดเคลื่อนที่โดยใช้ Random Walk ใน 2 มิติ.....	12
รูปที่ 2.3 รูปแบบการเคลื่อนที่ของโนดเคลื่อนที่โดยใช้ Random Walk ใน 2 มิติ (ระยะทางคงที่).....	12
รูปที่ 2.4(ก) กลไกของ IEEE 802.11DCF และ RTS-CTS.....	17
รูปที่ 2.4(ข) กลไกของ IEEE 802.11DCF และ RTS-CTS.....	17
รูปที่ 2.5 MAC state transition diagram.....	22
รูปที่ 2.6(ก) ระบบโครงข่ายย่อย.....	25
รูปที่ 2.6(ข) แพ็กเกตบอกสถานะการเชื่อมต่อสำหรับระบบโครงข่ายย่อย.....	25
รูปที่ 2.7 การกำหนดการควบคุมของกลไกการควบคุมพลังงานแบบกระจาย.....	31
รูปที่ 3.1 สเตตแมชชีนของระเบียบวิธีการสร้างกราฟรูปต้นไม้แบบกระจาย.....	41
รูปที่ 3.2 การเชื่อมต่อของโครงข่ายโดยทุกโนดใช้พลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุด.....	42
รูปที่ 3.3 การเชื่อมต่อของโครงข่ายโดยทุกโนดใช้ระเบียบวิธี การจัดตัวรูปต้นไม้แบบกระจาย.....	43
รูปที่ 3.4 การเชื่อมต่อของโครงข่ายโดยทุกโนดมีการเชื่อมต่อกันทั่วถึงและมีอย่างต่ำ 2 ข่ายเชื่อมโยงที่มีระยะทางโดยรวมต่ำสุด.....	43
รูปที่ 3.5 การเชื่อมต่อของโครงข่ายโดยทุกโนดมีการเชื่อมต่อกันทั่วถึงและมีอย่างต่ำ 3 ข่ายเชื่อมโยงที่มีระยะทางโดยรวมต่ำสุด.....	44
รูปที่ 3.6 การเชื่อมต่อของโครงข่ายรูปต้นไม้.....	45
รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่อของโครงข่ายรูปต้นไม้เมื่อมีโนดใดๆ พลังงานหมด.....	45
รูปที่ 3.8 การแบ่งพลังงานเป็น $k$ ส่วน.....	48
รูปที่ 3.9 ช่วงเวลาการทำงานของระเบียบวิธี.....	48
รูปที่ 3.10 ชนิดของโนดในระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยงขณะใช้งาน.....	49
รูปที่ 3.11(ก) สเตตแมชชีนของโนดที่ต้องการขอเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยง (Help Node).....	50
รูปที่ 3.11(ข) สเตตแมชชีนของโนดที่ทำการหาข่ายเชื่อมโยงใหม่ (Find Node).....	50
รูปที่ 3.11(ค) สเตตแมชชีนของโนดที่สามารถทำการเชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยงแทนได้ (Volunteer Node).....	51
รูปที่ 3.12 จำนวนของแพ็กเกตที่สามารถส่งได้เมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโนด.....	56
รูปที่ 3.13 จำนวนฮอปเฉลี่ยของแพ็กเกตเมื่อทำการปรับเปลี่ยนจำนวนโนด.....	56

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.14	ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยของแพ็กเกตเมื่อทำการปรับเปลี่ยนจำนวนโนด.....57
รูปที่ 3.15	จำนวนของแพ็กเกตที่สูญเสียในชั้นโครงข่ายสื่อสารย่อย MAC เมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโนด.....57
รูปที่ 3.16	พลังงานที่ใช้ต่อการส่งหนึ่งแพ็กเกตเมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโนด.....58
รูปที่ 3.17	จำนวนของแพ็กเกตที่สามารถส่งได้เมื่อปรับเปลี่ยนขนาดของพื้นที่จำลอง.....59
รูปที่ 3.18	ช่วงระยะเวลาการทำงานของโครงข่ายเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดของพื้นที่จำลอง.....59
รูปที่ 3.19	พลังงานที่ใช้ต่อการส่งหนึ่งแพ็กเกตเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดของพื้นที่จำลอง.....60
รูปที่ 3.20	ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยต่อแพ็กเกตเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดของพื้นที่จำลอง.....61
รูปที่ 3.21	จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเกตเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดของพื้นที่จำลอง.....61
รูปที่ 4.1	การเคลื่อนที่ของโนดแบบรายคาบ.....64
รูปที่ 4.2	โนดแต่ละโนดทำการเลือกโนดข้างเคียงที่ใกล้สุด.....65
รูปที่ 4.3	การเชื่อมต่อของโครงข่ายหลังทำการเลือก.....66
รูปที่ 4.4	โนดที่อยู่ใกล้โครงข่ายย่อยอื่นที่สุดของแต่ละโครงข่ายย่อย.....66
รูปที่ 4.5	โนดทำการเลือกเพื่อสร้างข่ายเชื่อมโยงระหว่างโครงข่ายย่อยด้วยกัน.....67
รูปที่ 4.6	โครงข่ายย่อยที่สามารถเชื่อมต่อกันได้ทั้งหมด.....69
รูปที่ 4.7	เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะทางระหว่างโนด.....69
รูปที่ 4.8	โนดในโครงข่ายทำการจัดรูปแบบโทโพโลยีใหม่.....70
รูปที่ 4.9	การปรับเปลี่ยนพลังงานตามขีดเริ่มเปลี่ยน.....71
รูปที่ 4.10	การเคลื่อนที่ของโนดในการจำลอง.....72
รูปที่ 4.11	การปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการส่งข้อมูลระหว่างโนด 2 และ โนด 3 เมื่อ X เท่ากับ 1, 9 และ 10.....73
รูปที่ 4.12	พลังงานที่ถูกใช้โดยเปรียบเทียบกับพลังงานที่ถูกใช้เมื่อ X เท่ากับ 1.....74
รูปที่ 4.13	จำนวนแพ็กเกตโอเวอร์เฮดเปรียบเทียบกับจำนวนแพ็กเกตโอเวอร์เฮด เมื่อ X เท่ากับ 1.....74
รูปที่ 4.14	การปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการส่งข้อมูลระหว่างโนด 2 และ โนด 3 เมื่อ Z เท่ากับ 1, 10 และ 35.....75
รูปที่ 4.15	พลังงานที่ถูกใช้โดยเปรียบเทียบกับพลังงานที่ถูกใช้เมื่อ Z เท่ากับ 1.....76
รูปที่ 4.16	จำนวนแพ็กเกตโอเวอร์เฮดเปรียบเทียบกับจำนวนแพ็กเกต โอเวอร์เฮดเมื่อ Z เท่ากับ 1.....76

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 4.17	ถ่ายเชื่อมโยงของโนดในโครงข่าย.....78
รูปที่ 4.18	การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อเชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยงตวรก.....78
รูปที่ 4.19	พารามิเตอร์ต่างๆ ในระเบียบวิธี.....80
รูปที่ 4.20	การขาดการเชื่อมต่อของโครงข่ายต้นไม้.....84
รูปที่ 4.21	การเชื่อมต่อของโครงข่ายย่อยสองโครงข่าย.....84
รูปที่ 4.22	สเตทแมชชีนของการเชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายย่อย.....85
รูปที่ 4.23	ผังงานเมื่อข่ายเชื่อมโยงทางตวรกมีการขาดการเชื่อมต่อ.....86
รูปที่ 4.24	ผังงานเมื่อโนดรับแพ็กเก็ตปรับปรุงรูทและพาเรนท์.....88
รูปที่ 4.25	ผังงานเมื่อโนดรับแพ็กเก็ตสำหรับตัดข่ายเชื่อมโยง.....88
รูปที่ 4.26	การปรับเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยงทางตวรกในโครงข่ายย่อย.....89
รูปที่ 4.27	สเตทแมชชีนของโนดรบกวน.....90
รูปที่ 4.28	สเตทแมชชีนของโนดตัดสินใจ.....91
รูปที่ 4.29	สเตทแมชชีนของโนดตอบรับ.....92
รูปที่ 4.30	จำนวนแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้เมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโนด.....96
รูปที่ 4.31	จำนวนของแพ็กเก็ตที่สูญเสียในชั้นโครงข่ายสื่อสารย่อย MAC เมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโนด.....96
รูปที่ 4.32	จำนวนของแพ็กเก็ตที่สูญเสียเนื่องจากไม่มีเส้นทางในการส่งเมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโนด.....97
รูปที่ 4.33	จำนวนฮอปเฉลี่ยเมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโนด.....97
รูปที่ 4.34	พลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งโนดเมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโนด.....98
รูปที่ 4.35	พลังงานที่ใช้ในการส่ง 1 แพ็กเก็ตต่อหนึ่งโนดเมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโนด.....98
รูปที่ 4.36	จำนวนแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้เมื่อปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่จำลอง.....100
รูปที่ 4.37	จำนวนแพ็กเก็ตที่สูญเสียในชั้นสื่อสารย่อย MAC เมื่อปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่จำลอง.....100
รูปที่ 4.38	จำนวนแพ็กเก็ตที่สูญเสียเนื่องจากไม่มีเส้นทางในการส่งเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่จำลอง.....101
รูปที่ 4.39	จำนวนฮอปเฉลี่ยเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่จำลอง.....101
รูปที่ 4.40	ค่าพลังงานที่ใช้ต่อโนดเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่จำลอง.....102

ภาพประกอบ

หน้า

รูปที่ 4.41 ค่าพลังงานที่ใช้ในการส่ง 1 แพ็กเกตต่อโหนดเมื่อปรับเปลี่ยน  
ขนาดพื้นที่จำลอง .....102



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางประกอบ	หน้า
ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของ IEEE 802.11.....	18
ตารางที่ 4.1 โหนดข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดและโหนดที่ถูกเลือกในแต่ละโหนด.....	68



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการใช้งานเทคโนโลยีการสื่อสารโดยผ่านโครงข่ายโทรคมนาคมอย่างแพร่หลาย การพัฒนาศักยภาพของโครงข่ายโทรคมนาคมจึงเป็นหัวข้อที่ได้รับความสนใจทั้งในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพจากนักวิจัยและผู้เชี่ยวชาญมากมาย วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งที่ได้นำเสนอแนวทางในการพัฒนารูปแบบ และวิธีการซึ่งมีส่วนช่วยพัฒนาโครงข่ายโทรคมนาคมให้มีคุณภาพดีขึ้น โดยเนื้อหาในบทนี้ได้กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาที่นำมาศึกษา จากนั้นได้เสนอแนวทางของวิทยานิพนธ์ วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ ขอบเขตของวิทยานิพนธ์ รวมไปถึงขั้นตอนดำเนินงาน และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงข่ายแอดฮอค (Ad-Hoc Network) [1] นั้นเป็นกลุ่มของอุปกรณ์การสื่อสารไร้สาย (โนด) ที่อาจจะมีความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) โดยที่รูปแบบการสื่อสารของโครงข่ายนี้ไม่มีการจำกัดรูปแบบที่ตายตัว และไม่สามารถที่จะทำนายการเชื่อมต่อของแต่ละข่ายเชื่อมโยง (Link) ได้ แต่ละโนดสามารถที่จะค้นพบข่ายเชื่อมโยงกับโนดอื่นๆ ได้โดยตัวของมันเอง โดยโนดที่เป็นข่ายเชื่อมโยงจะอยู่ในช่วงระยะการส่งพลังงาน (Transmission Range) ของกันและกัน และโนดนี้จะสามารถสื่อสารผ่านกันโดยตรงได้ อย่างไรก็ตาม ถ้าต้องการสื่อสารกับโนดซึ่งไม่มีข่ายเชื่อมโยงถึงตัวมันเอง โนดนั้นก็จำเป็นต้องส่งแพ็กเก็ต (Packet) ผ่านโนดตัวกลางอื่น (Intermediate Nodes) และโนดตัวกลางก็จะทำหน้าที่ส่งแพ็กเก็ตนั้นต่อไปยังโนดปลายทาง (Destination Node) คุณสมบัติที่เด่นชัดของโครงข่ายแอดฮอคคือมีการเปลี่ยนแปลงข่ายเชื่อมโยงอย่างกะทันหัน ซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของโนด หรือเกิดจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานในการเชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยง

โครงข่ายแอดฮอคนั้นเหมาะที่จะถูกนำไปใช้ในสถานการณ์ที่ไม่สามารถติดตั้งโครงสร้างหลักได้ (Infrastructure) หรือในงานเฉพาะกิจ เช่น ในสนามรบ การติดตั้งเซนเซอร์เพื่อใช้ในการตรวจจับทางชีววิทยา ในโรงงานอุตสาหกรรม การทำงานใต้ทะเล หรือแม้กระทั่งในอวกาศ เป็นต้น

เนื่องจากโครงข่ายชนิดนี้ โนดแต่ละโนดต้องมีการจัดสรรเส้นทาง และทำการสร้างข่ายเชื่อมโยงกับโนดข้างเคียงโดยตัวมันเองฉะนั้นจึงเป็นสาเหตุให้ระยะเวลาของการทำงานในแบบ



เดอริมีค่าต่ำ (Life Time) ดังนั้นการควบคุมพลังงานจึงเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากที่จะถูกนำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ [2] สำหรับโครงข่ายชนิดนี้ การควบคุมการใช้พลังงานนั้น ได้ถูกนิยามว่าเป็นกระบวนการการจัดการการใช้พลังงานของโหนด หรือของโครงข่าย เพื่อเป็นการปรับให้โครงข่ายสามารถทำงานได้ยาวนานขึ้นและสามารถส่งข้อมูลได้มากขึ้น การควบคุมพลังงานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการควบคุมพลังงานของการส่งข้อมูล (Transmission Power) ซึ่งการควบคุมพลังงานในการส่งข้อมูลจะส่งผลถึงการเชื่อมต่อระหว่างตัวโหนดกับโหนดข้างเคียง (Neighbor Nodes) ของตัวมัน และเป็นการจัดการรูปแบบการเชื่อมต่อในโครงข่าย (Topology Control) การควบคุมพลังงานในการส่งข้อมูลนี้จะส่งผลถึงหลายชั้นของโปรโตคอล ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาถึงผลกระทบในสองชั้นของ OSI คือ ชั้นสามซึ่งเป็นชั้นสำหรับหาเส้นทางในการส่งข้อมูลหรือชั้นเครือข่าย (Network Layer) และชั้นสองซึ่งเป็นชั้นสำหรับการจัดสรรช่องสัญญาณในการส่งข้อมูลหรือชั้นสื่อสารถ่ายย่อย MAC (MAC Sublayer)

ในชั้นเครือข่ายนั้นถ้าแต่ละโหนดมีการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลสูง ซึ่งนั่นหมายความว่าโหนดนั้นจะมีจำนวนโหนดข้างเคียงมาก ทำให้การส่งข้อมูลไปโหนดใดๆ จะใช้จำนวนฮอป (Hop) ที่น้อยในทางกลับกัน ถ้าพลังงานในการส่งข้อมูลมีน้อยทำให้ต้องเกิดการส่งผ่านข้อมูลในโหนดตัวกลางหลายโหนดหรือใช้จำนวนฮอปที่มากขึ้น ทำให้ค่าประวิงเวลา (Delay Time) มีค่าสูง และอาจส่งผลทำให้จำนวนแพ็กเก็ตที่มีการส่งสำเร็จมีค่าต่ำลงเนื่องจากมีโอกาสที่สูงขึ้นของการสูญเสียระหว่างการส่งผ่านข้อมูล

ส่วนผลกระทบของการปรับเปลี่ยนพลังงานในชั้นสื่อสารถ่ายย่อย MAC นั้น ถ้ามีการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่มีค่าสูงอาจทำให้โหนดที่อยู่ใกล้กับโหนดที่กำลังส่งข้อมูลไม่สามารถทำการส่งข้อมูลได้ในช่วงเวลานั้น จึงเป็นเหตุให้มีจำนวนโหนดในโครงข่ายที่สามารถส่งข้อมูลได้ในเวลาเดียวกันมีจำนวนน้อย ดังนั้นการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่น้อยก็จะส่งผลดีกับชั้นสื่อสารถ่ายย่อย MAC ซึ่งจะสามารถเพิ่มแบนด์วิดท์ให้กับโครงข่ายนั่นเองหรือจำนวนโหนดที่สามารถส่งข้อมูลกันได้ในเวลาเดียวกันเพิ่มมากขึ้น

ในอดีตที่ผ่านมาได้มีงานวิจัยซึ่งเกี่ยวกับการควบคุมรูปร่างของการเชื่อมต่อในโครงข่ายโดยการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการส่งข้อมูลหลากหลายรูปแบบ ซึ่งสามารถแบ่งระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลได้ออกเป็นสองรูปแบบหลักๆ นั่นคือ การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแบบสถิต และการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแบบพลวัต

ในงานวิจัยที่เสนอระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแบบสถิตยังสามารถแบ่งเป็นย่อยๆ ได้สองรูปแบบ นั่นคือ การสมมติให้แต่ละโหนดสามารถรู้ตำแหน่งของ

โนดในโครงข่ายได้โดยการใช้ GPS (Global Position System) แล้วให้โนดปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเป็นกราฟที่ต้องการตั้งในงานวิจัยที่ [3] L. Hu ได้ทำการเสนอระเบียบวิธีในการสร้างกราฟให้การเชื่อมต่อของโครงข่ายสามารถที่จะทนทานต่อการเกิดความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงหรือของโนด และทำให้โครงข่ายสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลได้

ต่อมาในงานวิจัยที่ [4] V. Rodoplu และ T. H. Meng เสนอระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนโทโพโลยีแบบกระจาย (Distributed Algorithm) เพื่อให้โครงข่ายใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และรับรองการเชื่อมต่อของโนดทั้งหมดในโครงข่าย โดยแต่ละโนด ถูกสมมติให้สามารถรู้ตำแหน่งได้โดยอาศัย GPS ซึ่งระเบียบวิธีนี้ใช้เฉพาะโครงข่ายที่โนดไม่มีความสามารถในการเคลื่อนที่หรือโครงข่ายแบบสถิต

R. Ramanathan และ R. Rosales-Hain [5] ได้ทำการเสนอระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่แต่ละโนด โดยอาศัยการปรับช่วงระยะเวลาการส่งข้อมูลแบบศูนย์กลางสองวิธี โดยสมมติให้มีโนดตัวกลางที่รู้ตำแหน่งของทุกโนดในโครงข่าย ระเบียบวิธีนี้ถูกนำมาใช้กับโครงข่ายแบบสถิต เพื่อให้จำนวนของข่ายเชื่อมโยงที่แต่ละโนดมีอย่างต่ำหนึ่งหรือสองข่ายเชื่อมโยง

ในงานวิจัย [6] สมมติให้โนดรู้ตำแหน่งของตัวเองจากการใช้ GPS ที่เวลาเริ่มต้นแต่ละโนดใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่มีค่ามากที่สุดเพิ่มเชื่อมต่อโครงข่ายซึ่งจะได้เป็นรูปกราฟแบบยูนิตดิส (Unit Disk Graph) แล้วสร้างกราฟแบบกาเบรียล (Gabriel Graph) จากนั้นจึงลดพลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อทดแทนข่ายเชื่อมโยงที่สามารถแทนได้โดยข่ายเชื่อมโยงย่อย ขั้นตอนนี้ทำเพื่อลดพลังงานของโครงข่าย

ในอีกรูปแบบหนึ่งของระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแบบสถิต คือแต่ละโนดจะรู้เพียงแค่ข้อมูลเฉพาะของตัวเอง แล้วใช้ข้อมูลนั้นสร้างการเชื่อมต่อในโครงข่ายขึ้นมา เพื่อให้ได้กราฟที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ เช่น ในงาน [7] เสนอระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนโทโพโลยีโดยแต่ละโนดทำการปรับเปลี่ยนช่วงระยะเวลาส่งโดยตัวมันเอง ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการรู้ทิศทางของโนดข้างเคียงของตัวเองโดยข้อมูลเหล่านี้เป็นเพียงข้อมูลเฉพาะกลุ่ม (Local Information) ณ เวลาเริ่มต้นนั้นแต่ละโนดจะทำการเพิ่มพลังงานในการส่งข้อมูลจนกระทั่งสามารถค้นหาโนดข้างเคียงของตัวเองในทุกๆ ทิศทาง ซึ่งผลของระเบียบวิธีนี้ทำให้โครงข่ายสามารถลดการใช้พลังงานลงได้ ซึ่งจุดประสงค์ของระเบียบวิธีนี้ต้องการให้แต่ละโนดในโครงข่ายใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่พอเพียง ให้โครงข่ายสามารถเชื่อมต่อกันได้อย่างทั่วถึง แต่ระเบียบวิธีแบบนี้ก็ไม่ได้พิจารณาจำนวนของข่ายเชื่อมโยงที่เชื่อมต่อกันที่แต่ละโนด และปริมาณของข้อมูลที่สามารถส่งได้ในโครงข่ายไม่เพียงแค่นั้นในงานวิจัย [8] เสนอระเบียบวิธีในการที่แต่ละโนดจะเลือกใช้ค่าพลังงานในการส่งข้อมูล

โดยค่าพลังงานในการส่งข้อมูลที่ใช้นี้จะทำให้แต่ละโหนดในโครงข่ายมีอย่างต่ำ  $k$  เส้นทางที่ไม่ทับซ้อนกันในการส่งข้อมูล ณ เวลาเริ่มต้นโครงข่ายจะใช้ระเบียบวิธีแบบศูนย์รวมในการสร้างกลุ่มของโหนด (Cluster) และทำการเลือกหัวหน้ากลุ่ม จากนั้นจึงทำการสร้างข่ายเชื่อมโยงเพื่อเชื่อมระหว่างแต่ละกลุ่มในโครงข่ายโดยใช้ระเบียบวิธีแบบกระจาย ซึ่งจุดประสงค์ของระเบียบวิธีนี้คือเพื่อลดพลังงานในการส่งข้อมูลเมื่อมีจำนวนโหนดในโครงข่ายเพิ่มขึ้น และเพิ่มความทนทานให้กับโครงข่ายเมื่อเกิดความเสียหายที่ข่ายเชื่อมโยงใดๆ

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยที่ผ่านมาของโครงข่ายแบบพลวัต โดยในงานวิจัย [5] ได้เสนอการระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลแบบกระจายเพื่อใช้กับโครงข่ายแบบพลวัตโดยแต่ละโหนดจะทำการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อให้ตัวมันเองมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงหนึ่งหรือสองข่ายเชื่อมโยงตามต้องการ แต่อย่างไรก็ดีระเบียบวิธีนี้ไม่ได้คำนึงถึงการเชื่อมต่อกันทั่วทุกโหนดในโครงข่าย และไม่ได้คำนึงถึงการเชื่อมต่อของข่ายเชื่อมโยงให้เป็นสองทิศทาง (Bidirectional Link)

ในงาน [9] ได้เสนอระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลของโหนด ซึ่งสามารถนำระเบียบวิธีนี้ไปใช้กับโปรโตคอลการหาเส้นทางล่วงหน้า (Pro-Active Routing Protocol) โดยจุดประสงค์ของระเบียบวิธีนี้เพื่อเพิ่มความสามารถในการส่งข้อมูลของโครงข่ายทั้งหมดให้มีค่ามากที่สุด และเพิ่มอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ ซึ่งทำได้โดยใช้เส้นทางที่ใช้พลังงานน้อยสุดในการส่งข้อมูล และลดการแย่งชิงการใช้ช่องสัญญาณกันในชั้นสื่อสารย่อย MAC ระเบียบวิธีนี้จะสมมติให้โหนดมีจำนวนของค่าพลังงานในการส่งข้อมูลที่จำกัด ทุกโหนดจะใช้ค่าพลังงานในการส่งข้อมูลเท่าๆกัน โดยทุกโหนดจะปรับค่าพลังงานในการส่งข้อมูลทุกค่าแล้วเลือกค่าที่ทำให้โครงข่ายใช้พลังงานต่ำสุดและสามารถทำให้โครงข่ายมีการเชื่อมต่อกันทั้งหมด

งานวิจัยที่ [10] Jilei Liu, Baochun Li ได้ทำการเสนอระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลแบบกระจายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลของโครงข่าย โดยการหาค่าชี้วัด ซึ่งเป็นจำนวนของจำนวนโหนดข้างเคียงที่เหมาะสมที่ทำให้ให้โครงข่ายสามารถส่งข้อมูลได้มากที่สุด แล้วให้แต่ละโหนดในโครงข่ายพยายามที่จะปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลให้มีจำนวนโหนดข้างเคียงเท่ากับค่าชี้วัดนั้น

งานวิจัยที่ [11] ทำการสังเกตว่าถ้าโครงข่ายมีโหนดมากๆ แต่ละโหนดควรใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่สูงเพื่อลดจำนวนครั้งในการส่งข้อมูลและเพิ่มทราฟฟิกของโครงข่าย ในทางกลับกันถ้าโครงข่ายมีโหนดน้อยก็ควรใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่ต่ำเพื่อลดพลังงานที่ใช้ส่งข้อมูล จึงได้เสนอระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล โดยจะให้ค่าชี้วัดสองค่า นั่นคือ ค่าขอบเขตบน

และค่าขอบเขตล่างของช่วงเวลาในการเข้าถึงสำหรับการส่งข้อมูล (Contention Time) ถ้าโนดซึ่งมีช่วงเวลาการเข้าถึงสำหรับการส่งข้อมูลมากแสดงว่าโนดนั้นมีข้อมูลที่ต้องส่งมาก โดยค่าช่วงเวลาการเข้าถึงสำหรับการส่งข้อมูลมากเกินค่าขอบเขตบน โหนดนี้จะทำการเพิ่มพลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อปรับระดับค่าช่วงเวลาการเข้าถึงสำหรับการส่งข้อมูลนี้ให้ลดต่ำลง อย่างไรก็ตามถ้าโนดที่มีข้อมูลที่ต้องส่งน้อยจนค่าช่วงเวลาการเข้าถึงสำหรับการส่งข้อมูลมีการลดน้อยกว่าค่าขอบเขตล่าง โหนดนั้นก็จะทำการลดพลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อปรับระดับค่าซ้ำวัดนี้ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

งานวิจัย [12] เสนอระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลแบบกระจาย จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อรับรองว่าชายเชื่อมต่อที่ได้เป็นแบบสองทิศทาง (Bi-Directional) และแต่ละโนดมีจำนวนโนดข้างเคียงตามต้องการ ซึ่งระเบียบวิธีนี้โนดแต่ละโนดจะทำการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลโดยตัวมันเอง โดยอาศัยเพียงแค่ข้อมูลของโนดข้างเคียง โหนดจะปรับช่วงระยะเวลาการส่งให้ตัวมันเองมีจำนวนโนดข้างเคียงอยู่ระหว่างค่าตัวซ้ำวัดจำนวนโนดข้างเคียงต่ำสุดและสูงสุด ( $[k_{min}, k_{max}]$ ) และแต่ละชายเชื่อมต่อจะเป็นชายเชื่อมต่อแบบสองทิศทาง ซึ่งเกิดจากการปรับพลังงานในการส่งข้อมูลของสองโนดใดๆ ในแต่ละชายเชื่อมต่อ เหล่านี้เป็นการสนับสนุนโปรโตคอลมาตรฐาน 802.11 [13]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ปัญหาในการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการส่งข้อมูล นั้นเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างไม่อาจละเลยได้ โดยในงานวิจัยที่ผ่านมาแล้วยังมีบางส่วนที่ไม่ได้ถูกนำมาพิจารณาอย่าง เช่น ในโครงข่ายแบบสถิติที่ยังไม่ได้มีการสนใจถึงการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งเพื่อให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพสูงสุด (ปริมาณข้อมูลที่สามารถส่งได้ในโครงข่ายมีจำนวนมาก) และในโครงข่ายแบบพลวัตนั้นสนใจเพียงแต่การเชื่อมต่อชายเชื่อมต่อให้ได้เป็นจำนวนที่ต้องการในแต่ละโนดแต่ไม่ได้พิจารณาถึงกรณีที่โครงข่ายแบ่งแยกเป็นกลุ่มโนดหลายๆ กลุ่ม หรือโครงข่ายมีความหนาแน่นของจำนวนโนดต่ำ (Sparse Network) ซึ่งในกรณีนี้โครงข่ายอาจมีกลุ่มโนดที่ไม่ถูกเชื่อมต่อ (Disconnected Nodes) เกิดขึ้นได้

## 1.2 แนวทางของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการเสนอระเบียบวิธีสองส่วนหลักๆ ซึ่งในส่วนแรกจะเป็นระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อให้โครงข่ายสามารถมีปริมาณข้อมูลที่สามารถส่งได้สูงในโครงข่ายแบบสถิติโดยกำหนดให้แต่ละโนดมีพลังงานเท่ากัน ส่วนที่สองจะแบ่งเป็นสองส่วนย่อยคือ ระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแบบพลวัต โดยโนด

มีการเคลื่อนที่แบบรายคาบ (Periodic Movement) ในส่วนนี้จะเป็นระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลให้เหมาะสมกับการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของแต่ละโหนดในโครงข่ายในแต่ละคาบการเคลื่อนที่ และส่วนถัดไปเป็นระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเมื่อโหนดมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random Movement) โดยระเบียบวิธีนี้จะแบ่งข่ายเชื่อมโยงออกเป็นสองแบบ นั่นคือข่ายเชื่อมโยงทางตรรก (Logical Link) ซึ่งโหนดจะพยายามปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลให้ข่ายเชื่อมโยงทางตรรกมีการเชื่อมต่อเป็นโครงข่ายต้นไม้ (Tree Network) เพื่อลดพลังงานในการส่งข้อมูลของโครงข่ายโดยรวมให้ต่ำลง และโครงข่ายสามารถเชื่อมต่อกันได้ทั้งหมด (ในกรณีที่ว่าพลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุดสามารถเชื่อมต่อทั้งโครงข่ายได้) และข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical Link) ซึ่งเกิดจากการเชื่อมต่อสองทิศทางของสองโหนดใดๆ

### 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิทยานิพนธ์

1. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลของโครงข่ายและใช้พลังงานของโครงข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ
2. เพื่อนำเสนอวิธีการให้โครงข่ายมีช่วงเวลาการขาดการเชื่อมต่อกันให้น้อยที่สุด

### 1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล (Transmission Range) ซึ่งจะใช้พลังงานในการส่งข้อมูลให้สามารถลดการใช้พลังงานของโครงข่าย โดยพิจารณา รูปแบบโครงข่ายในสองรูปแบบ 1) โครงข่ายแบบสถิติซึ่งมุ่งเน้นถึงการเพิ่มช่วงระยะเวลาการทำงานของโครงข่าย 2) โครงข่ายแบบพลวัตมุ่งเน้นถึงการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลให้คงรูปร่างของโครงข่ายต้นไม้ที่มีระยะทางระหว่างโหนดโดยรวมที่ต่ำ การศึกษาจะใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่ที่การเดินแบบสุ่ม (Random Walk Mobility Model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีการใช้อย่างกว้างขวาง

### 1.5 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1. ศึกษาค้นคว้าวิธีการปรับเปลี่ยนช่วงระยะเวลาการส่งข้อมูล
2. วิเคราะห์ผลกระทบของการปรับเปลี่ยนช่วงระยะเวลาการส่งข้อมูลที่มีผลต่อโครงข่าย

3. เสนอระเบียบวิธีในการหาช่วงระยะเวลาการส่งข้อมูลที่ไม่ทำให้โครงข่ายถูกตัดขาดเป็นหลายส่วน หรือถูกแบ่งเป็นโครงข่ายย่อย
4. หาความสัมพันธ์ระหว่างช่วงระยะเวลาการส่งข้อมูลกับพลังงานที่สูญเสีย
5. เสนอระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนช่วงระยะเวลาการส่งข้อมูลเพื่อให้ใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ
6. ทำการจำลองและปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
7. สรุป วิเคราะห์ผลที่ได้ และทำรายงานฉบับสมบูรณ์

## 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำวิธีการจัดการระยะเวลาการส่งนี้ไปใช้กับโครงข่ายแอดฮอก เพื่อให้โครงข่ายสามารถเชื่อมต่อและสามารถจัดการการใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

## 1.7 ประมวลวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท คือ

บทที่ 1 บทนำ: ประกอบไปด้วยเนื้อหาที่เกี่ยวกับแนวคิดเบื้องต้นของระเบียบวิธีวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลที่มีมาในอดีต และความสำคัญของการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล

บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง: ในบทนี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานของงานวิจัยนี้ โดยจะแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อ คือ 1) แบบจำลองการเคลื่อนที่ของโนด ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการจำลองการเคลื่อนที่ของโนดในการจำลองโครงข่ายแอดฮอกที่นักวิจัยได้ใช้กัน 2) มาตรฐาน IEEE 802.11 ซึ่งเป็นการจัดการช่องสัญญาณในการส่งข้อมูล 3) โพรโตคอลการค้นหาเส้นทางในการส่งข้อมูล 4) งานวิจัยเกี่ยวกับระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแอดฮอกแบบสถิติที่ทำการเสนอ 5) งานวิจัยเกี่ยวกับระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแอดฮอกแบบพลวัต

บทที่ 3 ระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแอดฮอกแบบสถิติที่นำเสนอ: โดยแบ่งเป็นระเบียบวิธีในการสร้างโครงข่ายต้นไม้แบบกระจาย และระเบียบ

วิธีการปรับเปลี่ยนการเชื่อมต่อขณะใช้งาน ในตอนท้ายของบทนี้ได้มีการจำลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระเบียบวิธีที่ทำการเสนอเหล่านี้

บทที่ 4 ระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแอตฮอกแบบพลวัตที่นำเสนอ: ซึ่งมีในส่วนที่การเคลื่อนที่ของโหนดเป็นแบบรายคาบ และส่วนที่การเคลื่อนที่ของโหนดเป็นแบบสุ่ม ยังได้มีการจำลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระเบียบวิธีในทั้งสองส่วน

บทที่ 5 บทสรุป: ทำการสรุปผลการวิจัยและคุณประโยชน์ทั้งหมดที่มีในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

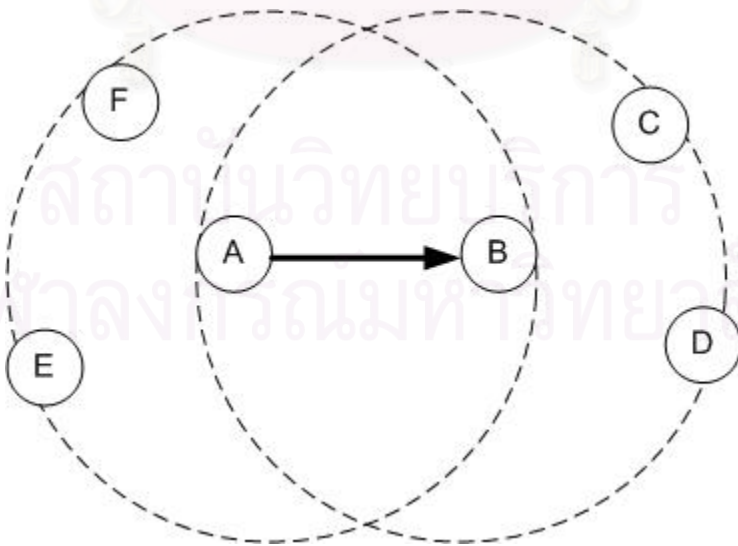


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าโครงข่ายแอดฮอกนั้นเป็นโครงข่ายที่โหนดสามารถเคลื่อนที่ได้ อย่างอิสระและไม่มีทิศทางเคลื่อนที่ที่แน่นอน ทำให้การสื่อสารในโครงข่ายชนิดนี้มีโอกาสอย่างสูง ในการเกิดความไม่ต่อเนื่องของข่ายเชื่อมโยงหรือการเกิดความเสียหายของโหนด ดังนั้นโปรโตคอล หลากหลายประเภทที่จะนำมาใช้กับโครงข่ายชนิดนี้ จึงแตกต่างจากในโครงข่ายแบบมีสายเป็นอย่างมาก อย่างเช่นการสื่อสารของสองโหนดใดๆ นั้นจะมีสื่อกลางเป็นการส่งสัญญาณวิทยุ สิ่งนี้จะสามารถ เกิดการชนกันของสัญญาณ ถ้ามีสองโหนดต้นทางที่ส่งพร้อมๆกัน ทำให้โหนดที่อยู่ในช่วงระยะเวลาส่ง ข้อมูลของกันและกันไม่สามารถที่จะทำการส่งข้อมูลพร้อมกันได้ โดยจากรูปที่ 2.1 โหนด A ได้ทำการส่ง ข้อมูลให้โหนด B ในระหว่างที่การส่งข้อมูลยังไม่เสร็จสิ้นนี้ โหนดที่เป็นโหนดข้างเคียงของโหนด A และโหนด B (C, D, E และ F) ไม่สามารถที่จะทำการส่งข้อมูลได้ ในส่วนของการหาเส้นทางสำหรับการส่งข้อมูลของ คู่โหนดใดๆ เนื่องจากสาเหตุของการเคลื่อนที่ของโหนดทำให้โทโพลยีของโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ เสมอ ทำให้ในส่วนของโปรโตคอลการหาเส้นทาง (Routing Protocol) โหนดแต่ละโหนดต้องทำการ ปรับปรุงข้อมูลและส่งแพ็กเก็ตเพื่อแจ้งสถานะตัวเองอยู่เสมอ ดังนั้นโปรโตคอลที่จะนำมาใช้ในขั้นนี้ควร จะสามารถลดแพ็กเก็ตโอเวอร์เฮด (Overhead Packet) ลงได้เพื่อให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพมากขึ้น



รูปที่ 2.1 แสดงการส่งข้อมูลระหว่างโหนด A และโหนด B



พลังงานในการส่งข้อมูลนั้น ก็มีผลกระทบกับประสิทธิภาพของโครงข่ายอย่างมาก ตัวอย่างในชั้นสื่อสาร MAC จะเห็นได้ว่าถ้าโหนดใช้พลังงานในการส่งข้อมูลครอบคลุมพื้นที่มาก ๆ จะทำให้โนดข้างเคียงของโนดนั้นไม่สามารถส่งข้อมูลได้หรือความจุในการส่งข้อมูลของโครงข่ายมีค่าต่ำ ในทางกลับกันถ้าพลังงานในการส่งข้อมูลของโหนดแต่ละโหนดในโครงข่ายมีค่าน้อย ก็จะทำให้โหนดในโครงข่ายส่งข้อมูลได้พร้อมกันในเวลาเดียวกัน แต่ก็ยังจะต้องพิจารณาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นในชั้นเครือข่ายอีกด้วย ซึ่งค่าพลังงานส่งข้อมูลจะกระทบถึงจำนวนของฮอปที่ใช้ในการส่งข้อมูล และยังส่งผลกระทบต่อความถี่ของการเกิดการเปลี่ยนแปลงโทโพโลยีของโครงข่ายอีกด้วย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเสนอระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล ซึ่งพลังงานในการส่งข้อมูลแสดงถึงการเชื่อมต่อของโครงข่ายดังนั้นจึงสามารถบอกได้ว่าประสิทธิภาพของโครงข่ายนั้นขึ้นอยู่กับ การเชื่อมต่อของโครงข่ายหรือพลังงานในการส่งข้อมูลที่แต่ละโหนดใช้ [2] อย่างไรก็ตามในบทนี้จะทำการแนะนำถึงแบบจำลองการเคลื่อนที่ที่นักวิจัยส่วนใหญ่นำมาใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของโหนด เทคนิคการจองช่องสัญญาณในโครงข่ายแอดฮอก โพรโตคอลการค้นหาเส้นทางในการส่งข้อมูล (Routing Protocol) และสุดท้ายจะกล่าวถึงการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลแต่ละรูปแบบในอดีต

## 2.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่การเดินแบบสุ่ม (Random Walk Mobility Model)

รูปแบบการเคลื่อนที่ของโหนดควรจะเลียนแบบการเคลื่อนที่ที่เป็นจริงของโหนดเคลื่อนที่ การเปลี่ยนความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ที่ต้องเกิดขึ้นและเกิดในช่วงเวลาที่เหมาะสม ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้กำหนดให้โหนดเคลื่อนที่ตามแบบจำลองการเดินแบบสุ่ม[14] ซึ่งเป็นแบบจำลองพื้นฐานที่ถูกใช้โดยนักวิจัยมากที่สุด

แบบจำลองการเคลื่อนที่การเดินแบบสุ่มได้มีการอธิบายครั้งแรกในทางคณิตศาสตร์โดยไอน์สไตน์ (Einstein) ในปีคริสต์ศักราช 1926 เนื่องจากหลากหลายรูปแบบในการเคลื่อนที่ในธรรมชาติมีการเคลื่อนที่ที่ไม่สามารถทำนายได้ แบบจำลองการเคลื่อนที่การเดินแบบสุ่มถูกพัฒนาขึ้นเพื่อที่ใช้จำลองการเคลื่อนที่ที่ไม่แน่นอนนี้ แบบจำลองการเคลื่อนที่นี้ โหนดเคลื่อนที่จะเคลื่อนที่จากตำแหน่งปัจจุบันของมันไปตำแหน่งใหม่โดยการสุ่มเลือกทิศทางและความเร็วเพื่อที่จะเดินทางไป ความเร็วและทิศทางการเคลื่อนที่ใหม่นั้นถูกเลือกแบบสุ่มระหว่างค่า  $[speedmin, speedmax]$  และ  $[0, 2\pi]$  เรเดียน ตามลำดับ แต่ละการเคลื่อนที่ใน Random Walk Mobility Model เกิดขึ้นในช่วงค่าคงที่เวลา  $t$  หรือค่าคงที่ระยะทางที่เคลื่อนที่  $d$  ไปได้ ที่จุดสิ้นสุดการเคลื่อนที่ค่าทิศทางและความเร็ว

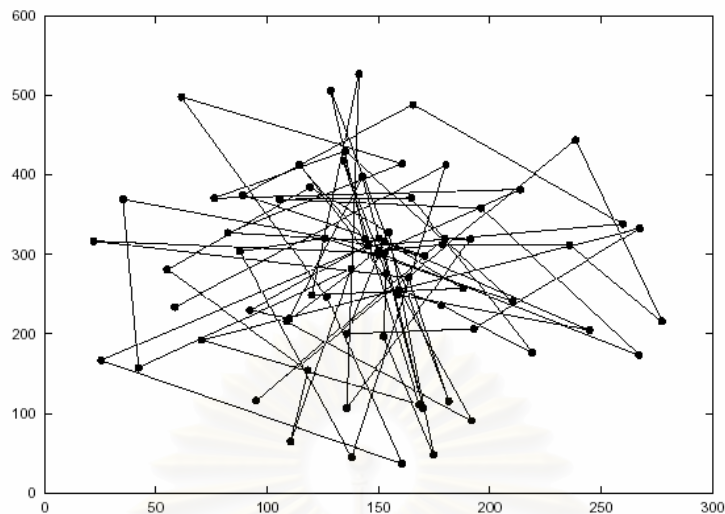
ใหม่จะถูกสุ่มอีกครั้ง ถ้าโนดเคลื่อนที่เคลื่อนที่ไปชนขอบของพื้นที่จำลองมันจะกระเด็นออกมากลับมุมที่ถูกระบุ (ทิศทางตั้งฉาก) กับทิศทางที่เข้ามาจากนั้นโนดเคลื่อนที่ก็เคลื่อนที่ต่อตามเส้นทางนั้น

การจำลองแบบ Random Walk Mobility Model ได้ถูกพัฒนาขึ้นในหลายรูปแบบ รวมไปถึงใน 1 มิติ, 2 มิติ, 3 มิติ และ d มิติ ได้มีการพิสูจน์ว่า Random Walk ในหนึ่งหรือสองมิติจะวิ่งกลับเข้าหาจุดเริ่มต้นอย่างแน่นนอนด้วยความน่าจะเป็น 1.0 คุณสมบัตินี้ทำให้แน่ใจว่า Random Walk แสดงแบบจำลองการเคลื่อนที่ซึ่งการเคลื่อนที่จะอยู่รอบๆจุดเริ่มต้น จะไม่เกิดเหตุการณ์ที่โนดเคลื่อนที่เคลื่อนไปไกลจากจุดเริ่มต้นแล้วไม่กลับมา

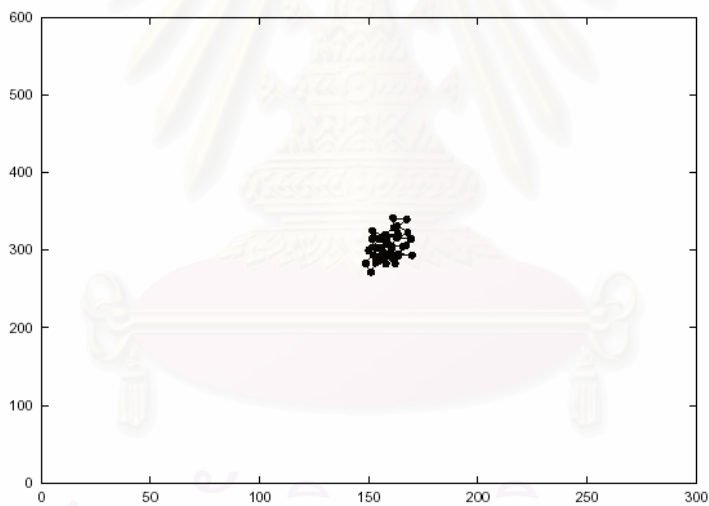
แบบจำลองการเคลื่อนที่การเดินแบบสุ่ม 2 มิติ ได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เพราะว่าพื้นผิวโลกถูกจำลองโดยแสดงเป็น 2 มิติ รูปที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของการเคลื่อนที่ที่ใช้แบบจำลอง 2 มิติ โหนดเคลื่อนที่จะเริ่มต้นการเคลื่อนที่ที่จุดศูนย์กลางของพื้นที่จำลอง  $300 \times 600$  ตร.ม. หรือที่ตำแหน่ง (150, 300) ที่แต่ละจุดโนดเคลื่อนที่จะทำการสุ่มทิศทาง จาก 0 ถึง  $2\pi$  และความเร็วระหว่าง 0 ถึง 10 เมตรต่อวินาที โดยโนดเคลื่อนที่จะเดินทางแต่ละครั้งด้วยเวลา 60 วินาทีก่อนเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ ซึ่งในแบบจำลองการเคลื่อนที่การเดินแบบสุ่มโนดเคลื่อนที่จะเปลี่ยนทิศทางหลังจากการเคลื่อนที่ที่ระยะทางคงที่แทนที่ของการเคลื่อนที่ที่เวลาคงที่ก็ได้ ในรูปที่ 2.2 เป็นตัวอย่างการเคลื่อนที่ของโนดเคลื่อนที่โดยการเคลื่อนที่แต่ละครั้งมีระยะทางที่คงที่ก่อนการสุ่มเลือกเส้นทางใหม่

แบบจำลองการเคลื่อนที่การเดินแบบสุ่ม เป็นรูปแบบการเคลื่อนที่ที่ไม่มีควมจำ (memoryless) เพราะว่าทิศทางและความเร็วการเคลื่อนที่ในปัจจุบันของโนดเคลื่อนที่ไม่ขึ้นกับทิศทางและความเร็วของการเคลื่อนที่ในอดีต คุณสมบัตินี้ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ไม่สมจริงขึ้น เช่น การหยุดกระทันหัน และการเปลี่ยนทิศทางกระทันหัน

ถ้าระยะเวลาในการเคลื่อนที่แต่ละครั้งหรือระยะทาง ถูกกำหนดให้มีค่าน้อย จากนั้นแล้วรูปแบบการเคลื่อนที่จะถูกสุ่มอยู่ในพื้นที่ที่จำกัดเป็นส่วนเล็กๆของพื้นที่จำลอง รูปที่ 2.3 แสดงประเภทการเคลื่อนที่แบบธรรมชาติสถิต (Static Nature) ตามที่แสดง โหนดเคลื่อนที่ไม่เคลื่อนที่ไปไกลจากตำแหน่งเริ่มต้น ดังนั้นถ้าเป้าหมายของการสังเกตประสิทธิภาพเพื่อสำหรับประเมินเครือข่ายกึ่งสถิต จะต้องตั้งค่าคงที่ที่จะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ให้มีค่าน้อยเช่นกัน



รูปที่ 2.2 รูปแบบการเคลื่อนที่ของโนดเคลื่อนที่ที่ใช้ Random Walk ใน 2 มิติ [14]



รูปที่ 2.3 รูปแบบการเคลื่อนที่ของโนดเคลื่อนที่ที่ใช้ Random Walk ใน 2 มิติ (ระยะทางคงที่) [14]

## 2.2 มาตรฐาน IEEE 802.11

IEEE 802.11 [13], [15] เป็นมาตรฐานที่สำคัญสำหรับโครงข่ายไร้สาย (WLANs) ซึ่งถูกนำมาใช้โดยผู้ผลิตผลิตภัณฑ์อุปกรณ์เกี่ยวกับโครงข่ายไร้สาย ซึ่งรุ่นล่าสุดของมาตรฐานนี้คือ IEEE 802.11b ที่ถูกเรียกในทางการค้าว่า Wi-Fi (Wireless Fidelity) มาตรฐาน IEEE 802.11 นี้เป็นการ

จัดการระหว่างชั้นสื่อสารกายภาพ (Physical Layer) และชั้นสื่อสารย่อย MAC (MAC Layer) ซึ่งมีการเผยแพร่ในปี 1997 โดยในตอนนี้จะอธิบายถึงการทำงานของมาตรฐานนี้

มาตรฐานสำหรับโครงข่ายไร้สายนี้ตรงข้ามกับมาตรฐานในโครงข่ายมีสายหรือแลน (LAN) อื่นๆ ซึ่งมาตรฐานนี้จำเป็นต้องมีการสนับสนุนถึงการเคลื่อนที่ของโนดด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการพิจารณาในเรื่องต่างๆเพิ่มเติมดังเช่น การจัดการการเชื่อมต่อ การจัดการความน่าเชื่อถือของข่าย เชื่อมโยง และการจัดการการใช้พลังงาน สำหรับเหตุผลเหล่านี้ทำให้ได้มีการใช้เวลาเกือบสิบปีที่จะพัฒนา IEEE 802.11 ซึ่งเป็นเวลายาวนานมากถ้าเปรียบเทียบกับการพัฒนามาตรฐานอื่นๆ ในมาตรฐาน 802 สำหรับการเชื่อมต่อแบบมีสาย ภายใต้ IEEE 802.11 นี้ อุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ (MTs: Mobile Terminal) สามารถทำงานได้สองระบบ ประเภทแรกคือระบบที่มีโครงสร้างแน่นอน (Infrastructure Mode) ที่ซึ่งอุปกรณ์เคลื่อนที่สามารถที่จะสื่อสารกับจุดเชื่อมต่อ (APs: Access Point) ได้มากกว่าหนึ่งจุดซึ่งจุดทางเข้านี้เป็นตัวเชื่อมกันในโครงข่ายไร้สาย ส่วนประเภทที่สองระบบ แอดฮอค (Ad Hoc Mode) ที่ซึ่งอุปกรณ์เคลื่อนที่สามารถสื่อสารกับอุปกรณ์เคลื่อนที่อื่นได้โดยตรงโดยปราศจากการใช้จุดเชื่อมในโครงข่ายไร้สาย

### 2.2.1 ชั้นสื่อสารกายภาพ (Physical Layer)

มาตรฐาน IEEE 802.11 มีตัวกลางที่ใช้ในระดับกายภาพสนับสนุนอยู่สามรูปแบบ ซึ่งรูปแบบแรกนั้นของอินฟราเรด (Infared) และอีกสองรูปแบบนั้นอยู่บนพื้นฐานของการส่งสัญญาณวิทยุ (Radio Transmission) ซึ่งหลักการของโปรโตคอลชั้นสื่อสารกายภาพนั้นถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ Physical Medium Dependent Sublayer (PMD) and Physical Layer Convergence Protocol (PLCP) โดยที่ PMD เกี่ยวข้องกับการเข้ารหัส ถอดรหัส การมอดูเลตสัญญาณ และการจัดการกับความผิดพลาดของสัญญาณ ในส่วนของ PLCP นั้นจะเป็นตัวประสานงานกับชั้นสื่อสารย่อย MAC โดยมีหน้าที่เป็นตัวเสนอจุดการเข้าใช้บริการ (Service Access Point: SAP) ที่ไม่ขึ้นกับเทคโนโลยีการส่งข้อมูล การเข้าใช้ช่องสัญญาณที่ว่าง (Clear Channel Assessment: CCA) และการนำสัญญาณส่งไปถึงชั้นสื่อสารย่อย MAC

SAP นั้นมีช่องสัญญาณที่มีแบนด์วิดท์ในการส่งข้อมูลสูงถึง 1 ถึง 2 เมกะบิตต่อวินาที (Mbps) ในส่วนของ CCA เป็นกลไกพื้นฐานของ 802.11 ในชั้น MAC มีสามเทคนิคสำหรับมาตรฐาน 802.11 ใช้ในการสื่อสารของชั้นสื่อสารกายภาพ เทคนิคแรกใช้ Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) ทำงานที่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ (GHz) ISM band (Industrial, Scientific, and Medical)

ที่ความเร็วในการส่ง 1 เมกะบิตต่อวินาที (ซึ่งใช้รูปแบบการมอดูเลตที่ระดับ 2 ของ Gaussian Frequency Shift Keying (GFSK)) และที่ความเร็วในการส่ง 2 เมกะบิตต่อวินาที (ใช้ระดับ 4 ของ GFSK) เทคนิคที่สองใช้ Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) ทำงานที่ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิรตซ์ ISM band ความเร็วในการส่ง 1 เมกะบิตต่อวินาที (ใช้รูปแบบการมอดูเลตแบบ Differential Binary Phase Shift Keying (DBPSK)) และความเร็วในการส่ง 2 เมกะบิตต่อวินาที (ใช้รูปแบบการมอดูเลตแบบ Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK)) ส่วนเทคนิคสุดท้ายใช้อินฟาเรดซึ่งทำงานในช่วงความยาวคลื่น 850 – 950 นาโนเมตร ที่ความเร็วในการส่งข้อมูล 1 เมกะบิตต่อวินาที และ 2 เมกะบิตต่อวินาที โดยใช้รูปแบบของ Pulse Position Modulation (PPM)

### กลไกการรับรู้คลื่นพาห์ (Carrier Sensing Mechanisms)

ในมาตรฐาน IEEE 802.3 การรับรู้ช่องสัญญาณนั้นทำได้โดยง่าย โดยตัวรับสัญญาณอ่านค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ที่สูงสุดบนสายเคเบิล และเปรียบเทียบกับขีดเริ่มเปลี่ยน (Threshold) ซึ่งตรงข้ามกับกลไกซึ่งนำมาใช้ใน IEEE 802.11 ที่มีความซับซ้อนอย่างมาก อย่างที่ได้กล่าวมาตอนต้นแล้วว่าการรับรู้ในชั้นสื่อสารกายภาพ ต้องผ่านสัญญาณ CCA (Clear Channel Assessment) ซึ่งจัดการโดยโปรโตคอล PLCP ในชั้นสื่อสารกายภาพของ IEEE 802.11 หลักการ CCA ถูกพัฒนาบนพื้นฐานของการรับรู้ของจุดซึ่งเชื่อมต่อกับอากาศ ทั้งการรับรู้บิตที่ถูกรบกวนในอากาศ หรือการตรวจความแรงของสัญญาณ (Received Signal Strength: RSS) ของคลื่นพาห์เปรียบเทียบกับขีดเริ่มเปลี่ยน โดยการตัดสินใจนั้นขึ้นกับบิตที่ถูกรบกวนพบถ้าการดำเนินการค่อนข้างช้า ก็จะมีแนวโน้มเชื่อถือว่าสูง หรือการตัดสินใจบนพื้นฐานของ RSS อาจจะทำให้เกิดความผิดพลาดได้ โดยมีสาเหตุเกิดจากการที่มีตัวแทรกแซงเกิดขึ้น

#### 2.2.2 พื้นฐานกลไกในชั้นสื่อสารย่อย MAC

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงชั้นสื่อสารย่อย MAC ที่อยู่ในมาตรฐาน IEEE 802.11 โดยหน้าที่แรกของชั้นสื่อสารย่อยนี้เพื่อที่จะตัดสินใจการร้องขอการสื่อสารของสถานีไร้สายหลายๆสถานีในพื้นที่ ความสำคัญของส่วนนี้มีสาเหตุมาจากการสื่อสารไร้สายนั้นโดยธรรมชาติจะเป็นการแพร่สัญญาณ และการชวงชิงที่จะเข้าใช้ช่องสัญญาณร่วมกันจึงจำเป็นต้องมีการจัดการแบบรอบคอบเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการชนกันของสัญญาณ หรืออย่างน้อยที่สุดเพื่อที่จะลดจำนวนของการชนกันของ

สัญญาณ ในชั้นสื่อสารย่อย MAC ยังมีหน้าที่ที่มีส่วนช่วยการทำงานอีกหลายรูปแบบด้วยเช่น การใช้งานข้ามเขต การ พิสูจน์ตัวจริง (Authentication) และการเก็บรักษาพลังงาน

บริการพื้นฐานที่มีการสนับสนุนคือ Mandatory Asynchronous Data Service และ Optional Real-Time Service โดยที่ Asynchronous Data Service สนับสนุนการแพร่แพ็คเก็ตแบบผู้รับคนเดียว (unicast) และการแพร่แพ็คเก็ตแบบมีผู้รับร่วมหลายคน (multicast) และ Real-Time Service ใช้เพียงโครงข่ายที่มีโครงสร้างที่แน่นอนซึ่งมีตัวเชื่อมต่อคอยควบคุมการเข้าใช้ช่องสัญญาณ

### การควบคุมการเข้าใช้ส่วนกลางในระบบไร้สายแบบกระจาย (Distributes Foundation Wireless Medium Access Control (DFWMAC))

วิธีการเข้าใช้แบบแรกของมาตรฐาน IEEE 802.11 คือ DCF (Distributed Coordination Function) วิธีนี้อยู่บนพื้นฐานของการรับรู้คลื่นพาห์ (Carrier Sense) กับการเข้าใช้หลายจุด (Multiple Access) และการหลีกเลี่ยงการชน (Collision Avoidance) หรือเรียกโดยรวมว่า CSMA/CA ซึ่งได้มีการใช้กลไกของ RTS-CTS เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงปัญหาการแฝงของอุปกรณ์ปลายทาง (Hidden Terminal Problem) อีกวิธีของการเข้าใช้คือ PCF (Point Coordination Function) ที่ซึ่งใช้กับบริการที่เป็นเวลาจริง (Real-Time) เมื่อทำงานในรูปแบบ PCF จะมี AP คอยควบคุมการเข้าใช้ช่องสัญญาณ และหลีกเลี่ยงการส่งพร้อมๆกันของหลายโนด

### Inter-Frame Spacing (IFS)

Inter-Frame Spacing นั้นคือการมีช่วงเวลาระหว่างการส่งข้อมูลสองเฟรมโดยสถานีใดๆ ซึ่งมีด้วยกันสี่แบบเรียงจากช่วงเวลาที่น้อยไปมากคือ SIFS, PIFS, DIFS และEIFS สิ่งนี้เป็นตัวระบุระดับความสำคัญของการเข้าใช้ส่วนกลาง โดยค่า IFS ที่น้อยกว่าจำเป็นระดับความสำคัญของการเข้าใช้ส่วนกลางสูงกว่าเพราะว่าเวลาที่คอยเพื่อที่จะเข้าใช้ส่วนกลางมีค่าน้อยกว่า ค่าที่แท้จริงของ IFS นั้นได้มาจากคุณสมบัติของ Physical Layer Management Information Base (PHYMIB) แต่ไม่ขึ้นกับอัตราการส่งข้อมูลของสถานี

- Short inter-frame spacing (SIFS) เป็นช่วงเวลาที่สั้นที่สุดใน IFS และมีระดับความสำคัญของการเข้าใช้ส่วนกลางสูงสุด ซึ่งถูกใช้กับข่าวสารควบคุมที่สั้นเช่น การ

ตอบรับสำหรับข้อมูล และการตอบสนองโพล การส่งแพ็กเก็ตใดๆ ก็ตามควรเริ่มหลังจากตรวจเช็คว่างส่วนกลางนั้นว่างเป็นเวลาอย่างน้อยที่สุด SIFS

- PCF Inter-Frame Spacing (PIFS) เป็นเวลาการคอยที่มีค่าอยู่ระหว่าง SIFS และ DIFS ซึ่งใช้กับบริการที่เป็นเวลาจริง
- DCF Inter-Frame Spacing (DIFS) ใช้กับสถานีซึ่งทำงานภายใต้รูปแบบ DCF สำหรับการส่งแพ็กเก็ต โดยค่านี้นี้ใช้สำหรับการส่งข้อมูลที่ไม่ได้จังหวะกันในช่วงของการแย่งชิง (Contention Period)
- Extended Inter-Frame Spacing (EIFS) เป็นช่วงเวลาที่ยาวที่สุดของ IFS และเป็นการใช้ส่วนกลางที่มีระดับความสำคัญต่ำสุด EIFS ใช้สำหรับการเข้าจังหวะใหม่เมื่อใดก็ตามที่ชั้นสื่อสารกายภาพตรวจเจอการรับเฟรมของชั้น MAC ที่ผิดพลาด

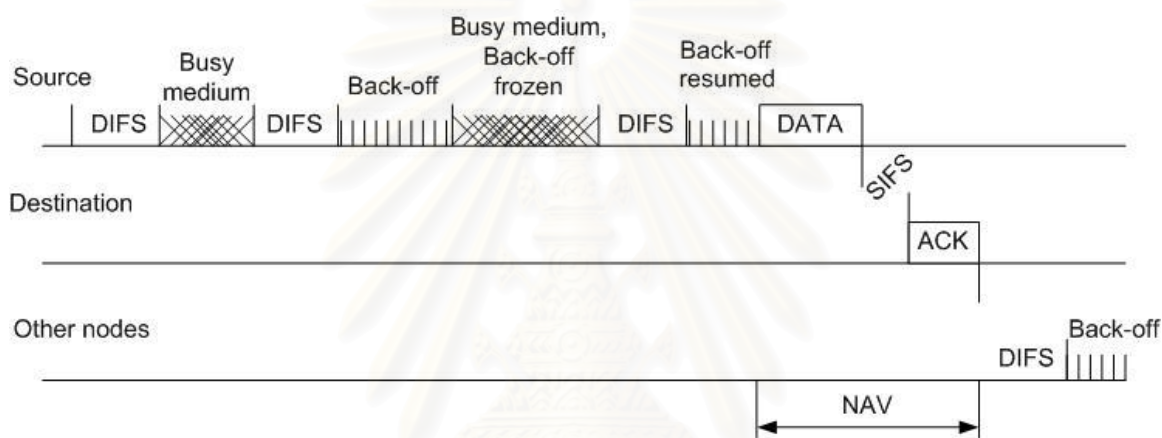
### 2.2.3 กลไกของ CSMA/CA

การรับรู้คลื่นพารากับการเข้าใช้หลายจุด และการหลีกเลี่ยงการชนกัน (CAMA/CA) อยู่ในกลไกของชั้น MAC ซึ่งใช้สำหรับ IEEE 802.11 WLANs การรับรู้คลื่นพารากับการเข้าใช้หลายจุด และการตรวจจับการชน (Multiple Access and Collision Detection: CSMA/CD) เป็นวิธีที่ศึกษากันอย่างกว้างขวางในโครงข่ายมีสายของ IEEE 802.x แต่อย่างไรก็ตาม วิธีนี้ไม่สามารถที่จะนำมาใช้กับโครงข่ายไร้สายเนื่องจากอัตราความผิดพลาดในโครงข่ายไร้สายนั้นมีค่าสูงกว่ามาก และการอนุญาตให้ชนกันจะนำมาซึ่งการลดลงของวิสัยสามารถ (Throughput) อย่างมาก ยิ่งกว่านั้นการตรวจจับการชนกันในส่วนกลางของโครงข่ายไร้สายนั้นเป็นไปได้ยาก ดังนั้นวิธีที่นำมาใช้ ในที่นี้จึงเป็นการหลีกเลี่ยงการชนกัน (Collision Avoidance) อย่างมีประสิทธิภาพ

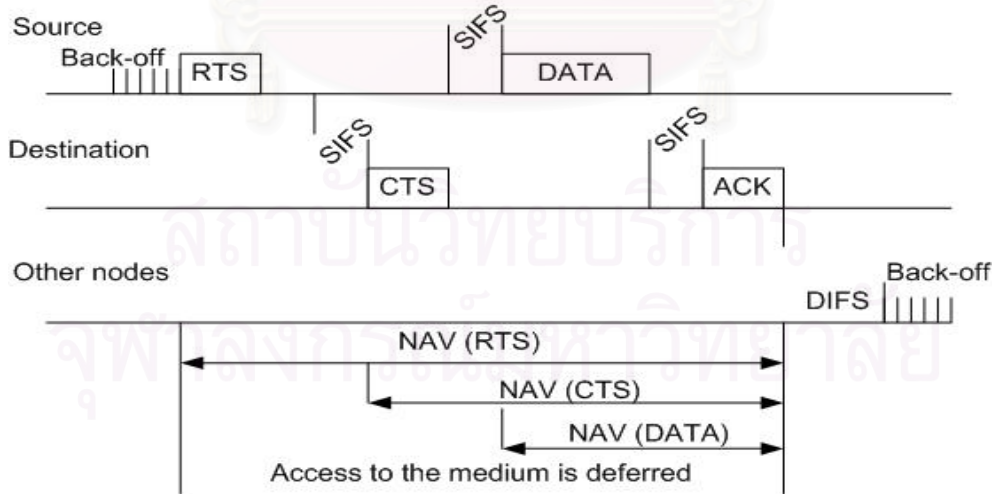
### กลไกการเข้าใช้ส่วนกลาง (The Medium Access Mechanism)

พื้นฐานกลไกการเข้าใช้ของสัญญาณใน IEEE 802.11 แสดงในรูปที่ 2.4(ก) ถ้าส่วนกลางถูกตรวจสอบว่าไม่มีใครใช้อยู่ภายในช่วงเวลา DIFS โหนดจะสามารถเข้าใช้ส่วนกลางสำหรับการส่งข้อมูล ซึ่งหมายความว่าค่าประวิงสำหรับการเข้าใช้ของสัญญาณมีเท่ากับ DIFS แต่ถ้าส่วนกลางนั้นมีโนดใดๆเข้าใช้อยู่ โหนดจะหยุดรอ (Back Off) ซึ่งเป็นค่าที่สถานีจะใช้ป้องกันการเข้าใช้ของสัญญาณ ซึ่งค่าเวลานี้ได้มาจากการสุ่มภายใน Contention Window (CW) ค่าของ CW นี้จะ

ปรับเปลี่ยนอยู่ระหว่าง  $CW_{min}$  และ  $CW_{max}$  ช่วงเวลานั้นเป็นการรวมทั้งหมดของเวลาที่มาจาก ค่า  
 ประสิทธิภาพแพร่กระจาย ค่าประวิงในตัวส่ง และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับชั้นสื่อสารกายภาพอื่นๆ  
 ตัวนับค่าช่วงเวลาของ Back Off นั้นจะลดลงจนถึงศูนย์ซึ่งเมื่อนั้นสถานีสามารถเข้าใช้ส่วนกลางได้ แต่  
 ในขณะที่อยู่ในกระบวนการ Back Off นั้นถ้าโนดตรวจจับเจอช่องสัญญาณว่ามีโนดอื่นมาเข้าใช้ มัน  
 จะหยุดค่าในตัวนับ Back Off และค่าในตัวนับ Back Off จะลดลงอีกครั้งเมื่อมีการตรวจเจอว่าไม่มี  
 โนดใดมาเข้าใช้ช่องสัญญาณ ดังนั้นในระหว่างการส่งข้อมูลที่ประสบความสำเร็จแต่ละสถานีจะกระทำ  
 กระบวนการ Back Off นี้อย่างน้อยหนึ่งครั้ง



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4. กลไกของ IEEE 802.11DCF และ RTS-CTS



วิธีการนี้ถูกกล่าวกันว่ามีความอิสระอย่างมากสำหรับเวลาของการคอยทั้งหมดที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูล ซึ่งทำให้แต่ละสถานีนั้นมีโอกาสเท่ากันที่จะทำการส่งข้อมูลในแต่ละครั้งถัดไป โดยในทางอุดมคตินั้น จะให้สถานีที่คอยนานกว่ามีโอกาสการเข้าใช้บริการสูงกว่า เพื่อเป็นการแน่ใจว่าพวกเขาจะมีโอกาสในการส่งข้อมูลได้ ซึ่งการใช้รูปแบบของ Back Off จะทำให้แต่ละสถานีซึ่งใช้กลไกข้างบนมีความเท่าเทียมกันที่จะส่งข้อมูล โดยที่สถานีที่มีการคอยนานกว่าจะไม่ต้องสุ่มเวลาของการ Back Off ใหม่จะคอยเพียงแค่ค่าเวลาของการ Back Off ที่ยังคงเหลืออยู่ในตัวนับ Back Off

### ขนาดของ Contention Window (Contention Window Size)

ขนาดของ Contention Window (CW) เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญ ซึ่งถ้า CW มีขนาดเล็ก จะทำให้การสุ่มนั้นมีค่าใกล้เคียงกันทำให้เกิดความน่าจะเป็นของการชนกันสูง หรืออีกนัยหนึ่งถ้าของ CW มีค่ามากก็จะทำให้การประวิงนั้นนานเกินจำเป็น ในทางอุดมคติให้ระบบควรจะมีการปรับเปลี่ยน (update) ถึงจำนวนของสถานีในปัจจุบันที่ซึ่งกำลังช่วงชิงการเข้าใช้ช่องสัญญาณ ผลจากสิ่งนี้ทำให้วิธีการ The Truncates Binary Exponential Back-Off ถูกนำมาใช้ซึ่งคล้ายกับวิธีการที่มีอยู่ใน IEEE 802.3

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของ IEEE 802.11

Parameter	802.11 (FHSS)	802.11 (DSSS)	802.11 (IR)	802.11b	802.11a
$t_{slot}$	50 $\mu\text{sec}$	20 $\mu\text{sec}$	8 $\mu\text{sec}$	20 $\mu\text{sec}$	9 $\mu\text{sec}$
SIFS	28 $\mu\text{sec}$	10 $\mu\text{sec}$	10 $\mu\text{sec}$	10 $\mu\text{sec}$	16 $\mu\text{sec}$
PIFS	SIFS + $t_{slot}$				
DIFS	DIFS + (2 * $t_{slot}$ )				
Operating Frequency	2.4 GHz	2.4 GHz	850–950 nm	2.4 GHz	5 GHz
Maximum Data Rate	2 Mbps	2 Mbps	2 Mbps	11 Mbps	54 Mbps
$CW_{min}$	15	31	63	31	15
$CW_{max}$	1023	1023	1023	1023	1023

Contention Window เริ่มต้นนั้นเป็นค่าสุ่มระหว่าง  $(0, CW_{min})$  และแต่ละครั้งของการเกิดการชนกันของการส่งข้อมูลค่า CW จะเพิ่มขึ้นเท่าตัวของขนาดของมันและเพิ่มจนถึงค่า  $CW_{max}$  ดังนั้นช่วงที่มีการส่งข้อมูลมากขนาดของ CW จะมีค่าสูง ในขณะที่ช่วงที่มีการส่งข้อมูลมีค่าต่ำจะได้ค่า CW เป็นค่าน้อยทำให้การปะวิงในการเข้าใช้มันต่ำไปด้วย โดยค่าของ  $CW_{min}$  และ  $CW_{max}$  สำหรับชั้นสื่อสารกายภาพที่แตกต่างกันถูกระบุอยู่ในตารางที่ 2.1

### การตอบรับการส่งข้อมูล (Acknowledgment)

การตอบรับ (ACKs) ต้องถูกส่งเมื่อมีการรับแพ็กเก็ตข้อมูลเพื่อแน่ใจว่าการส่งข้อมูลนั้นถูกต้อง สำหรับแพ็กเก็ตการแพร่เดี่ยวผู้รับจะเข้าถึงส่วนกลางหลังจากการคอยสำหรับ SIFS และจึงส่ง ACK แต่สำหรับสถานีอื่นต้องคอยช่วงเวลาของ DIFS รวมกับค่า Back Off ของแต่ละสถานี ซึ่งสิ่งนี้จะลดความน่าจะเป็นในการชนกัน เช่นนั้นการส่งการตอบรับข้อมูลของแพ็กเก็ตข้อมูลที่รับก่อนหน้าจะมีระดับความสำคัญที่สูงกว่าการเริ่มต้นการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลใหม่ การตอบรับข้อมูล (ACK) เป็นการแน่ใจว่าการรับของเฟรมในชั้น MAC มีความถูกต้องโดยการใช่วิธี Cyclic Redundancy Checksum (CRC) ถ้าผู้ส่งไม่ได้รับ ACK จะทำการส่งอีกครั้งซึ่งจำนวนของการส่งอีกครั้งจะถูกจำกัดและความเสียหายจะถูกรายงานถึงชั้นที่สูงกว่าหลังจากจำนวนของการส่งอีกครั้งเกินค่าที่จำกัด

### กลไกของ RTS-CTS

ปัญหาการแฝงของสถานี (Hidden Terminal Problem) เป็นปัญหาหลักที่ถูกสังเกตในโครงข่ายไร้สาย สิ่งนี้เป็นตัวอย่างที่ดีของปัญหาที่เกิดขึ้นเนื่องจากข้อมูลของโทโพโลยีไม่สมบูรณ์ในโครงข่ายไร้สายที่ซึ่งกล่าวในข้างต้น และยังเป็นธรรมชาติการสื่อสารในโครงข่ายไร้สาย ในบางสถานการณ์ หนึ่งในโหนดสามารถรับข้อมูลจากสองโหนดใดๆ ทำให้ไม่สามารถได้ยินกันได้ ในกรณีเช่นตัวรับถูกส่งข้อมูลอย่างมากโดยตัวส่งสองตัวเป็นผลในการชนและการลดทอน แต่ตัวส่งไม่ทราบถึงสิ่งนี้และคิดว่าตัวรับได้รับชัดเจนโดยปราศจากการรบกวนใดๆ สิ่งนี้เรียกว่า Hidden Terminal Problem การแก้ไขปัญหานี้ทำได้โดยใช้กลไกของ RTS-CTS ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4(ข)

## RTS-CTS ทำงานอย่างไร

ผู้ส่งจะส่ง RTS ไปยังผู้รับก่อนจะส่งแพ็กเก็ตข้อมูล ซึ่งใน RTS จะมีระบุหมายเลขผู้รับของแพ็กเก็ตข้อมูลที่จะส่ง และเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการส่งจนจบกระบวนการ โหนดข้างเคียงของผู้รับจะได้รับแพ็กเก็ต RTS และจะทำการตั้งค่า NAV (Network Allocation Vector) ซึ่ง NAV เป็นค่าที่ระบุเวลาที่เร็วที่สุดเมื่อสถานีนั้นสามารถที่จะพยายามส่งข้อมูลได้หรือสถานีนั้นจะเข้าไปใช้ส่วนกลางได้ แต่ถ้าผู้รับได้รับ RTS และพร้อมที่จะรับข้อมูลจะคอยเวลา SIFS แล้วจะส่งแพ็กเก็ตตอบรับ Clear To Send (CTS) ซึ่งในแพ็กเก็ตนี้จะบรรจุช่วงเวลาของกระบวนการส่งข้อมูล เมื่อโหนดอื่นที่เป็นโหนดข้างเคียงของโหนดตัวรับรับแพ็กเก็ตนี้จะทำการตั้งค่า NAV อย่างไรก็ดีโหนดที่รับ RTS และ CTS อาจเป็นโหนดที่แตกต่างกันก็ได้ซึ่งเป็นกรณีหนึ่งของโหนดแฝง

เมื่อมีการส่ง RTS และรับ CTS เรียบร้อย โหนดข้างเคียงทั้งหมดที่ได้รับสองแพ็กเก็ตนี้จะรู้ว่าส่วนกลางนั้นได้มีโหนดที่กำลังส่งข้อมูลอยู่ ทำให้โหนดที่ส่งข้อมูลสามารถเริ่มส่งแพ็กเก็ตข้อมูลได้เมื่อคอยเวลา SIFS และที่โหนดตัวรับเมื่อรับแพ็กเก็ตข้อมูลจะคอยเวลา SIFS แล้วจึงส่งแพ็กเก็ตตอบรับ (ACK) กระบวนการการส่งข้อมูลถือเป็นอันจบ และค่า NAV ที่อยู่ในแต่ละโหนดจะตั้งว่าส่วนกลางนั้นจะเป็นศูนย์ (นอกจากโหนดที่มีการรับ RTS/CTS ของโหนดอื่น) ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะเริ่มต้นใหม่อีกครั้งโดย RTS นั้นจะเหมือนกับแพ็กเก็ตอื่นๆ และการชนกันจะเกิดแค่ช่วงของการส่ง RTS และ CTS หมายความว่าเมื่อ RTS และ CTS ถูกส่งและรับเรียบร้อยแล้ว โหนดที่ได้รับสองแพ็กเก็ตนี้จะป้องกันการชนกันของการส่งข้อมูลที่จะตามมา เพราะว่าค่า NAV ของโหนดเหล่านี้จะถูกตั้งจากค่าการใช้ RTS-CTS ก่อนการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลนั้น ให้เป็นรูปแบบของการรับรู้คลื่นพาห์เสมือน (Virtual Carrier Sensing)

## โอเวอร์เฮดใน RTS-CTS

จะสังเกตได้ว่ากระบวนการนี้เป็นการจองส่วนกลางก่อนการส่งข้อมูลพิเศษ เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการชนกันที่จะเกิดขึ้นในระหว่างนี้ แต่การส่ง RTS-CTS เป็นผลของการเกิดโอเวอร์เฮดที่ไม่สามารถเพิกเฉยได้ ดังนั้นกลไก RTS-CTS นี้จะถูกใช้เหมาะสมเท่านั้น นั่นคือจะมีการนำขีดเริ่มเปลี่ยน RTS มาใช้เป็นตัวระบุ ว่าเมื่อไรก็ตามที่จะทำการเริ่มต้นกระบวนการ RTS-CTS หรือไม่โดยทั่วไปแล้วถ้าขนาดของเฟรมมีขนาดยาวกว่าขีดเริ่มเปลี่ยน RTS กลไก RTS นี้จะถูกใช้ขึ้นมาและมีการส่งแพ็กเก็ตกันสี่ทาง (Four-Way Handshake) (RTS-CTS-DATA-ACK) ตามมา แต่ถ้าขนาดเฟรม

สั้นกว่าขีดเริ่มเปลี่ยน RTS โหนดจะทำการส่งแพ็กเก็ตแค่สองทาง (Two-Way Handshake) (DATA-ACK)

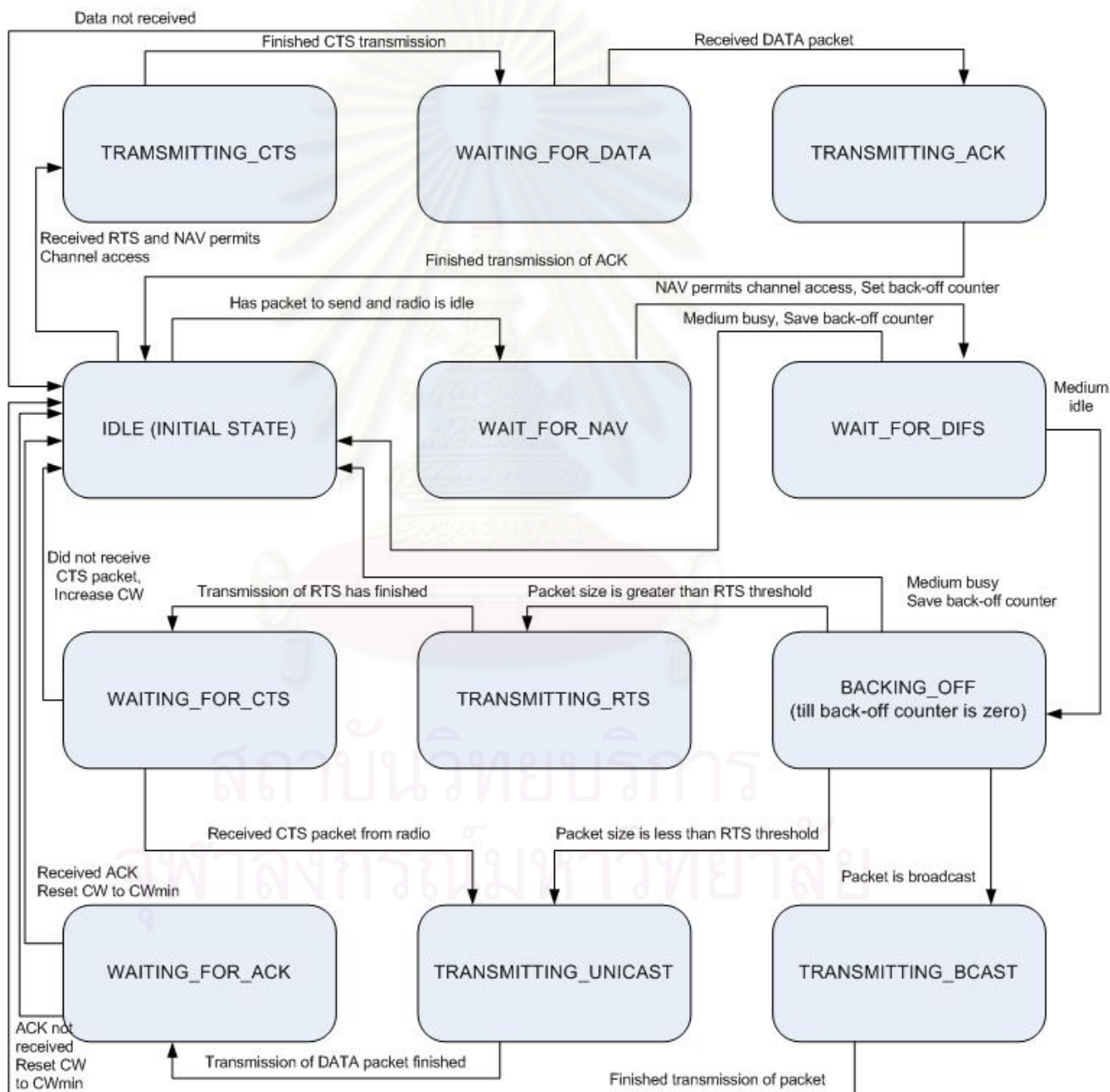
### สเตตแมชชีนในชั้นสื่อสารย่อย MAC

ในรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าการจำลองรูปแบบการทำงานในชั้น MAC เป็น Finite State-Machine และมีการแสดงการเปลี่ยนแต่ละสเตต ซึ่งแน่นอนทีเดียวว่าสเตตแมชชีนนี้เป็นรูปแบบที่เรียบง่าย และทำให้สะดวกกับการเข้าใจกลไกพื้นฐานที่ชั้น MAC ซึ่งการทำงานของ Finite State-Machine จะถูกอธิบายต่อจากนี้

ถ้าโหนดมีแพ็กเก็ตที่ต้องส่งและโหนดนั้นอยู่ในสถานะ IDLE โหนดนี้จะไปยังสถานะ WAIT\_FORNAV หลังจากการส่งข้อมูลของโหนดข้างเคียงมันจบ โหนดนี้จะไปยังสถานะ WAIT\_FOR\_DIFS เมื่อโหนดคอยเวลาของ DIFS จนหมดถ้าส่วนกลางยังไม่มีโหนดใดใช้ โหนดจะเข้าสู่สถานะ BACKING\_OFF แต่ถ้าส่วนกลางไม่ว่างหรือมีโหนดอื่นๆ ทำการส่งข้อมูลอยู่ โหนดจะตั้งค่าตัวนับ back-off ของมัน (ถ้าค่าในตัวนับ Back Off มีค่าเท่ากับศูนย์) และจะกลับไปยังสถานะ IDLE ในระหว่างที่คอย back-off ถ้าโหนดรับรู้ได้ว่าช่องสัญญาณมีการถูกใช้ โหนดจะหยุดค่าของตัวนับ Back Off และไปยังสถานะ IDLE แต่ถ้าช่องสัญญาณว่างตลอดจนค่า Back Off เป็นศูนย์โหนดนี้ก็จะเป็นหนึ่งในสามสถานะถัดไป ซึ่งถ้า แพ็กเก็ตที่จะส่งเป็นชนิดแพ็กเก็ตแพร่สัญญาณโหนดจะไปยังสถานะ TRANSMITTING\_BCAST ซึ่งเป็นสถานะสำหรับส่งแพ็กเก็ตแพร่สัญญาณ กรณีถัดไปคือเป็นแพ็กเก็ตแพร่สัญญาณทางเดียวและมีขนาดความยาวสั้นกว่าขีดเริ่มเปลี่ยน RTS โหนดจะไปยังสถานะ TRANSMITTING\_UNICAST และเริ่มต้นการส่งข้อมูล แต่ถ้าแพ็กเก็ตมีขนาดความยาวยาวกว่าขีดเริ่มเปลี่ยน RTS โหนดจะไปยังสถานะ TRANSMITTING\_RTS และเริ่มต้นการส่งแพ็กเก็ต RTS หลังจากการส่ง RTS เสร็จโหนดจะเข้าไปยังสถานะ WAITING\_FOR\_CTS ถ้าโหนดไม่ได้รับแพ็กเก็ต CTS ภายในเวลาที่กำหนด (Time Out) โหนดจะกลับไปยังสถานะ IDLE และเพิ่มค่า CW อย่างเอ็กซ์โพเนนเชียลซึ่งจะเพิ่มจนถึงค่าสูงสุดนั่นคือ  $CW_{max}$  อย่างไรก็ตามถ้าโหนดได้รับ CTS โหนดจะเข้าไปยังสถานะ TRANSMITTING\_UNICAST และเริ่มต้นการส่งข้อมูล หลังจากการส่งแพ็กเก็ตแพร่สัญญาณทางเดียวเรียบร้อยแล้ว โหนดจะเข้าไปยังสถานะ WAITING\_FOR\_ACK เมื่อโหนดได้รับ ACK ก็จะกลับไปยังสถานะ IDLE และลดค่า CW เป็น  $CW_{min}$

ถ้าโหนดที่เป็นฝั่งรับได้รับแพ็กเก็ต RTS เมื่อมันอยู่ในสถานะ IDLE และถ้าค่า NAV ของมันชี้ว่าไม่มีโหนดข้างเคียงของมันทำการส่งข้อมูลอยู่ โหนดนี้จะเข้าไปยังสถานะ

TRANSMITTING\_CTS และเริ่มต้นการส่งแพ็กเก็ต CTS หลังจากส่งแพ็กเก็ต CTS เสร็จ โหนดจะไปยังสถานะ WAITING\_FOR\_DATA และคอยสำหรับแพ็กเก็ตข้อมูลจากโหนดที่เป็นตัวส่ง เมื่อโหนดได้รับแพ็กเก็ตข้อมูลเรียบร้อยแล้วก็จะไปยังสถานะ TRANSMITTING\_ACK และทำการส่ง ACK เพื่อยืนยันการรับของแพ็กเก็ตข้อมูลนั้น เมื่อการส่ง ACK เสร็จสมบูรณ์ก็จะกลับไปยังสถานะ IDLE แต่ถ้ามันไม่ได้รับแพ็กเก็ตข้อมูลก็จะกลับไปยังสถานะ IDLE ทันที



รูปที่ 2.5 สเตตแมชชีนในชั้นสื่อสารถ้อย MAC [15]

## 2.3 การหาเส้นทางในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแอตฮอก

โปรโตคอลการหาเส้นทางในโครงข่ายแอตฮอกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิด[20] คือ

(1) โปรโตคอลการหาเส้นทางล่วงหน้า (Proactive Routing Protocol) โดยโปรโตคอลชนิดนี้จะทำการหาเส้นทางทันทีที่มีการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมต่อของข่ายเชื่อมโยง ซึ่งข้อดีคือการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลสามารถทำได้ทันทีที่ต้องการจะส่ง ข้อเสียคือจะสูญเสียทรัพยากรในโครงข่ายมากเกินไปในกรณีที่การเปลี่ยนแปลงโทโพโลยีเกิดขึ้นบ่อย

(2) โปรโตคอลการหาเส้นทางเมื่อต้องการส่งข้อมูล (Reactive Routing Protocol) ข้อดีคือไม่สิ้นเปลืองทรัพยากรในการส่งข้อมูล แต่ก็มีข้อเสียคือการส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจะเสียเวลามากเนื่องจากก่อนการส่งข้อมูล โหนดต้นทางต้องทำการหาเส้นทางในการส่งเสียก่อน จึงไม่เหมาะกับแพ็กเก็ตข้อมูลที่เป็นเวลาจริง

อย่างไรก็ดี ในวิทยานิพนธ์นี้ได้้นำโปรโตคอลการเลือกเส้นทางแบบพิจารณาสถานะการเชื่อมต่อ (Link-State Routing Protocol) มาใช้เนื่องจากเป็นโปรโตคอลพื้นฐาน ดังนั้นในส่วนถัดไปจะอธิบายถึงกลไกการทำงานของโปรโตคอลชนิดนี้

### 2.3.1 การเลือกเส้นทางแบบพิจารณาสถานะการเชื่อมต่อ (Link-State Routing Protocol) [16]

ระเบียบวิธีการเลือกเส้นทางแบบ Distance Vector [16] ถูกนำไปใช้ใน ARPANET ตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งใน พ.ศ. 2522 จึงถูกทดแทนโดยระเบียบวิธีแบบพลวัต แบบพิจารณาสถานะการเชื่อมต่อ (Link-State Routing) เนื่องจากเหตุผลสองข้อ คือ ข้อแรก แต่เดิมนั้นสายสื่อสารเกือบทั้งหมดมีความเร็วในการส่งข้อมูลที่ 56 กิโลบิตต่อวินาทีเหมือนกันหมด จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องนำปัจจัยด้านความเร็วเข้าไปพิจารณาด้วย ต่อมา ความเร็วในสายสื่อสารบางส่วนได้เพิ่มขึ้นหลาย 10 เท่า บางส่วนก็เพิ่มเป็นหลาย 100 เท่า ความแตกต่างกันอย่างมากมายนี้ ทำให้ความเร็วกลายเป็นปัจจัยที่สำคัญมากตัวหนึ่ง ข้อสอง ระเบียบวิธีแบบเดิมนั้น ใช้เวลาในการเรียนรู้โครงข่ายนานมากเกินไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าโครงข่ายนั้นมีขนาดใหญ่มาก ดังนั้นระเบียบวิธีแบบพิจารณาสถานะการเชื่อมต่อจึงถูกนำมาใช้แทนแบบเดิม

โดยแต่ละโหนดเมื่อใช้ระเบียบวิธีนี้จะต้อง

1. ทำความรู้จักกับโหนดข้างเคียง และเรียนรู้ที่อยู่บนโครงข่ายของโหนดเหล่านั้น

2. คำนวณระยะเวลารอคอย หรือค่าใช้จ่ายในการติดต่อกับโนดข้างเคียง
3. สร้างแพ็กเก็ตสำหรับส่งข้อมูลที่ตนเองรวบรวมมาได้
4. ส่งแพ็กเก็ตนี้ไปยังโนดทุกตัว
5. คำนวณระยะทางที่สั้นที่สุดสำหรับการติดต่อไปยังแต่ละโนด

ผลที่เกิดขึ้นคือทุกโนดมองเห็นภาพโครงสร้างของโครงข่าย และได้ข้อมูลที่จำเป็นต้องทราบ ขั้นตอนต่อไปจะนำวิธีการ เช่น Dijkstras Algorithm [19] มาใช้ในการคำนวณหาเส้นทางที่สั้นที่สุดต่อไปนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนในการทำงานแต่ละข้อ

### 2.3.2 การทำความรู้จักกับโนดข้างเคียง

โดยสิ่งแรกของกระบวนการคือ เมื่อโนดที่เริ่มเข้าร่วมในโครงข่ายต้องกระทำคือ การทำความรู้จักกับโนดข้างเคียงทั้งหมด ซึ่งทำได้โดยการส่งแพ็กเก็ตทักทาย (Hello Packet) เพื่อขอทราบชื่อของโนดเหล่านั้น ชื่อของโนดที่รวบรวมได้จะถูกนำไปสร้างเป็นรูปจำลองโครงสร้างของโครงข่าย

### 2.3.3 การคำนวณค่าใช้จ่ายของแต่ละเส้นทาง

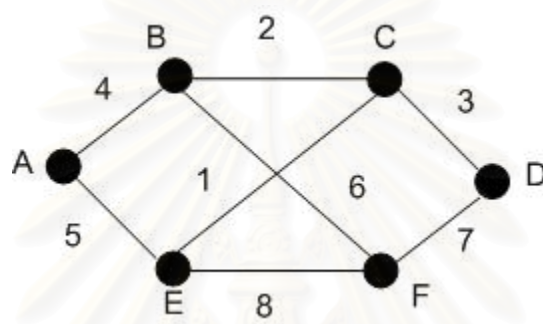
อัลกอริทึมแบบพิจารณาสถานะการเชื่อมต่อกำหนดให้แต่ละโนดจะต้องทราบเวลาการรอคอยสำหรับโนดข้างเคียง หรืออย่างน้อยก็ต้องมีวิธีการประมาณค่าอย่างมีเหตุผล วิธีการที่ให้ผลเที่ยงตรงที่สุดคือ การส่งแพ็กเก็ตสะท้อน (Echo Packet) ที่กำหนดให้โนดผู้รับจะต้องส่งแพ็กเก็ตนี้กลับมาทันทีเพื่อวัดระยะเวลาที่ใช้ในการสื่อสาร ถ้าต้องการผลที่แน่นอนกว่านี้อาจทำการทดสอบหลายครั้งเพื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยมาใช้แทนค่าจริงก็ได้

### 2.3.4 การสร้างแพ็กเก็ตบอกสถานะการเชื่อมต่อ

เมื่อรวบรวมข้อมูลที่ต้องการใช้เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปก็คือ การสร้างแพ็กเก็ตสำหรับบรรจุข้อมูลเหล่านี้ โครงสร้างข้อมูลในแพ็กเก็ตประกอบด้วย 4 ส่วนคือ ชื่อเจ้าของแพ็กเก็ต หมายเลขลำดับของแพ็กเก็ต อายุของแพ็กเก็ต และรายการข้อมูลซึ่งเป็นรายชื่อของโนดข้างเคียงกำกับด้วยเวลาการรอคอยการส่งข้อมูลไปยังโนดตัวนั้น ตัวอย่างในรูปแบบที่ 2.6(ก) แสดงโครงสร้างโครงข่ายที่ระบุเวลาการรอ

คอยกำกับไว้ทุกเส้นเชื่อม ส่วนรูปที่ 2.6(ข) เป็นข้อมูลแสดงสถานะการเชื่อมต่อสำหรับแต่ละโหนดในรูปโครงสร้างที่กล่าวถึงนี้

การสร้างแพ็กเกตบอกสถานะการเชื่อมต่อไม่ใช่เรื่องยาก แต่การกำหนดระยะเวลาว่าเมื่อใดจึงสมควรสร้างแพ็กเกตฯ นั้นเป็นเรื่องยากในทางปฏิบัติ หนทางหนึ่งคือกำหนดช่วงเวลาในการสร้างแพ็กเกตเป็นเวลาคงที่ เช่น สร้างแพ็กเกตใหม่ทุกๆ ชั่วโมง หนทางที่สองคือ กำหนดให้สร้างก็ต่อเมื่อเกิดเหตุการณ์สำคัญบางอย่าง เช่น สายสื่อสารหรือโหนดบางตัวเลิกให้บริการ หรือ เปิดบริการใหม่ หรือ มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติที่สำคัญบางประการ



(ก) ระบบโครงข่ายย่อย

A		B		C		D		E		F	
Seq.		Seq.		Seq.		Seq.		Seq.		Seq.	
Age		Age		Age		Age		Age		Age	
B	4	B	4	B	2	C	3	A	5	B	6
E	5	C	2	D	3	F	7	C	1	D	7
		F	6	E	1			F	8	E	8

(ข) แพ็กเกตบอกสถานะการเชื่อมต่อสำหรับระบบโครงข่ายย่อย

รูปที่ 2.6

### 2.3.5 การกระจายแพ็กเกตบอกสถานะการเชื่อมต่อ

ขั้นตอนที่ยากที่สุดในกระบวนการทำงานของระเบียบวิธี คือการกระจายแพ็กเกตบอกสถานะการเชื่อมต่อไปยังโหนดข้างเคียงให้สมบูรณ์ เมื่อส่งแพ็กเกตเรียบร้อยแล้ว โหนดที่รับสัญญาณได้ก็



จะทำการ ปรับปรุงตารางข้อมูลของตนเอง โดยในดกลุ่มที่ได้รับก่อนก็จะปรับปรุงตารางฯเสร็จก่อน กลุ่มโหนดที่รับข้อมูลช้ากว่า ผลที่ตามมาคือ ทำให้โหนดในระบบแบ่งออกเป็นหลายกลุ่ม ซึ่งมีข้อมูลที่ไม่สอดคล้องกัน เช่น เส้นทางไปยังโหนดบางตัวอาจสูญหาย และอื่นๆ

วิธีแรก ในการส่งแพ็กเก็ตบอกสถานะการเชื่อมต่อไปยังโหนดข้างเคียงคือ ใช้การส่งข้อมูลแบบ ส่งออกไปทุกทิศทาง (Flooding) แต่ละแพ็กเก็ตจะต้องมีหมายเลขลำดับติดไปด้วยเสมอ โหนดทุกตัวจะต้องบันทึกหมายเลขลำดับและหมายเลขโหนดเจ้าของแพ็กเก็ตไว้ในตารางข้อมูลภายในตัวเอง เมื่อรับแพ็กเก็ตใหม่เข้ามาโหนดจะต้องทำการตรวจสอบ เพื่อว่าถ้าเป็นแพ็กเก็ตใหม่ก็จะนำไปปรับปรุงข้อมูลในตารางฯ ของตนเอง และจัดการส่งต่อข้อมูลนั้นๆ ไปยังโหนดอื่น แต่จะลบทิ้งถ้าเป็นของแพ็กเก็ตซ้ำหรือเป็นของเก่า

### 2.3.6 ค่าความระยะทางที่สั้นที่สุดสำหรับการติดต่อไปยังแต่ละโหนด

รูปภาพที่สร้างขึ้นมาแล้ว จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในการส่งข้อมูลไปยังโหนดแต่ละตัวได้ โดยใช้ระเบียบวิธีต่างๆ เช่น อัลกอริทึมของ Dijkstra [19] ผลที่ได้จากการคำนวณจะถูกนำไปเก็บไว้ในตารางนำส่งข้อมูลของตัวโหนดเอง

## 2.4 การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแอตฮอกแบบสถิต

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในอดีต โดยที่โหนดแต่ละโหนดในโครงข่ายแอตฮอกนั้น ไม่มีความสามารถในการเคลื่อนที่ ซึ่งจะแบ่งระเบียบวิธีเป็นสองแบบ ระเบียบวิธีแบบแรกเป็นสมมติให้โหนดในโครงข่ายมีความสามารถในการรู้ถึงตำแหน่งของแต่ละโหนด และแบบที่สองโหนดจะรู้ข้อมูลเพียงโหนดข้างเคียงที่อยู่รอบๆ ตัวมัน

### 2.4.1 การปรับเปลี่ยนพลังงานในการเชื่อมต่อโดยทราบตำแหน่งของโหนด

Topology Control for Multihop Packet Radio Networks [3]

ในระเบียบวิธีที่ [3] ได้เสนอการปรับเปลี่ยนโทโพโลยีซึ่งจุดประสงค์ของระเบียบวิธีนั้น เพื่อเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับโครงข่าย เนื่องจากในโครงข่ายไร้สายนั้นแตกต่างจากโครงข่ายมีสายอย่างยิ่ง โอกาสของการเกิดความเสียหายกับสายเชื่อมโยงนั้นมีมาก ระเบียบวิธีนี้จึงทำการ

ปรับเปลี่ยนโทโพโลยีให้มือน้อยหนึ่งเส้นทางในการส่งข้อมูล เป้าหมายที่สองของระเบียบวิธีนี้ก็เพื่อเพิ่มปริมาณการส่งทราฟฟิคจากปลายจุดหนึ่งถึงปลายอีกจุดหนึ่งให้มีค่ามากที่สุด

ซึ่งในที่นี่ ได้บอกถึงคุณลักษณะที่ดีของโทโพโลยีใน PRN (Packet Radio Networks) เพื่อให้มีประสิทธิภาพ คือ

- แต่ละโหนดควรมีจำนวนของโหนดข้างเคียงพอๆ กัน
- โหนดที่อยู่ใกล้กว่าควรมีระดับความสำคัญที่จะเป็นโหนดข้างเคียงสูงกว่า
- ไม่ควรที่จะทำให้โครงข่ายแฉกแยกแยกออกเป็นสองส่วนหรือหลายส่วน โดยการดึงข่ายเชื่อมโยงออกเพียงสองถึงสามข่ายเชื่อมโยง

โดยได้เสนอระเบียบวิธีโดยขั้นแรกให้กราฟมีการเชื่อมต่อแบบกราฟพลาแนรรูปสามเหลี่ยม เพื่อให้โทโพโลยีมีความทนทาน และขั้นถัดไปจะทำการเพิ่มขนาดมุมในกราฟพลาแนรรูปสามเหลี่ยม (Triangulation Planar Graph) [3] เพื่อให้โครงข่ายสามารถส่งข้อมูลกันได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งการทำขั้นสองจะเป็นได้สามเหลี่ยมเดลอเนย์ (Delaunay Triangulation: DT) [3] และสุดท้ายจึงทำการปรับปรุงกราฟเดลอเนย์เพื่อให้โหนดแต่ละโหนดในโครงข่ายมีจำนวนดีกรี หรือจำนวนข่ายเชื่อมโยงตามต้องการ

โดยหลักการในการทำได้มีการเสนอสองรูปแบบ แบบแรกจะเป็นระเบียบวิธีแบบศูนย์ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

กำหนดค่าสองพารามิเตอร์ หนึ่งคือ  $\Delta$  เป็นจำนวนการเชื่อมต่อสูงสุด และ  $R$  เป็นช่วงระยะการส่งข้อมูลสูงสุด

C1: เริ่มจากสามเหลี่ยมเดลอเนย์

C2: ดึงข่ายเชื่อมโยงใน DT ที่มีความยาวมากกว่า  $R$

C3: เรียงลำดับข่ายเชื่อมโยงใน DT ตามระยะทางจากมากไปน้อยและดึงข่ายเชื่อมโยงที่ทำให้จำนวนข่ายเชื่อมโยงที่แต่ละโหนดมีค่ามากกว่า  $\Delta$

C4: เรียงลำดับข่ายเชื่อมโยงที่ไม่ได้อยู่ใน DT ตามระยะทางจากน้อยไปมากเพิ่มข่ายเชื่อมโยงเข้ามาโดยที่ไม่เกินค่า  $\Delta$

โดยในขั้นตอนของ C1 นั้นก็เพื่อให้โทโพโลยีมีความน่าเชื่อถือ C2 เป็นการพิจารณาถึงข้อจำกัดในชั้นสื่อสารกายภาพ ขั้น C3 เป็นการลดจำนวนของโหนดข้างเคียง และ C4 เป็นการปรับปรุงการเชื่อมต่อของกราฟ ซึ่งการเรียงลำดับข่ายเชื่อมโยงใน C4 นั้นเป็นปัญหาคอขวดของระเบียบวิธีเพราะจำนวนของข่ายเชื่อมโยงที่เป็นไปได้คือ  $O(|V|^2)$  ดังนั้นขอบเขตบนของระเบียบวิธีนี้เป็น  $O(|V|^2 \log|V|)$

รูปแบบที่สองเป็นระเบียบวิธีแบบกระจาย ซึ่งมีสองพารามิเตอร์หลัก เช่นกันคือ  $\Delta$  เป็นจำนวนการเชื่อมต่อสูงสุด และ  $R$  เป็นช่วงระยะเวลาส่งข้อมูลสูงสุด และโนดทั้งหมดที่มีจำนวนข่ายเชื่อมโยงน้อยกว่าหรือเท่ากับ  $\Delta$  เรียกว่าโนด Active

D1: ให้แต่ละโนดแพร่กระจายข้อมูลเพื่อแสดงการอยู่ของตัวเองและโนดข้างเคียงที่ค้นพบโดยใช้พลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุด

D2: แต่ละโนดหา DT (Delaunay Triangulation) ที่อยู่ติดกันภายใน  $R$

D3: แต่ละโนดรักษาข่ายเชื่อมโยงที่สั้นที่สุดจำนวน  $\Delta$  แรก และทำการแจ้งถึงข่ายเชื่อมโยงที่ถูกยกเลิก แล้วข่ายเชื่อมโยงที่ถูกยกเลิกจะถูกยกเลิกโดยโนดข้างเคียงของตัวเอง

D4: แต่ละโนดที่เป็น Active จะทำการเชื่อมกันแบบกระจาย

1. แต่ละโนดที่เป็น Active จะทำการหาโนดข้างเคียงที่เป็น active และส่งแพ็กเก็ตร้องขอสำหรับการเชื่อมต่อ แล้วจึงรอคอยการตอบรับ
2. ถ้าการร้องขอได้รับการเห็นด้วยจากโนดข้างเคียงข่ายเชื่อมโยงนี้จะถูกเพิ่มในโทโพโลยี
3. แต่ละโนดจะปฏิเสธการร้องขอของโนด Active นอกจากการร้องขอนั้นมาจากโนดที่เป็น Active ที่ใกล้ที่สุด
4. กระบวนการนี้จะถูกทำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเป็นไปตามหนึ่งในสองข้อนี้ คือจำนวนของเอดที่อยู่ติดกันมีค่าเป็น  $\Delta$  หรือไม่สามารถหาโนดไหนมาเชื่อมต่อได้แล้ว

ซึ่งวิธีที่นำเสนอทั้งสองนี้สามารถที่จะได้โทโพโลยีที่มีความทนทานต่อการเกิดการเสียหาย และสามารถเพิ่มทรูพุทของระบบได้

#### 2.4.2 การปรับเปลี่ยนพลังงานในการเชื่อมต่อโดยใช้ข้อมูลเฉพาะพื้นที่

Dynamic Power Ajustment Based on the Link Affinity [15]

โครงข่ายไร้สายแบบแอดฮอกส่วนมากจะเกิดความเสียหายของข่ายเชื่อมโยงเนื่องจากการเคลื่อนที่ได้ของโนด ดังนั้นจึงไม่มีเส้นทางในการส่งข้อมูลที่แน่นอน แต่ความเสียหายที่เกิดบ่อยของข่ายเชื่อมโยงทำให้เกิดการลดลงของทรูพุท โดยระเบียบวิธีนี้โปรโตคอลจะเลือกเส้นทางที่มีความน่าจะเป็นในการที่ข่ายเชื่อมโยงจะเกิดการเสียหายที่ต่ำ ซึ่งจะมีพารามิเตอร์ “affinity” เป็นตัว

ตัดสินใจความมั่นคงของเส้นทาง โหนด  $m$  จะทดลองกลุ่มของสัญญาณจากโหนด  $n$  และคำนวณ affinity ( $a_{nm}$ ) ตามสมการที่ (2.1)

$$a_{nm} = \begin{cases} \text{high} \\ \frac{S_{thresh} - S_{nm(current)}}{\delta S_{nm(ave)}} \end{cases} \quad (2.1)$$

ซึ่งสมการนี้หมายความว่าชายเชื่อมโยงจะถูกสมมติว่าขาดออกจากกันระหว่างสองโหนด  $n$  และ  $m$  ถ้าความแรงของสัญญาณ  $S_{nm(current)}$  ต่ำกว่าความแรงสัญญาณขีดเริ่มเปลี่ยน ( $S_{thresh}$ ) โดยที่  $\delta S_{nm(ave)}$  เป็นค่าเฉลี่ยขออัตราการเปลี่ยนความแรงของสัญญาณจากการทดลองสองถึงสามครั้งล่าสุด แต่ละโหนดจะส่งแพ็กเก็ต Hello ถึงโหนดข้างเคียงมัน อย่างเป็นคาบโดยใช้พลังงานที่คงที่ เมื่อโหนดที่รับนั้นได้รับแพ็กเก็ต Hello มันจะคำนวณความแรงสัญญาณของโหนดที่ส่ง ( $S_{t,t+T}$ ) โดยใช้สมการที่ (2.2) ซึ่ง  $T$  เป็นช่วงเวลาระหว่างการมาถึงของแพ็กเก็ต Hello

$$S_{t,t+T} = \begin{cases} S_H - \left\{ \frac{S_H - S_{thresh}}{a} * T \right\} & \text{If moving farther and } T < a \\ S_H & \text{If moving closer and } T < a \\ S_{thresh} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.2)$$

โดยที่  $S_H$  คือความแรงของสัญญาณของแพ็กเก็ต Hello และ  $T$  คือช่วงเวลาของแพ็กเก็ต Hello สองแพ็กเก็ตที่ส่งสำเร็จ และ  $a$  เป็นความผูกพันของชายเชื่อมโยงระหว่างโหนดตัวเองกับโหนดข้างเคียง หลังจากการคำนวณความแรงของสัญญาณโหนดจะปรับเปลี่ยนพลังงานการส่งข้อมูลของตัวเอง โดยพลังงานการส่งข้อมูลใหม่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.3)

$$P_{t,t+T} = P_T * \frac{S_{thresh}}{S_{t,t+T}} \quad (2.3)$$

แต่ละโหนดส่งข้อมูลด้วยพลังงานต่ำสุดที่ซึ่งเป็นในการเชื่อมต่อถึงปลายทาง โดยการปรับเปลี่ยนพลังงานแบบพลวัตนี้สามารถทำเป็นแบบกระจายได้ ซึ่งผู้เสนอได้มีการแสดงว่าระเบียบวิธีนี้สามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 3% - 5%

### กลไกการควบคุมพลังงานแบบกระจาย (Distributed Topology Control Mechanisms)

ในงานวิจัย [7], [15] ได้ทำการเสนอระเบียบวิธีกลไกการควบคุมพลังงานแบบกระจาย ซึ่งแต่ละโหนดในโครงข่ายไร้สายแอดฮอกจะทำการใช้ระเบียบวิธีนี้โดยตัวของมันเองและจะปรับระดับพลังงานที่เหมาะสม โหนดจะทำการเพิ่มพลังงานอย่างมีทิศทางจนกระทั่งมันพบโหนดใดๆ ในแต่ละ

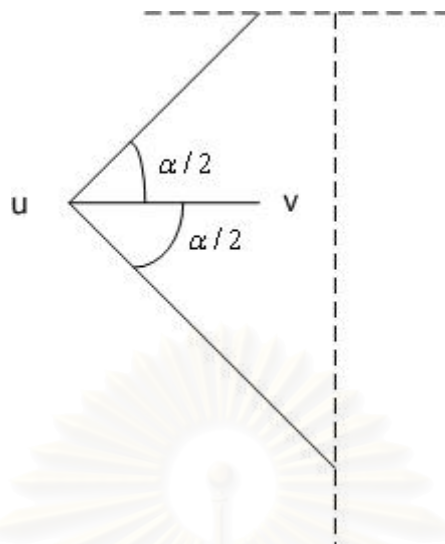
ทิศทาง และจากนั้นมันจะพยายามลดพลังงานลงเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานโดยยังคงมีชายเชื่อมโยงที่เท่ากับการใช้พลังงานตอนแรก

แบบจำลองที่ใช้ในระเบียบวิธีนี้จะเป็นโทโพโลยีรูปโคนบนพื้นผิวสองมิติ ซึ่งแบบจำลองนี้สมมติว่ามีเซต  $V$  ของ  $n$  โหนดในพื้นที่ แต่ละโหนดประกอบด้วย หน่วยความจำ และหน่วยประมวลผล ทุกโหนดสามารถส่งข้อมูลแบบแพร่กระจาย และปรับเปลี่ยนพลังงานระหว่าง  $0 < p < P$  เมื่อ  $p$  เป็นระดับพลังงานการในส่งข้อมูลใดๆ  $P$  เป็นระดับพลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุด เมื่อไรก็ตามที่โหนด  $n$  เริ่มต้นส่งข้อมูลแบบแพร่กระจาย โหนดทั้งหมดที่รับข้อมูลนี้ (เซต  $N$ ) จะส่งการตอบรับกลับ เช่นนั้นแล้วโหนด  $n$  จะทราบถึงโหนดที่รับข้อมูลของมัน (เซต  $N$ ) ไม่เพียงแค่นั้นเมื่อสองโหนด  $u$  และ  $v$  ใดๆมีการแลกเปลี่ยนการแพร่กระจายและการตอบกลับของข้อมูล พวกเขาจะอยู่ในทิศทางของกันและกันซึ่งเป็นระดับของ  $\pi$  ดังนั้นโหนด  $u$  และ  $v$  พลังงานในทิศทาง  $p$  และ  $p + \pi$  ซึ่งเทคนิคนี้เรียกว่า Angle Of Arrival (AOA) ซึ่งใช้คำนวณทิศทางของโหนด โดยระเบียบวิธีนี้มีด้วยกันสองเฟส

ในเฟสแรกเป็นกระบวนการการค้นหาโหนดข้างเคียง โดยใช้ระเบียบวิธีแบบกระจายนี้ที่แต่ละโหนด เพื่อที่จะได้โครงข่ายมีการเชื่อมต่อ โดยการเริ่มต้นจะเริ่มที่ระดับพลังงานต่ำซึ่งใช้ในการส่งข้อมูลแบบแพร่กระจาย โหนดใดก็ตามที่รับข้อมูลจะทำการตอบรับกลับถึงตัวโหนดที่ส่ง โหนดที่ส่งจะเก็บการตอบรับทั้งหมดที่รับกับข้อมูลของทิศทางที่เข้ามา มันจะระบุว่าเมื่อไรก็ตามที่ทิศทางแต่ละโคน  $\alpha$  จะมีโหนดข้างเคียงอย่างน้อยหนึ่งโหนด แต่ละโหนด  $u$  จะเริ่มต้นค่าพลังงานในการส่ง  $p$  ถ้าโหนด  $u$  พบโหนดข้างเคียงใดๆ  $v$  มันจะเพิ่มโหนด  $v$  เข้าไปในกลุ่มโหนดข้างเคียงเฉพาะถิ่น (Local Neighbors Set  $N(u)$ ) โหนดจะทำการเพิ่มพลังงานจนกระทั่งมีอย่างน้อยหนึ่งโหนดถูกพบในแต่ละโคนหรือจนได้พลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุด  $P$  ซึ่งกระบวนการในเฟสนี้จะสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.7 นั่นคือแต่ละโหนดในเซต  $N(u)$  จะอยู่ในหนึ่งโคนสำหรับโหนด  $u$  ใดๆ ถ้าทำการรวมมุมที่  $N(u)$  ครอบคลุมก็จะได้ค่ามากกว่า  $2\pi$  หลังจากนั้นระเบียบวิธีนี้จะเข้าสู่ขั้นที่สอง

ในขั้นที่สองจะเป็นการดึงเข้าเชื่อมโยงที่มากเกินไปออกโดยปราศจากผลกระทบของการเชื่อมต่อที่โหนด และปราศจากการนำเส้นทางที่ใช้พลังงานต่ำสุดออก ถ้าสองโหนด  $v$  และ  $w$  ใดๆ อยู่ในโคนเดียวกันของโหนด  $u$  นั่นคือ  $v, w \in N(u)$  และ  $w \in N(v)$  ดังนั้นโหนด  $w$  จะถูกลบจาก  $N(u)$  ถ้ามันตรงกับสภาพในสมการที่ (2.4) ที่ซึ่ง  $q \geq 1$  และ  $p(u, w)$  เป็นพลังงานที่ต้องการใช้ส่งจากโหนด  $u$  ถึงโหนด  $w$

$$p(u, v) + p(v, w) \leq q \times p(u, w) \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.7 การกำหนดการครอบคลุมของกลไกการควบคุมพลังงานแบบกระจาย

#### CLTC: A Cluster-Based Topology Control Framework for Ad Hoc Networks [8]

[8] ได้เสนอระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนโทโพโลยี  $k$ -Connectivity (มีเส้นทางระหว่างคู่โหนดใดๆ อย่างต่ำ  $k$  เส้นทาง) โดยมีเป้าหมายเพื่อให้โครงข่ายมีความสามารถในการขยายตัวและมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลง เป้าหมายที่สองเพื่อให้โครงข่ายมีโทโพโลยีที่แข็งแกร่งทนทานต่อการเกิดความเสียหาย ซึ่งระเบียบวิธีนี้จะใช้หลักการโดยการแบ่งกลุ่มของโหนดในโครงข่ายก่อน แล้วจึงทำการเชื่อมต่อระหว่างกลุ่มของโหนดแต่ละกลุ่มนั้นซึ่งแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน

##### ขั้นตอนที่ 1 การสร้างกลุ่มโหนด

ในขั้นตอนนี้เป็นการสร้างกลุ่มโหนด และเลือกหัวหน้าของแต่ละกลุ่มเพื่อที่จะเป็นโหนดที่คอยจัดการการตัดสินใจต่างๆในขั้นตอนที่สอง โดยการทำงานของสองขั้นตอนนี้อิสระต่อกัน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้ระเบียบวิธีในการสร้างกลุ่มของโหนดที่ไม่ซ้อนทับและเลือกหัวหน้ากลุ่มไหนก็ได้ ([17], [18])

##### ขั้นตอนที่ 2 การควบคุมโทโพโลยีภายในกลุ่ม

ในขั้นตอนนี้หัวหน้ากลุ่มแต่ละกลุ่มจะคำนวณพลังงานที่ต้องใช้ของแต่ละสมาชิกเพื่อให้โทโพโลยีเป็นไปตามที่ต้องการ ( $k$ -Connectivity) ซึ่งทำการสมมติว่าหัวหน้านั้นรู้ตำแหน่งของสมาชิกภายในกลุ่มตัวเองเช่นนั้นแล้วค่าของพลังงานในการส่งข้อมูลของสมาชิกในกลุ่ม สามารถที่จะหาได้จากระเบียบวิธีแบบศูนย์กลางต่างๆ [5] หลังการคำนวณพลังงานที่ใช้ในการส่งเสร็จแล้วก็จะ

กระจายค่าพลังงานนั้นถึงสมาชิกแต่โหนดเหล่านี้ยังไม่ใช้ค่าพลังงานนี้ทันที เพราะว่าค่าพลังงานนี้อาจไม่เพียงพอกับค่าพลังงานที่ต้องใช้ในขั้นที่สาม เช่นนั้นแล้ว ระหว่างขั้นตอนที่สามทุกโหนดยังใช้พลังงานในการส่งสูงสุดของตัวเอง และหลังจากที่จบขั้นตอนที่สาม ทุกโหนดจึงจะเริ่มต้นใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่คำนวณได้

กลุ่มโหนดที่ไม่สามารถจัดให้มีจำนวนของการเชื่อมต่อเป็น  $k$ -Connected ได้จะเรียกกลุ่มโหนดที่อ่อนแอ (Weak Clusters) และกลุ่มโหนดที่มีการเชื่อมต่อเป็น  $k$ -Connected เรียกกลุ่มโหนดที่แข็งแรง (Strong Clusters)

### ขั้นตอนที่ 3 การควบคุมโทโพลยีระหว่างกลุ่ม

ในขั้นตอนนี้การเชื่อมต่อระหว่างกลุ่มที่อยู่ติดกันจะถูกพิจารณา ซึ่งแบ่งย่อยเป็นสองขั้นตอน ซึ่งขั้นตอนแรกจะพิจารณาเฉพาะกลุ่มโหนดที่แข็งแรง และกลุ่มโหนดที่อ่อนแอจะพิจารณาในขั้นตอนที่สอง

#### ขั้นตอนย่อยที่ 3.1 กลุ่มโหนดแข็งแรงที่อยู่ติดกัน

สำหรับกลุ่มโหนดที่แข็งแรงที่อยู่ติดกัน ขั้นตอนนี้เป็นการตรวจสอบให้แน่ใจว่าจะมีชายเชื่อมโยงจำนวน  $k$  ที่ไม่ซ้อนทับกันระหว่างโหนดสองกลุ่ม โดยการดำเนินการในขั้นตอนนี้ โหนดที่อยู่ขอบของกลุ่มจะทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ต Hello เพื่อหารายชื่อของโหนดอื่นๆที่อยู่คนละกลุ่ม แล้วทำการรายงานถึงหัวหน้ากลุ่ม หลังจากหัวหน้ากลุ่มได้รับรายชื่อของโหนดอื่นที่สามารถเชื่อมถึงโหนดในกลุ่มตัวเองได้ก็จะใช้ระเบียบวิธีในการจับคู่ (Matching Algorithm) เพื่อให้สองกลุ่มมีการเชื่อมต่อกัน  $k$ -Connectivity แล้วจึงนำค่าพลังงานที่คำนวณได้ส่งกลับโหนดที่เป็นสมาชิก

#### ขั้นตอนย่อยที่ 3.2 กลุ่มโหนดอ่อนแอ

แต่ละโหนด  $A$  ในกลุ่มโหนดที่อ่อนแอจะทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ต Hello เพื่อให้แต่ละโหนด  $B$  ที่อยู่ในช่วงระยะเวลาการส่งข้อมูลของ  $A$  ทำการใช้ค่าพลังงานในการเชื่อมต่อเพื่อที่จะเก็บรักษาการเชื่อมต่อเดิมของโหนด  $A$  ในโครงข่าย

หลังจากเสร็จทั้งสามขั้นตอน แต่ละโหนดก็จะใช้ค่าพลังงานในการส่งข้อมูลที่มีค่ามากที่สุดที่ได้จากขั้นตอนที่สอง ขั้นตอนที่ 3.1 และ ขั้นตอนที่ 3.2

## 2.5 การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแอตฮอกแบบพลวัต

ระเบียบวิธีที่การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในส่วนนี้ จะกล่าวในกรณีทีโหนดในโครงข่ายแอตฮอกมีความสามารถในการเคลื่อนที่

### Topology Control of Multihop Wireless Networks using Transmit Power Adjustment [5]

R. ramanathan และ R. Rosales-Hain [5] ได้เสนอระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลแบบกระจายมาสองระเบียบวิธี คือ Local Information No Topology (LINT) และ Local Information Link-State Topology (LILT)

ในวิธี LINT แต่ละโหนดมีสามพารามิเตอร์ จำนวนดีกรีที่ต้องการ (desired node degree)  $d_d$  ขีดเริ่มเปลี่ยนระดับสูงของดีกรีโหนด  $d_h$  ขีดเริ่มเปลี่ยนระดับล่าง  $d_l$  โหนดจะตรวจดูจำนวนโหนดข้างเคียงหรือจำนวนดีกรีของมันในตารางโหนดข้างเคียง ถ้าดีกรีมันสูงกว่า  $d_h$  จะทำการลดค่าพลังงานในการส่งข้อมูลทีลงมา แต่ถ้าดีกรีมันสูงกว่า  $d_l$  โหนดจะเพิ่มพลังงานในการส่งข้อมูล

ในวิธี LILT มีสองส่วนหลักๆ

1. โพรโตคอลการลดจำนวนโหนดข้างเคียง (Neighbor Reduction Protocol: NRP)
2. โพรโตคอลการเพิ่มจำนวนโหนดข้างเคียง (Neighbor Addition Protocol: NAP)

NRP เป็นกลไกซึ่งจะรักษาขนาดของดีกรีของโหนดให้มีค่าเท่ากับค่าที่ถูกตั้งไว้ ส่วน NAP จะทำงานเมื่อโหนดได้รับการปรับเปลี่ยนข้อมูลของการเชื่อมต่อในโครงข่าย (Link-State Update)

เริ่มต้นนั้นทุกโหนดจะใช้ค่าพลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุด และปรับปรุงสถานะของโทโพโลยีทั้งหมดซึ่งโพรโตคอลสองตัวนี้จะถูกกระตุ้นให้ทำงาน เมื่อโหนดแพ็กเกตในการปรับเปลี่ยนการหาเส้นทางก็จะแบ่งเป็นสามสถานะดังนี้ หนึ่งไม่เชื่อมต่อ สองเชื่อมต่อแต่ไม่เป็นสองทิศทาง สามเชื่อมต่อสองทิศทางซึ่งถ้าอยู่ในสถานะที่สามนี้โหนดจะไม่ต้องดำเนินการอะไรต่อ แต่ถ้าโหนดอยู่ในสถานะที่ไม่เชื่อมต่อจะทำการเพิ่มพลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุดเท่าที่เป็นไปได้ และสุดท้ายถ้าโหนดอยู่ในสถานะที่สองคือเชื่อมต่อแต่ไม่เป็นสองทิศทาง โหนดนั้นจะพยายามทำให้การเชื่อมต่อเป็นสองทิศทางโดยการจะหาโหนดที่ถ้าถูกดึงออกแล้วจะแบ่งโครงข่าย (Disconnected Network) แล้วทำการเพิ่มพลังงานในการส่งเพื่อเชื่อมกับโหนดนั้นกลับคืน



### Load-Sensitive Transmission Power Control in Wireless Ad-hoc Network [11]

S.J. Park และ R.Sivakumar [11] ทำการสังเกตว่าถ้าโครงข่ายมีโหนดมากๆ แต่ละโหนดควรใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่สูงเพื่อลดจำนวนครั้งในการส่งข้อมูลและเพิ่มทราฟฟิคของโครงข่าย ในทางกลับกันถ้าโครงข่ายมีโหนดน้อยก็ควรใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่ต่ำเพื่อลดพลังงานที่ใช้ส่งข้อมูลจึงได้ทำการเสนอระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อให้โครงข่ายมีค่าทราฟฟิคที่มากขึ้น ซึ่งการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งนี้จะขึ้นกับปริมาณทราฟฟิคที่เข้ามาในโหนดนั้นๆ ซึ่งใช้ขีดเปลี่ยนระดับสองแบบสำหรับเวลาของการช่วงชิง หนึ่ง  $\alpha$  เป็นขอบเขตล่าง และสอง  $\beta$  เป็นขอบเขตบน

ถ้าโหนดซึ่งมีช่วงเวลากการเข้าชิงสำหรับส่งข้อมูลมากแสดงว่าโหนดนั้นมีข้อมูลที่ต้องส่งมาก ถ้าค่าช่วงเวลากการเข้าชิงสำหรับส่งข้อมูลมากเกินค่าขอบเขตบน  $\beta$  โหนดนี้จะทำการเพิ่มพลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อปรับระดับค่าช่วงเวลากการเข้าชิงสำหรับส่งข้อมูลนี้ให้ลดต่ำลง อย่างไรก็ตามถ้าโหนดที่มีข้อมูลที่ต้องส่งน้อยจนค่าช่วงเวลากการเข้าชิงสำหรับการส่งข้อมูลมีการลดน้อยกว่าค่าขอบเขตล่าง  $\alpha$  โหนดนั้นก็จะทำการลดพลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อปรับระดับค่าขีดนี้ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม

### MobileGrid: Capacity-aware Topology Control in Mobile Ad Hoc Networks [10]

ในงาน [10] ได้นำเสนอการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อให้ระบบมีความสามารถในการส่งข้อมูลสูงสุด โดยค่าพลังงานการส่งข้อมูลที่ปรับนี้จะขึ้นกับจำนวนของโหนดข้างเคียงที่แต่ละโหนด โดยระเบียบวิธีนี้จะมีตัวชี้วัด  $CI$  เป็นตามสมการที่ (2.5)

$$CI = D\pi R^2 = \frac{n\pi R^2}{L^2} \quad (2.5)$$

โดยที่	$D$	เป็นความหนาแน่นของโหนดมีค่าเท่ากับ $n/L^2$
	$n$	เป็นจำนวนโหนดทั้งหมด
	$L^2$	เป็นพื้นที่ที่โหนดเคลื่อนที่
	$R$	เป็นค่าพลังงานในการส่งที่โหนดใช้

โหนดสามารถที่จะตรวจเช็คได้ว่าในแต่ละช่วงเวลาตัวมันเองถึงจำนวนโหนดข้างเคียง  $N$  จากการส่งและรับสัญญาณในชั้นสื่อสาร MAC แล้วนำจำนวนโหนดข้างเคียงที่เวลานั้นมาหาค่า  $CI$  ปัจจุบันโดยได้จากสมการที่ (2.6)

$$N = \frac{n\pi R^2}{L^2} - 1 = CI - 1 \quad \text{หรือ} \quad CI = N + 1 \quad (2.6)$$

แล้วโนดจะพยายามปรับค่าพลังงานในการส่งข้อมูลของมันให้ได้ค่า  $CI$  ซึ่งตรงกับค่า  $CI_{optimal}$  ที่ทำให้โครงข่ายสามารถส่งข้อมูลได้มากที่สุดซึ่งสามารถได้จากการทดลอง โดยการปรับเปลี่ยนจะเป็นตามสมการที่ (2.7)

$$R_{new} = \min \left( \sqrt{\frac{CI_{optimal}}{CI_{current}}} * R_{current}, R_{max} \right) \quad (2.7)$$

## 2.6 ปัญหาที่พบจากงานวิจัยในอดีต

อย่างที่ได้อธิบายมาแล้วว่าระเบียบวิธีที่ผ่านมาสามารถแบ่งในโครงข่ายแอดฮอกแบบสถิติ และแบบพลวัต โดยในแบบสถิติจะเน้นเรื่องการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อที่จะได้รูปแบบการเชื่อมต่อในโครงข่ายนั้น แต่ยังไม่ได้พิจารณาถึงการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งเพื่อให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพสูงสุด (ปริมาณข้อมูลที่สามารถส่งได้ในโครงข่ายมีจำนวนมาก) และในโครงข่ายแบบพลวัตนั้นมุ่งเน้นเพียงให้แต่ละโนดมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงเป็นตามจำนวนที่ต้องการ แต่ไม่ได้พิจารณาถึงกรณีที่โครงข่ายมีการแบ่งแยกเป็นกลุ่มโนด ซึ่งในกรณีนี้กลุ่มโนดที่ถูกแบ่งแยกและอยู่ไกลกับกลุ่มโนดอื่นๆ อาจไม่สามารถทำการเชื่อมต่อได้ (Disconnected Nodes)

## 2.7 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงพื้นฐานของโครงข่ายแอดฮอก โดยมีแบบจำลองการเคลื่อนที่ การส่งข้อมูลในโครงข่ายไร้สาย การหาเส้นทางในโครงข่ายแอดฮอก และงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลทั้งแบบสถิติและพลวัต

### บทที่ 3

#### การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแอตฮอกแบบสถิติที่เสนอ

ในบทที่ผ่านมาได้มีการกล่าวถึงข้อจำเป็นในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายไร้สายแบบแอตฮอก ซึ่งนำไปสู่แนวทางการคิดระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานหลากหลายรูปแบบเพื่อที่จะได้รูปแบบกราฟในหลายรูปแบบ แต่เหล่านั้นก็ยังไม่มีการพิจารณาถึงจำนวนของ แพ็กเก็ตที่สามารถจะส่งได้เมื่อใดในโครงข่ายมีพลังงานจำกัด ในบทนี้จึงได้ทำการเสนอระเบียบวิธีที่จะช่วยในการหาค่าของพลังงานในการส่งข้อมูลที่เหมาะสมของแต่ละโหนด ซึ่งทำให้โครงข่ายยังคงสามารถเชื่อมต่อกันได้อย่างทั่วถึง และสามารถส่งจำนวนแพ็กเก็ตได้เป็นปริมาณที่สูงขึ้น

เนื้อหาในบทที่ 3 นี้จะแบ่งออกเป็นสามส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นระเบียบวิธีที่ใช้ในการจัดรูปแบบของโครงข่ายเพื่อให้โครงข่ายที่ได้มีรูปร่างเป็นต้นไม้ ส่วนที่สองเป็นระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลโดยขึ้นกับพลังงานที่ยังคงเหลืออยู่ในแต่ละโหนดเพื่อที่จะแก้ปัญหาในโครงข่ายแบบต้นไม้และเพิ่มจำนวนแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้ของระบบโดยรวม ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการกล่าวถึงผลการจำลองและสรุป

#### 3.1 ระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนให้เป็นโครงข่ายต้นไม้แบบกระจาย

ระเบียบวิธีที่จะนำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการปรับเปลี่ยนรูปแบบการเชื่อมต่อของโครงข่ายให้เป็นโครงข่ายรูปต้นไม้ที่มีระยะห่างโดยรวมระหว่างโหนดต่ำสุด (Minimum Spanning Tree) เพื่อเป็นการลดพลังงานในการส่งข้อมูล เนื่องจากพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลแปรผันตรงกับระยะทาง  $r^\gamma$  ( $\gamma = [2,4]$ ) ดังนั้นจึงสามารถได้ค่าพลังงานที่สูญเสียตามสมการที่ (3.1)

$$E_{send} = t_{send} \alpha r^2 \quad (3.1)$$

$E_{send}$	การใช้พลังงานสำหรับการส่งข้อมูล (จูล)
$t_{send}$	เวลาของการส่งข้อมูล (วินาที)
$\alpha$	ค่าคงที่ในการส่งข้อมูล (จูล/วินาที.เมตร <sup>2</sup> )
$r$	ระยะทางในการส่งข้อมูล (เมตร)

จะเห็นได้ว่าถ้าใช้พลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อให้ได้ระยะทางไกลๆ จะทำให้พลังงานที่แต่ละโหนดอาจสิ้นเปลืองโดยใช่เหตุ และในส่วนของ การรับข้อมูลนั้นก็ต้องสูญเสียพลังงานในการรับเหมือนกันซึ่งเป็นตามสมการที่ (3.2)

$$E_{rec} = t_{rec} \beta \quad (3.2)$$

$E_{rec}$                       การใช้พลังงานสำหรับการรับข้อมูล (จูล)

$t_{rec}$                       เวลาของการรับข้อมูล (วินาที)

$\beta$                           ค่าคงที่ในการรับข้อมูล (จูล/วินาที)

เพราะฉะนั้นถ้าโหนดส่งพลังงานเป็นช่วงกว้างหรือครอบคลุมพื้นที่มากก็จะทำให้มีหลายโหนดที่อยู่ในพื้นที่นั้นต้องสูญเสียพลังงานในการรับข้อมูล ดังนั้นการปรับเปลี่ยนโครงข่ายให้เป็นรูปต้นไม้จึงสามารถที่จะช่วยลดการสูญเสียพลังงานลงได้ อย่างไรก็ตามวิธีระเบียบวิธีการหาโครงข่ายต้นไม้ได้มีเสนอใน [16] แต่ก็เป็นระเบียบวิธีแบบศูนย์กลางและเนื่องจากโครงข่ายไร้สายแบบแอดฮอกนั้นโหนดแต่ละโหนดจะไม่มีตำแหน่งที่แน่นอน ดังนั้นระเบียบวิธีต่างๆที่จะนำมาใช้นั้นควรจะเป็นระเบียบวิธีแบบกระจายเพื่อที่จะลดผลกระทบที่เกิดจากกระบวนการในระเบียบวิธี ซึ่งระเบียบวิธีนี้มีกระบวนการคร่าวๆ คือโหนดแต่ละโหนดจะหาโหนดข้างเคียงที่จำเป็นต้องเชื่อมต่อเพื่อให้โครงข่ายมีรูปร่างเป็นต้นไม้ โดยที่แต่ละโหนดรู้เพียงข้อมูลส่วนตัว ระเบียบวิธีนี้ทำการสมมติให้แต่ละโหนดสามารถที่จะรู้จำนวนโหนดทั้งหมดในโครงข่าย และโหนดสามารถที่จะคำนวณระยะทางของโหนดข้างเคียงได้โดยอาศัยการคำนวณจากความแรงของสัญญาณที่ทำการส่งซึ่งบรรจุในแพ็กเก็ตที่ส่ง และความแรงของสัญญาณที่รับ ณ ตำแหน่งเริ่มต้น ทุกโหนดต้องสามารถเชื่อมต่อถึงกันได้เมื่อใช้พลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุด

### 3.1.1 พารามิเตอร์และลักษณะของแพ็กเก็ตที่ใช้ในระเบียบวิธีนี้

ส่วนนี้จะเป็นค่าพารามิเตอร์ของระเบียบวิธีที่เสนอที่ใช้ในแต่ละโหนด เพื่อสำหรับเก็บข้อมูล และชนิดของแพ็กเก็ตในระเบียบวิธี

#### 3.1.1.1 พารามิเตอร์

$N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$                       คือ เซตของจำนวนโหนดทั้งหมดในโครงข่ายโดยที่  $n$  เป็นจำนวนโหนดทั้งหมด

$RN_{n,m} = \{1,2,3,\dots,m\}$	(Reached Nodes) คือ เซตของโหนดที่โครงข่ายย่อยสามารถเชื่อมต่อได้เรียบร้อยที่โหนด $n$ ใดๆ และ $m$ เป็นจำนวนโหนดที่สามารถถูกเชื่อมต่อโดยโหนด $n$
$TT_n$	(Tree Table) คือ ตารางแสดงการเชื่อมต่อในโครงข่ายย่อยของโหนด $n$ ใดๆ
$NT_n$	(Neighbor Subnetwork Table) คือ ตารางที่แสดงถึงโหนดที่สามารถเชื่อมต่อได้ในโครงข่ายย่อยอื่นของโหนด $n$ ใดๆ
$SN_{n,p}$	(Sequence Number of CF Packet) คือ ลำดับของการรับแพ็กเก็ต CF ของโหนด $p$ ที่โหนด $n$ ใดๆ

### 3.1.1.2 ชนิดของแพ็กเก็ต

แพ็กเก็ต  $CL$  (constructing link) ประกอบด้วย

$n_S$	: โหนดต้นทาง (Source Node)
$n_R$	: โหนดปลายทาง (Destination Node)
$TT_{n_S}$	: (Tree Table) ตารางการเชื่อมต่อในโครงข่ายย่อยของโหนดต้นทาง
$NT_{n_S}$	: (Neighbor Subnetwork Table) โหนดในโครงข่ายย่อยซึ่งโหนดต้นทางสามารถทำการเชื่อมต่อได้

แพ็กเก็ต  $CF$  (Confirm) ประกอบด้วย

$n_S$	: โหนดต้นทาง (Source Node)
$n_R$	: โหนดปลายทาง (Destination Node)
$TT_{n_S}$	: (Tree Table) ตารางการเชื่อมต่อในโครงข่ายย่อยของโหนดต้นทาง
$NT_{n_S}$	: (Neighbor Subnetwork Table) โหนดในโครงข่ายย่อยซึ่งโหนดต้นทางสามารถทำการเชื่อมต่อได้

Confirm bit : มีค่าเป็น 0 หรือ 1 ถ้าเป็น 1 หมายความว่าสามารถทำการเชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยงระหว่างสองโหนดใดๆได้ แต่ถ้ามีค่าเป็น 0 ข่ายเชื่อมโยงนี้ไม่สามารถทำการเชื่อมต่อได้

$Sqe$  : (Sequence Number of CF Packet) แสดงลำดับก่อน และหลัง  
ของแพ็กเก็ต

แพ็กเก็ตบิตคอน ประกอบด้วย

$n_s$  : โหนดต้นทาง (Source Node)

$WN_{n_s} = \{1,2,3,\dots,i\}$  : เป็นเซตของโหนดที่จำเป็นต้องเชื่อมเพื่อให้ได้  $i$ -Connected  
โดยที่  $i$  เป็นโหนดที่ต้องการจะสร้างข่ายเชื่อมโยง

### 3.1.2 กลไกของระเบียบวิธีการจัดตัวรูปต้นไม้แบบกระจาย

หลักการของระเบียบวิธีนี้จะให้โหนดแต่ละโหนดทำการเชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยงกับโหนดข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดของมันก่อน จากนั้นก็จะทำการเชื่อมข่ายเชื่อมโยงกับโครงข่ายย่อยที่ใกล้ที่สุด และจะกระทำเช่นนี้ไปจนกระทั่งโหนดทั้งโครงข่ายสามารถเชื่อมต่อกันได้ทั้งหมด ซึ่งได้ทำการพิสูจน์ว่าการเชื่อมข่ายเชื่อมโยงที่สั้นที่สุดจนโครงข่ายเชื่อมต่อกันหมด สามารถทำให้ได้กราฟรูปต้นไม้ที่มีค่าราคาการเชื่อมต่อต่ำสุด (ระยะทางระหว่างโหนด) ซึ่งวิธีนี้จะอธิบายโดเนนใช้สเตทแมชชีนในรูปที่ 3.1

ระเบียบวิธีการจะเริ่มต้นโดยทุกโหนดจะถูกจัดเรียงในพื้นที่ของการจำลองแบบสุ่ม ซึ่งในตอนแรกยังไม่มีโหนดใดทำการเชื่อมต่อกันเลยเสมือนมีโครงข่ายย่อย  $n$  โครงข่าย เมื่อ  $n$  เป็นจำนวนโหนดทั้งหมด จากนั้นทุกโหนด  $v$  จะทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตบิตคอน (Beacon) โดยโหนด  $w$  ใดๆ ที่รับแพ็กเก็ตนี้ต้องส่งการตอบรับกลับถึงโหนด  $v$  ซึ่งเป็นผู้ส่ง เมื่อโหนด  $v$  ได้รับการตอบรับจะทำการเก็บโหนด  $w$  ที่ตอบรับไว้ใน  $NT_n$  โดยเรียงตามระยะห่างระหว่างคู่โหนด ซึ่งขณะนี้โหนดจะอยู่สถานะ NORMAL หลังจากรอจนมั่นใจในได้ว่าการตอบรับครบเรียบร้อย โหนดก็จะไปยังสถานะ TRANSMITTING\_CL\_PKT เพื่อทำการส่งแพ็กเก็ต CL (โหนดที่ส่งจะเป็นโหนดที่ใกล้ที่สุดในการเชื่อมต่อของโครงข่ายย่อยอื่นๆ) ถึงโหนดข้างเคียงตัวที่ใกล้ที่สุดเพื่อจะขอสร้างข่ายเชื่อมโยงเมื่อทำการส่งเสร็จก็จะกลับมายังสถานะ NORMAL เพื่อรอรับแพ็กเก็ต CF ซึ่งถือเป็นการตอบรับการร้องขอ เมื่อโหนด  $w$  ใดๆ ได้รับแพ็กเก็ต CL จะทำการตรวจดูว่าข่ายเชื่อมโยงที่ต้องการสร้างนั้นตรงกับโหนดข้างเคียงที่อยู่ในโครงข่ายอื่นที่ใกล้ที่สุดของมันหรือไม่ (โดยเปรียบเทียบจากตาราง  $NT_n$ ) ถ้าตรงกันก็จะไปยังสถานะ UPDATE\_INFORMATION\_OF\_CL\_PKT แล้วทำการปรับปรุงข้อมูล ซึ่งมีขั้นตอนตามสมการที่ (3.3),

$$TT_n = TT_n \cup CL(TT_{n_s}) \quad (3.3)$$

$$NT_n = NT_n \cup CL(NT_{n_s}) \quad (3.4)$$

และทำการหาเซตของ  $RN_{n,m}$  ใหม่โดยใช้การหาแบบ Depth First ในตารางการเชื่อมต่อ  $TT_n$  หลังจากนั้นจึงทำการปรับเปลี่ยนค่า  $NT_n$  ตามสมการที่ (3.5)

$$NT_n = NT_n - RN_{n,m} \quad (3.5)$$

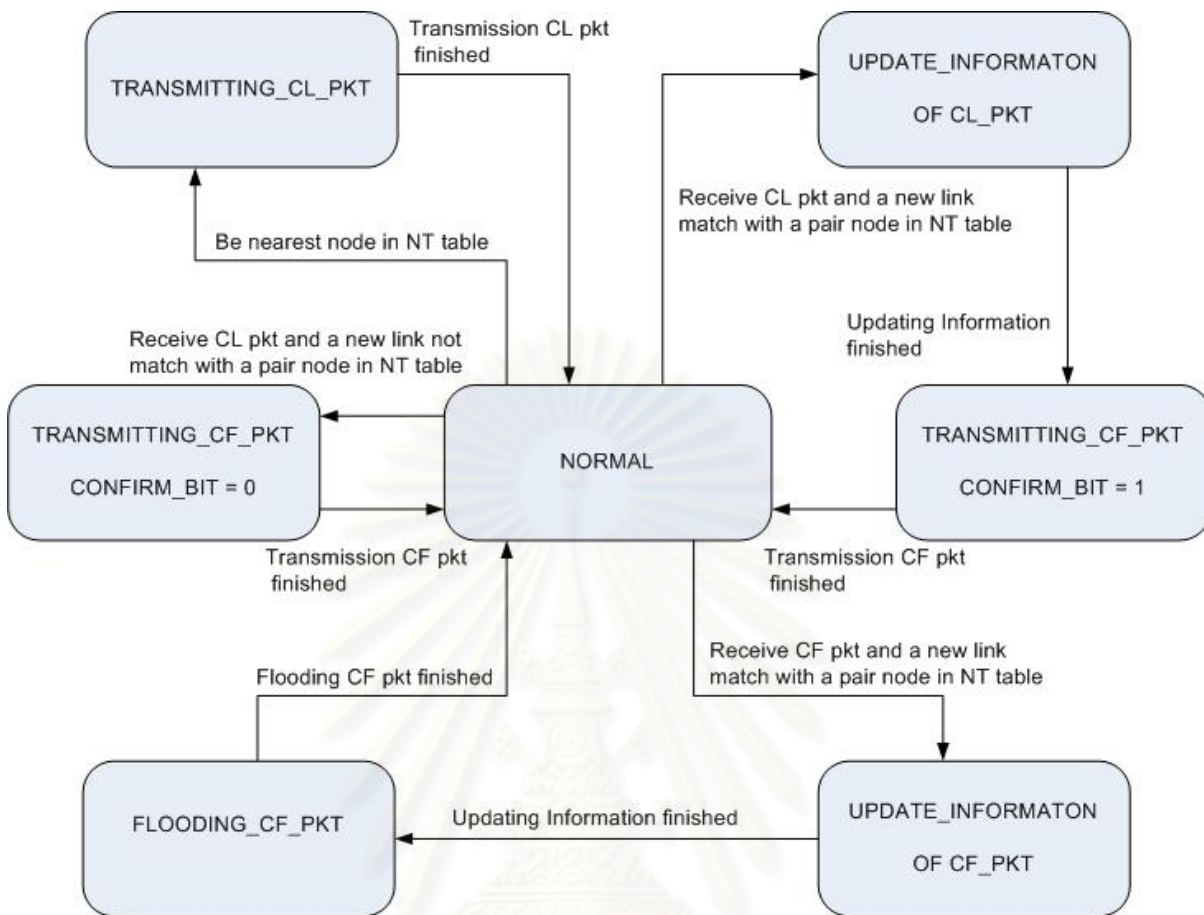
จากนั้นจึงไปยังสถานะ TRANSMITTING\_CF\_PKT (CONFIRM\_BIT = 1) แล้วทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ต CF กับการตั้งค่า confirm bit เป็นหนึ่งเพื่อทำการยืนยันการส่งข้อมูลเชื่อมต่อไปถึงทุกโหนดที่อยู่ในโครงข่ายย่อยเดียวกัน แล้วจึงกลับไปยังสถานะ NORMAL จึงทำการตรวจสอบอีกครั้งว่าเมื่อไรก็ตาม ถ้าตัวมันเองเป็นโหนดที่ใกล้ที่สุดกับโหนดในโครงข่ายย่อยอื่นสถานะจะเปลี่ยนไปยังสถานะ TRANSMITTING\_CL\_PKT และทำการส่งแพ็กเก็ต CL เพื่อทำการขอการส่งข้อมูลเชื่อมต่อ อย่างไรก็ตามถ้าข้อมูลเชื่อมต่อที่ต้องการส่งนั้นไม่ตรงกับโหนดข้างเคียงที่อยู่ในโครงข่ายอื่นที่ใกล้ที่สุดของมันหรือไม่ (โดยดูจากตาราง  $NT_n$ ) สถานะจะเปลี่ยนไปยังสถานะ TRANSMITTING\_CF\_PKT (CONFIRM\_BIT = 0) แล้วทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ต CF กับการตั้งค่า confirm bit ให้เท่ากับศูนย์ เพื่อทำการปฏิเสธการส่งข้อมูลเชื่อมต่อ

เมื่อโหนดได้รับแพ็กเก็ต CF ถ้า confirm bit ในแพ็กเก็ตมีค่าเป็นหนึ่งและข้อมูลเชื่อมต่อที่จะส่งนั้นตรงกับโหนดข้างเคียงที่อยู่ในโครงข่ายอื่นที่ใกล้ที่สุดของมัน สถานะก็จะเปลี่ยนไปยังสถานะ UPDATE\_INFORMATION\_OF\_CF\_PKT แล้วจึงทำการปรับปรุงข้อมูล ซึ่งมีขั้นตอนตามสมการที่ (3.6), (3.7)

$$TT_n = TT_n \cup CF(TT_{n_s}) \quad (3.6)$$

$$NT_n = NT_n \cup CF(NT_{n_s}) \quad (3.7)$$

และทำการหาเซตของ  $RN_{n,m}$  ใหม่โดยใช้การหาแบบ Depth First ในตารางการเชื่อมต่อ  $TT_n$  และทำการปรับปรุงค่า  $NT_n$  ตามสมการที่ (3.5) แล้วเปลี่ยนสถานะไปยังสถานะ FLOODING\_CF\_PKT เพื่อทำการกระจาย (Flooding) แพ็กเก็ต CF ไปยังโหนดอื่นๆในโครงข่ายย่อยเดียวกัน หลังจากนั้นจึงเปลี่ยนสถานะกลับไปยังสถานะ NORMAL อีกครั้งแล้วทำการตรวจสอบลักษณะเดิมว่าเมื่อไรก็ตามถ้าตัวมันเองเป็นโหนดที่ใกล้ที่สุดกับโหนดในโครงข่ายย่อยอื่น สถานะก็จะเปลี่ยนไปยังสถานะ TRANSMITTING\_CL\_PKT และทำการส่งแพ็กเก็ต CL เพื่อทำการขอการส่งข้อมูลเชื่อมต่อ กระบวนการนี้จะดำเนินการไปจนกว่าโหนดในโครงข่ายจะสามารถเชื่อมต่อถึงกันได้ทั้งหมด อีกนัยหนึ่งคือ  $RN_n$  จะเท่ากับจำนวนโหนดทั้งหมดในโครงข่าย



รูปที่ 3.1 สเตทแมชชีนของระเบียบวิธีการสร้างกราฟต้นไม้แบบกระจาย

3.1.3 การปรับเปลี่ยนพลังงานในการเชื่อมต่อเพื่อให้ได้จำนวนข่ายเชื่อมโยงตามต้องการ (*i*-connected)

หลังจากโครงข่ายสามารถเชื่อมต่อกันได้เป็นรูปต้นไม้แล้ว โหนดในโครงข่ายก็จะพยายามหาค่าของพลังงานในการเชื่อมต่อที่จำเป็นต้องใช้เพื่อให้มีจำนวนข่ายเชื่อมโยงตามต้องการ โดยได้จากสมการที่ (3.8)

$$TR_n = \max(TR_{spanning\_tree}, TR_{n,i}) \tag{3.8}$$

โดยที่

$TR_{spanning\_tree}$

คือ พลังงานการส่งข้อมูลอย่างต่ำที่โหนดต้องใช้เพื่อให้โครงข่ายเป็นกราฟต้นไม้



$TR_{n,i}$  คือ พลังงานการส่งข้อมูลอย่างต่ำที่โนด  $n$  ต้องใช้เพื่อให้ตัวเองมีการเชื่อมต่ออย่างต่ำ  $i$  ข่ายเชื่อมโยง

$TR_n$  คือพลังงานอย่างต่ำที่โนด  $n$  ต้องใช้เพื่อให้โครงข่ายเป็นกราฟต้นไม้ และตัวโนดเองมีข่ายเชื่อมโยงอย่างต่ำ  $i$  ข่ายเชื่อมโยง

จากนั้นโนดก็จะส่งแพ็กเก็ตคอนเพื่อแจ้งถึงโนดที่มันจำเป็นต้องทำการเชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยง เมื่อโนดใดๆ ได้รับบีคอนก็จะตรวจดูว่าถ้าเซต  $WN$  ในแพ็กเก็ตคอนนี้มีรายชื่อของตัวเองอยู่ก็จะทำการหาค่าช่วงระยะเวลาส่งใหม่เพื่อที่จะทำให้ข่ายเชื่อมโยงนั้นเป็นการเชื่อมต่อแบบสองทิศทาง (Bi-Directional Link) ซึ่งจะได้ค่าพลังงานในการเชื่อมต่อของโครงข่ายที่โนด  $n$  มีค่าตามสมการที่ (3.9)

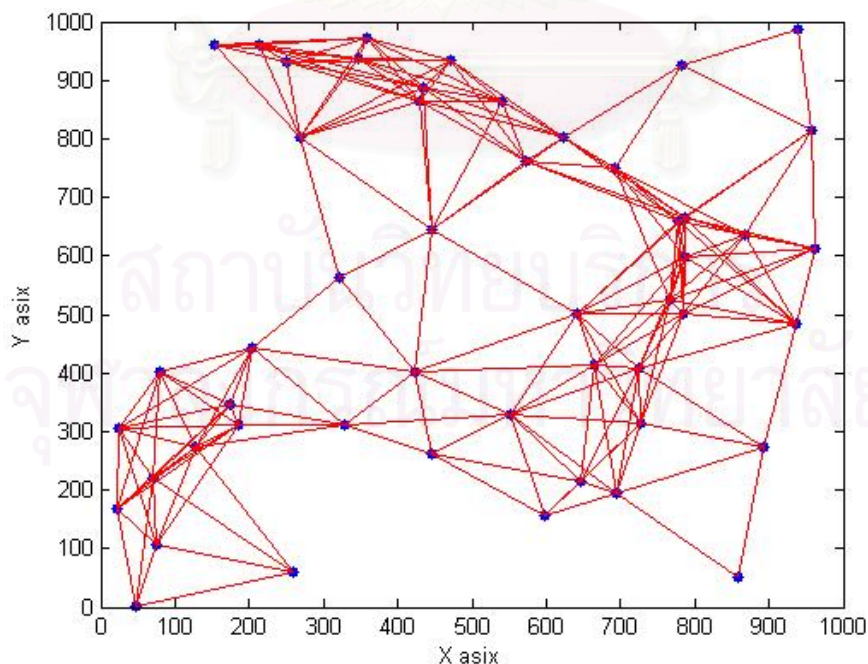
$$TR_{\forall n,i} = \max(TR_n, TR_{beacon}) \quad (3.9)$$

โดยที่

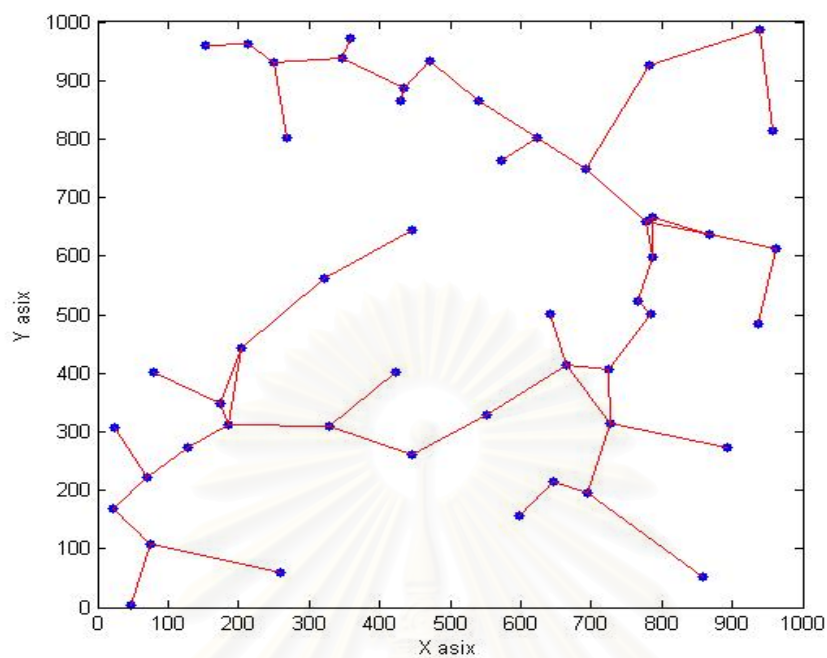
$TR_{\forall n,i}$  คือ พลังงานในการส่งข้อมูลที่โนดต้องใช้เพื่อให้ทุกโนด ( $\forall n$ ) มีข่ายเชื่อมโยงอย่างต่ำ  $i$  ข่ายเชื่อมโยง

$TR_{beacon}$  คือ พลังงานในการส่งข้อมูลที่โนดต้องใช้เพื่อให้โนดที่ส่งบีคอน (Beacon) มีข่ายเชื่อมโยงอย่างต่ำ  $i$  ข่ายเชื่อมโยง

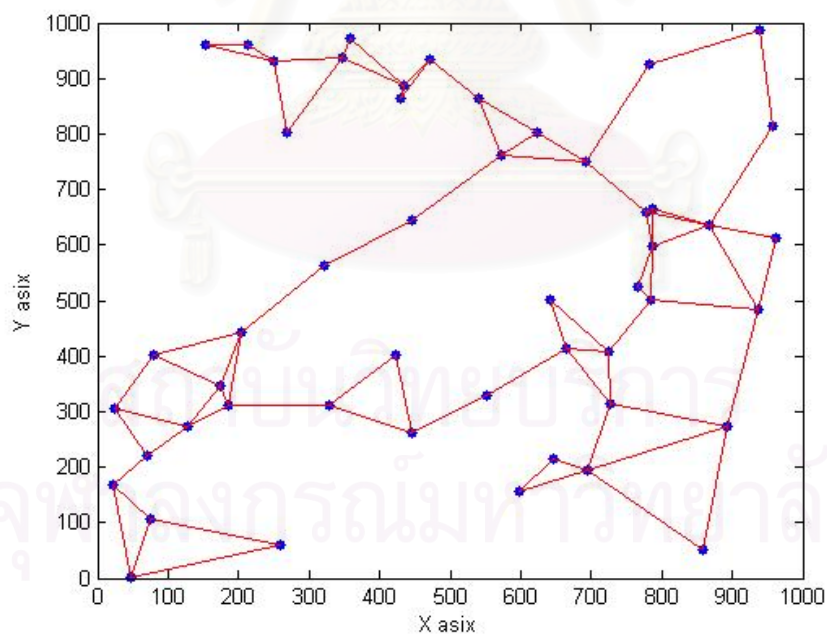
ตัวอย่างของรูปแบบการเชื่อมต่อของโครงข่ายสามารถแสดงได้ดังรูปที่ (3.2-3.5)



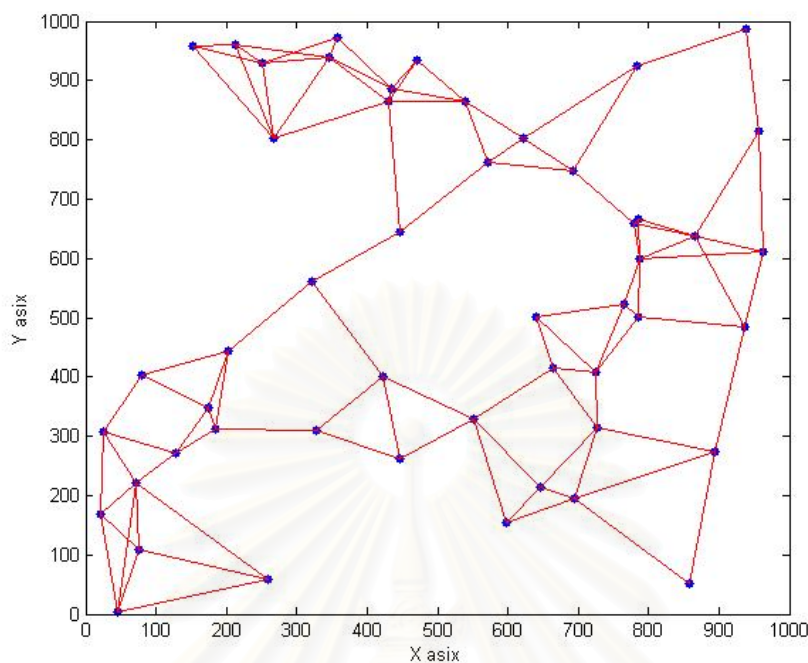
รูปที่ 3.2 การเชื่อมต่อของโครงข่ายโดยทุกโนดใช้พลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุด



รูปที่ 3.3 การเชื่อมต่อของโครงข่ายโดยทุกโหนดใช้ระเบียบวิธีการจัดตัวรูปต้นไม้แบบกระจาย



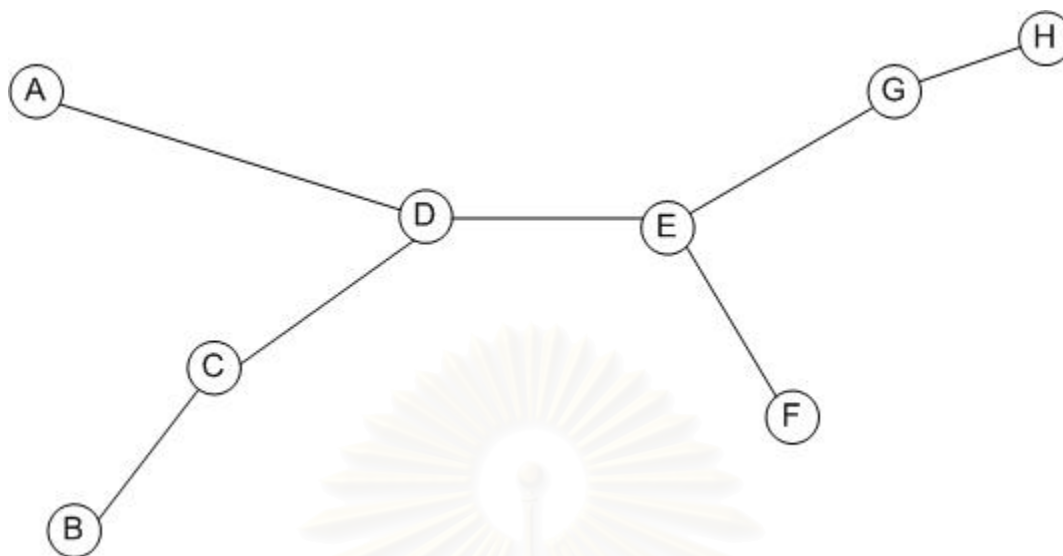
รูปที่ 3.4 การเชื่อมต่อของโครงข่ายโดยทุกโหนดมีการเชื่อมต่อกันทั่วถึงและมีอย่างต่ำ 2 ข่ายเชื่อมโยงที่มีระยะทางโดยรวมต่ำสุด



**รูปที่ 3.5** การเชื่อมต่อของโครงข่ายโดยทุกโหนดมีการเชื่อมต่อกันทั่วถึงและมีอย่างต่ำ 3 ข่ายเชื่อมโยงที่มีระยะทางโดยรวมต่ำสุด

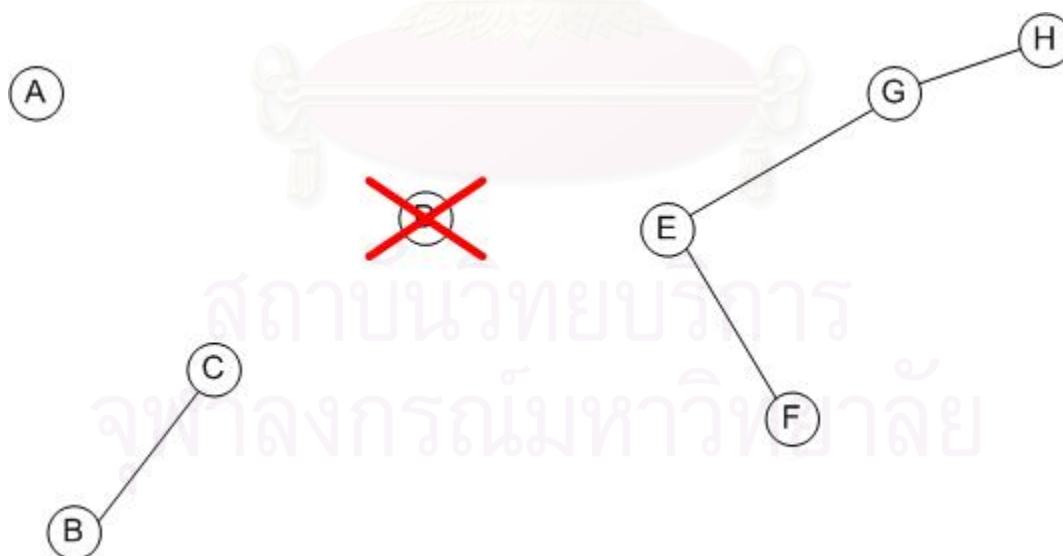
### 3.2 ระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลโดยขึ้นกับพลังงานที่ยังคงเหลืออยู่ในแต่ละโหนด

ระเบียบวิธีในส่วนนี้ถูกนำเสนอขึ้นเพื่อแก้ปัญหาในโครงข่ายต้นไม้ ซึ่งการส่งข้อมูลในโครงข่ายต้นไม้จะทำให้มีบางโหนดที่อยู่ระหว่างกลางของโครงข่าย ต้องแบกรับภาระอย่างมากในการส่งข้อมูลของโหนดอื่นๆ ในโครงข่าย ทำให้โหนดเหล่านี้มีโอกาสที่จะหมดพลังงานเป็นโหนดแรก และผลที่ตามมาคือโครงข่ายจะถูกแบ่งเป็นโครงข่ายย่อย และไม่สามารถส่งข้อมูลกันได้ด้วยอย่างในรูปที่ 3.6 จะเห็นว่าโหนด D หรือโหนด E มีโอกาสที่พลังงานจะหมดก่อนโหนดอื่นเนื่องจากสองโหนดนี้จะเป็นโหนดที่อยู่กลางของโครงข่ายทำให้มีโอกาสอย่างสูงที่จะเป็นโหนดที่ต้องส่งต่อแพ็กเก็ตข้อมูลของโหนดอื่น ซึ่งถ้าโหนดใดโหนดหนึ่งในสองโหนดนี้พลังงานหมด โครงข่ายก็จะเกิดการแบ่งแยกเช่นดังรูปที่ 3.7 ที่เกิดเหตุการณ์ที่โหนด D ใช้พลังงานหมดทำให้โครงข่ายแบ่งออกเป็นสามโครงข่ายย่อย



รูปที่ 3.6 การเชื่อมต่อของโครงข่ายรูปต้นไม้

ดังนั้นระเบียบวิธีนี้เสนอขึ้นมาเพื่อแก้ปัญหานี้ โดยการทำงานของระเบียบวิธีนี้จะทำการแบ่งปริมาณพลังงานของโหนดเป็น  $k$  ส่วน และเมื่อโหนดใดก็ตามใช้พลังงานลดลงที่ละส่วนก็จะทำการหาข่ายเชื่อมโยงใหม่เพื่อเชื่อมแทนที่ข่ายเชื่อมโยงเดิม ในส่วนถัดไปจะเป็นพารามิเตอร์ต่างๆ แยกเกดที่ใช้สื่อสารของระเบียบวิธี จากนั้นจะอธิบายสเตทแมชชีนของระเบียบวิธีดังกล่าว



รูปที่ 3.7 การเชื่อมต่อของโครงข่ายรูปต้นไม้เมื่อมีโหนดใดๆ พลังงานหมด

### 3.2.1 พารามิเตอร์และลักษณะของแพ็กเกตที่ใช้ในระเบียบวิธีนี้

ส่วนนี้จะเป็นค่าพารามิเตอร์ที่โหนดต่างๆต้องมีเพื่อใช้ในระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลโดยขึ้นกับพลังงานที่ยังคงเหลืออยู่ในแต่ละโหนด และแพ็กเกตที่ใช้สำหรับแลกเปลี่ยนข้อมูลในระเบียบวิธีนี้

#### 3.2.1.1 พารามิเตอร์

$CL_{m,n}$	คือ ข่ายเชื่อมโยงที่กำลังทำการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงโดยที่ $m, n$ เป็นคู่โหนดของข่ายเชื่อมโยงนั้น (CL: Considered Link)
$NL_{m,n}$	คือ ข่ายเชื่อมโยงใหม่ที่ทำการเชื่อมต่อโดยที่ $m, n$ เป็นคู่โหนดของข่ายเชื่อมโยงนั้น (NL: New Link)
$TE_{m,n}$	คือ เวลาที่ถูกระมาณของการใช้พลังงานในการเชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยงใดๆ (TE: Time of Energy consumption)
$Seq_n$	คือ ลำดับบอกถึงลำดับก่อน และหลังของแพ็กเกตที่ใช้ในการปรับปรุงการเชื่อมต่อของโครงข่ายเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหนด $n$ (Seq: Sequence Number of Packet)

#### 3.2.1.2 ชนิดของแพ็กเกต

แพ็กเกต *HELP* ประกอบด้วย

$n_S$	: โหนดต้นทาง (Source Node)
$n_R$	: โหนดปลายทาง (Destination Node)
$CL_{m,n}$	: ข่ายเชื่อมโยงที่กำลังทำการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงโดยที่ $m, n$ เป็นคู่โหนดของข่ายเชื่อมโยงนั้น (CL: Considered Link)
$TE_{m,n}$	: เวลาที่ถูกระมาณของการใช้พลังงานในการเชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยง $m, n$ (TE: Time of Energy consumption)

แพ็กเกต *FIND* ประกอบด้วย

$n_S$	: โหนดต้นทาง (Source Node)
-------	----------------------------

- $CL_{m,n}$  : ข่ายเชื่อมโยงที่กำลังทำการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงโดย  
ที่  $m, n$  เป็นคู่โหนดของข่ายเชื่อมโยงนั้น (CL: Considered Link)
- $TE_{m,n}$  : เวลาที่ถูกประมาณของการใช้พลังงานในแพ็กเกต (TE: Time of  
Energy consumption)

แพ็กเกต VOL (Volunteer) ประกอบด้วย

- $n_S$  : โหนดต้นทาง (Source Node)
- $n_R$  : โหนดปลายทาง (Destination Node)
- $CL_{m,n}$  : ข่ายเชื่อมโยงที่กำลังทำการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงโดย  
ที่  $m, n$  เป็นคู่โหนดของข่ายเชื่อมโยงนั้น (CL: Considered Link)
- $TE_{m,n}$  : เวลาที่ถูกประมาณของการใช้พลังงาน ในการเชื่อมต่อข่าย  
เชื่อมโยง โดยที่  $m, n$  เป็นคู่โหนดของข่ายเชื่อมโยงนั้นในแพ็กเกต  
(TE: Time of Energy consumption)

แพ็กเกต ACK ประกอบด้วย

- $n_S$  : โหนดต้นทาง (Source Node)
- $n_{SW}$  : โหนดที่ทำการเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยง (SW: Switched Node)
- $CL_{m,n}$  : ข่ายเชื่อมโยงที่กำลังทำการพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลง โดย  
ที่  $m, n$  เป็นคู่โหนดของข่ายเชื่อมโยงนั้น (CL: Considered Link)

แพ็กเกต TLS (Tree Link-State) ประกอบด้วย

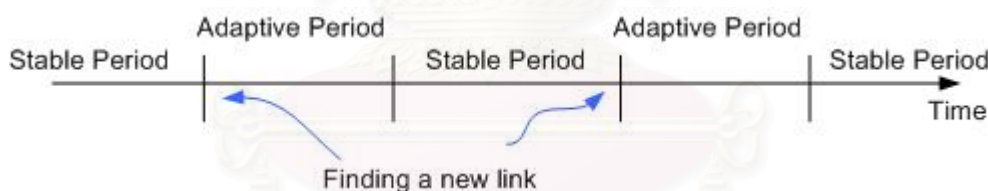
- $n_S$  : โหนดต้นทาง (Source Node)
- $L_S$  : สถานะการเชื่อมต่อโครงข่ายต้นไม้มือของโหนดต้นทาง (L: Link Status  
of Source)

### 3.2.2 กลไกของระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลโดยขึ้นกับพลังงานที่ยังคงเหลืออยู่ในแต่ละโนด

ระเบียบวิธีนี้จะแบ่งพลังงานของโนดเป็น  $k$  ส่วนที่เท่ากันดังรูปที่ 3.8 เมื่อโนด  $u$  ใช้พลังงานหมดไปหนึ่งระดับ มันจะทำการส่งแพ็กเก็ต *Help* เพื่อไปทำการร้องขอถึงโนด  $v$  ที่เชื่อมต่อกับข่ายเชื่อมโยงที่มีระยะทางไกลที่สุดของตัวมันเอง เพื่อที่จะทำการตัดขาดการเชื่อมต่อ เมื่อโนด  $v$  ได้รับแพ็กเก็ต *Help* ก็ส่งแพ็กเก็ต *Find* เพื่อหาโนดอื่นที่สามารถเชื่อมโครงข่ายแทนโนด  $u$  ได้ โดยช่วงเวลานี้จะเป็นช่วงการปรับโทโพโลยี (Adaptive Period) แสดงดังรูปที่ 3.9 ซึ่งโนดที่ทำการหาโนดนั้นจะใช้ค่าพลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุด และโนดที่รับแพ็กเก็ต *Find* ก็จะใช้ค่าพลังงานสูงสุดในช่วงนี้ด้วย ซึ่งกระบวนการจะอธิบายอย่างละเอียดโดยสเตทแมชชีนแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.8 การแบ่งพลังงานเป็น  $k$  ส่วน

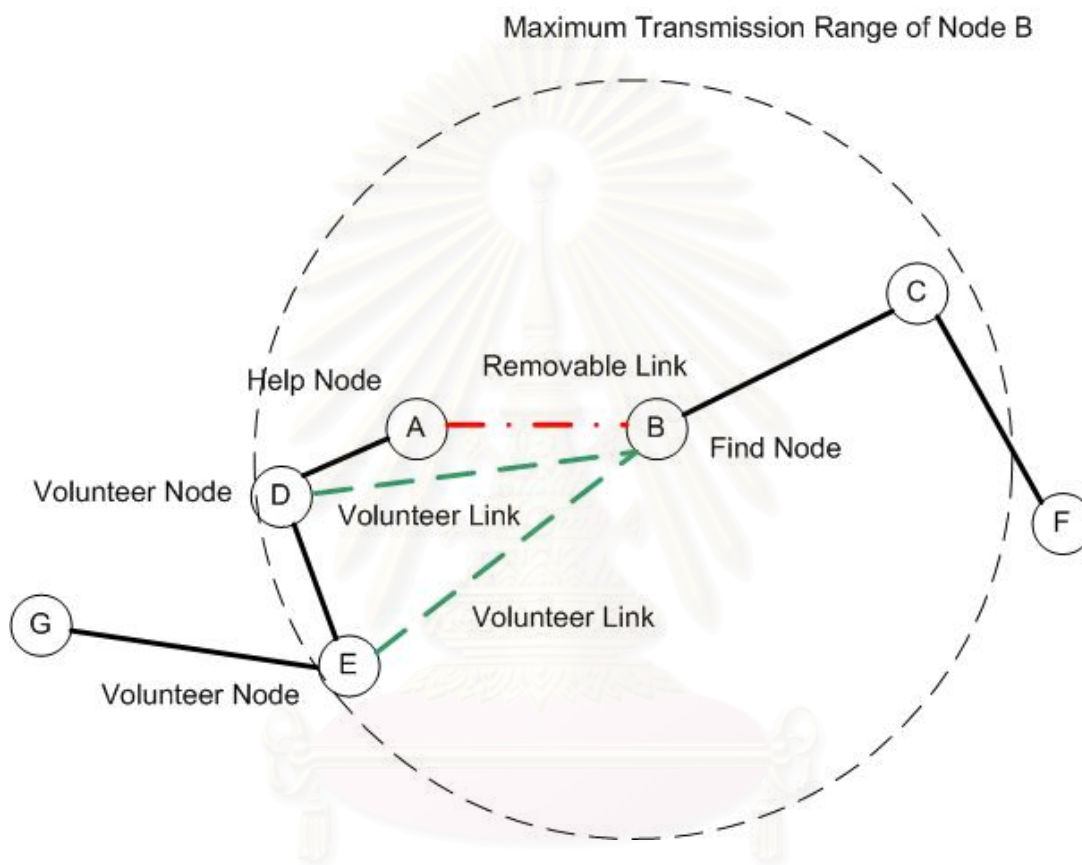


รูปที่ 3.9 ช่วงเวลาการทำงานของระเบียบวิธี

โนดจะถูกแบ่งออกเป็นสามประเภท ได้แก่

- (1) โหนดที่ร้องขอการเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยง (Help Node) เป็นโนดที่หลังจากพลังงานลดลงแล้วต้องการทำการตัดข่ายเชื่อมโยงที่ยาวที่สุด
- (2) โหนดที่ทำการหาข่ายเชื่อมโยงใหม่ (Find Node) เป็นโนดที่ทำหน้าที่หาโนดอื่นมาทดแทนข่ายเชื่อมโยงที่จะทำการเปลี่ยน
- (3) โหนดอาสาเป็นตัวช่วยข่ายเชื่อมโยง (Volunteer Node) เป็นโนดที่ส่งแพ็กเก็ต VOL ซึ่งสามารถทำหน้าที่เชื่อมข่ายเชื่อมโยงแทนโนดที่ร้องขอการเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยงได้

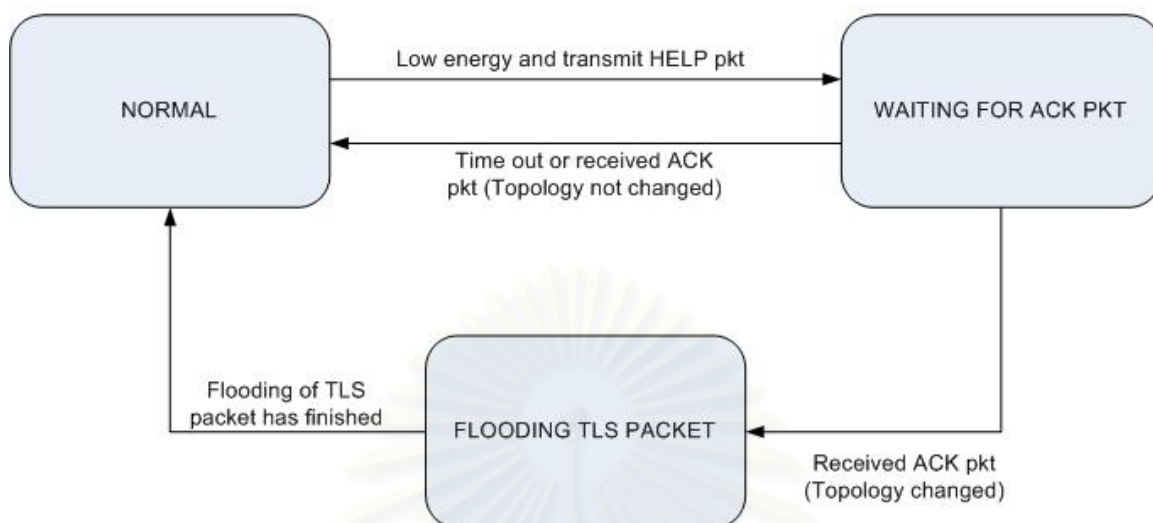
ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.10 ได้แสดงโหนดทั้งสามชนิด โหนด A ต้องการจะตัดสายเชื่อมต่อ (Removable Link) ระหว่างโหนด B ดังนั้นโหนด B ต้องทำหน้าที่หาโหนดอื่นเป็นตัวเชื่อมต่อแทน จึงใช้ค่าพลังงานในการส่งสูงสุดเพื่อหาสายเชื่อมต่อใหม่ ซึ่งก็คือโหนด D หรือ โหนด E ที่อยู่อีกฝั่งของโครงข่ายรูปต้นไม้



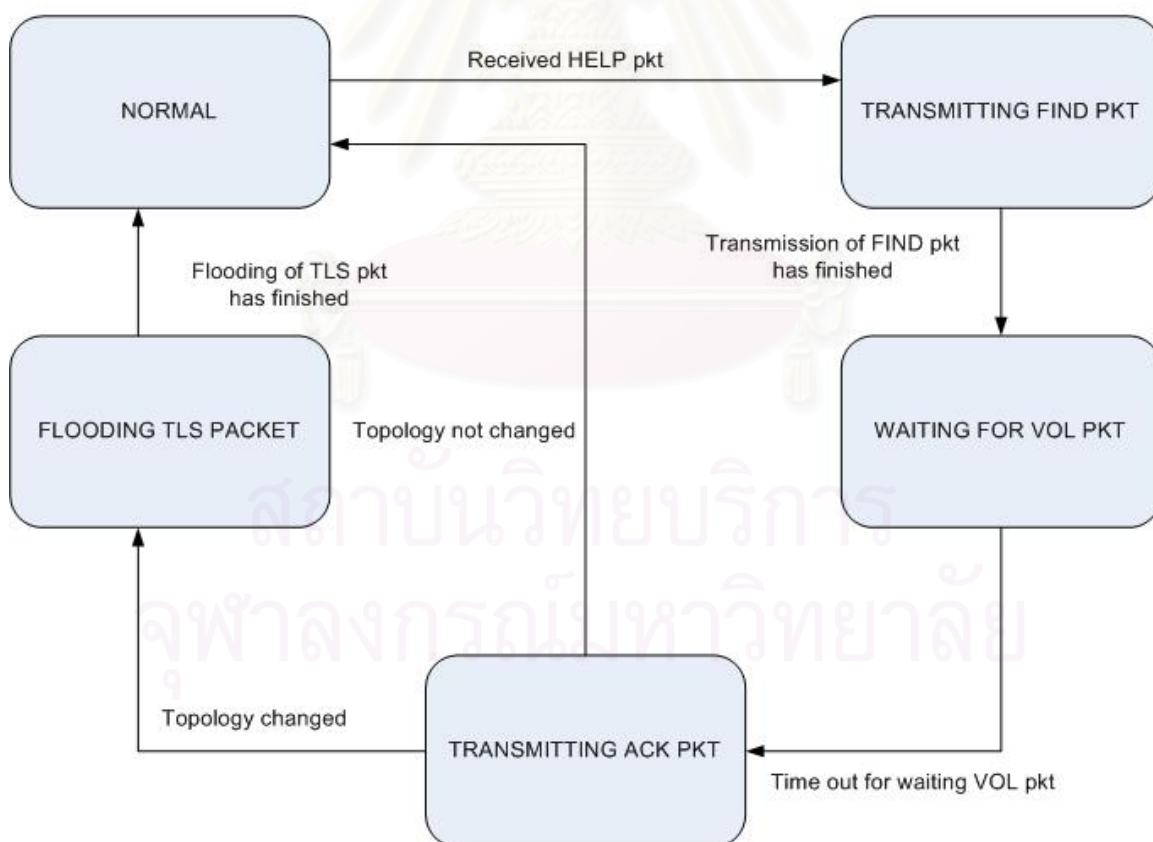
รูปที่ 3.10 ชนิดของโหนดในระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนสายเชื่อมต่อขณะใช้งาน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

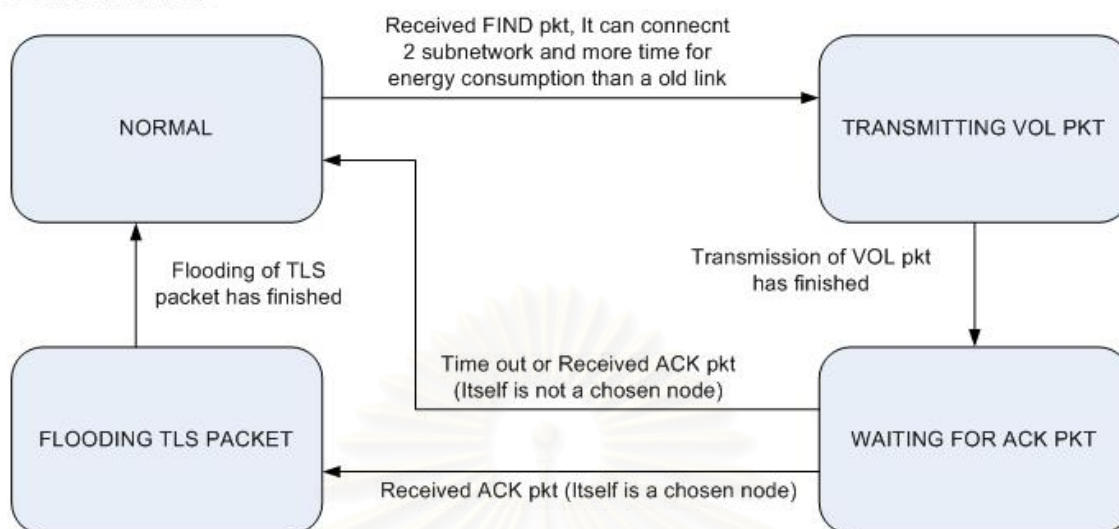


**HELP Node**

(ก) สแตตแมชชีนของโหนดที่ต้องการขอเปลี่ยนข่ายเชื่อมต่อ (Help Node)

**FIND Node**

(ข) สแตตแมชชีนของโหนดที่ทำการหาข่ายเชื่อมต่อใหม่ (Find Node)

**VOLUNTEER Node**

(ค) สเตตแมชชีนของโหนดที่สามารถทำการเชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยงแทนได้ (Volunteer Node)

รูปที่ 3.11 สเตตแมชชีนของระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยงขณะใช้งาน

ในรูปที่ 3.11(ก) เมื่อโหนด *HELP* มีพลังงานลดลงหนึ่งระดับก็จะทำการคำนวณระยะเวลาที่สามารถเชื่อมต่อได้โดยใช้สมการที่ (3.10) และส่งแพ็กเกต *HELP* ไปหาโหนดที่เชื่อมข่ายเชื่อมโยงที่มีระยะทางไกลที่สุดของมัน และสถานะจะเปลี่ยนไปยังสถานะ *WAITING FOR ACK PKT* จะรอจนได้รับแพ็กเกต *ACK* หรือ *Time out* หลังจากได้รับแพ็กเกต *ACK* ก็จะตรวจดูว่าโหนดใหม่ที่จะเป็นเชื่อมต่อเพื่อสร้างข่ายเชื่อมโยง  $ACK(n_{sw})$  ตรงกับตัวมันเองหรือไม่ ถ้าตรงก็แสดงว่าไม่มีโหนดอื่นที่สามารถเชื่อมต่อแทนได้ก็เปลี่ยนสถานะไปยังสถานะ *NORMAL* แต่ถ้าไม่ตรงแสดงว่ามีโหนดอื่นที่สามารถเชื่อมต่อแทนได้ มันก็จะทำการตัดข่ายเชื่อมโยงที่ระยะทางไกลที่สุดออก แล้วไปยังสถานะ *FLOODING TLS PACKET* เพื่อส่งแล้วแพ็กเกต *TLS* แจ้งสถานะของการเชื่อมต่อถึงโหนดอื่นๆ

$$t_{remain} = \frac{E_{remain}}{\alpha r_{considered\_link}^2} \quad (3.10)$$

โดยที่

$E_{remain}$

เป็นพลังงานที่ยังเหลืออยู่ที่โหนด (จูล)

$\alpha$

ค่าคงที่ (จูล/วินาที.เมตร<sup>2</sup>)

$r_{considered\_link}$

ระยะทางของข่ายเชื่อมโยงที่กำลังพิจารณาที่สุด (ม.)

$t_{remain}$

เวลาที่ยังคงเหลืออยู่ในการส่งข้อมูลที่ข่ายเชื่อมโยงนั้น (วินาที)

เมื่อโหนด FIND ได้รับแพ็กเก็ต HELP ถ้าตัวมันเองอยู่สถานะ NORMAL ก็จะทำ การแพร่กระจายแพ็กเก็ต FIND เพื่อหาโหนดอื่นที่สามารถเชื่อมต่อได้ และเปลี่ยนสถานะไปยังสถานะ WAITING FOR VOL PKT ที่สถานะนี้โหนดจะทำการคอยการตอบรับจากโหนดอื่นที่ส่งแพ็กเก็ต VOL แล้วทำการเลือกโหนดที่มีช่วงระยะเวลาในการเชื่อมต่อสูงสุดเพื่อแจ้งโหนดนั้นถึงการเชื่อมต่อ หลังจาก คอยจนแน่ใจว่าไม่มีโหนดไหนส่งแพ็กเก็ต VOL มาแล้ว จึงทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ต ACK จึงออก จากสถานะนี้ โดยถ้าโทโพโลยีของโครงข่ายเปลี่ยนแปลง จะทำการตัดการเชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยงเก่า แล้วทำการเชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยงใหม่ หลังจากนั้นจึงปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการส่งข้อมูลแล้วไปยัง สถานะ FLOODING TLS PACKET ส่งแพ็กเก็ต TLS เพื่อแจ้งสถานะของการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมต่อ ถึงโหนดอื่นๆ แต่ถ้าโทโพโลยีไม่เปลี่ยนแปลงก็จะกลับไปยังสถานะ NORMAL ทันที ดังรูปที่ 3.11(ข)

โหนดที่รับแพ็กเก็ต FIND และอยู่สถานะ NORMAL จะทำการตรวจเช็ค 2 ขั้นตอน

(1) ถ้าตัดข่ายเชื่อมโยงที่กำลังพิจารณาโหนดนั้นต้องสามารถทำให้โทโพโลยีของ โครงข่ายเชื่อมต่อได้

(2) พลังงานที่เหลืออยู่ต้องสามารถเชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยงได้ระยะเวลา นานกว่าเวลา ในการเชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยงของโหนดเดิมโดยคำนวณจากสมการที่ (3.10)

ซึ่งถ้าผ่านทั้งสองเงื่อนไขดังกล่าวนี้แล้วโหนดจะเปลี่ยนไปยังสถานะ TRANSMITTING VOL PKT แล้วทำการส่งแพ็กเก็ต VOL เพื่ออาสาทำการเชื่อมต่อ หลังจากนั้นจึงไปยังสถานะ WAITING FOR ACK PKT เมื่อได้รับแพ็กเก็ต ACK และโหนดที่เป็นตัวเชื่อมต่อโทโพโลยีใหม่คือตัวมัน เองก็จะทำการเชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยง และหลังจากนั้นจึงปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการส่งข้อมูลแล้วไป ยังสถานะ FLOODING TLS PACKET ส่งแพ็กเก็ต TLS เพื่อแจ้งสถานะของการเชื่อมต่อถึงโหนดอื่นๆ แล้วจึงกลับไปยังสถานะ NORMAL แต่ถ้าตัวมันเองไม่ใช่โหนดที่ถูกเลือกเพื่อทำการเชื่อมต่อหรือหมดค่า เวลาที่ตั้งไว้ก็จะกลับไปยังสถานะ NORMAL ทันที ดังรูปที่ 3.11(ค)

### 3.3 การจำลองเทคนิคการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลที่นำเสนอ

ในส่วนนี้จะทำการจำลองระเบียบวิธีที่ได้ทำการเสนอมา เพื่อทำการเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพกับการที่โครงข่ายไม่มีการใช้การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล ส่วนแรกจะกล่าวถึง สถานะแวดล้อมพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง และส่วนที่สองจะทำการแสดงและวิเคราะห์ผล การทดลอง

### 3.3.1 สภาวะแวดล้อมของการจำลอง

การจำลองนี้เขียนโดยใช้โปรแกรม C++ ซึ่งเป็นการจำลองชนิดเหตุการณ์เต็มหน่วย (Discrete Event Simulation) ในส่วนของชั้นโครงข่ายสื่อสารย่อย MAC จะใช้มาตรฐาน IEEE 802.11b แต่ละโหนด มีพลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุดได้ไกลถึง 250 ม. ทุกโหนดสามารถเป็นตัวกำเนิดแพ็กเก็ตข้อมูลได้ โดยมีช่วงระยะเวลาการเข้ามาของแพ็กเก็ตโดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.25 วินาทีต่อแพ็กเก็ต ให้ทุกโหนดมีพลังงานเริ่มต้นที่  $5 \times 10^5$  การจำลองจะรันจนกระทั่งมีโหนดใดโหนดหนึ่งที่พลังงานหมดลงซึ่งหมายความว่าโหนดนั้นขาดการเชื่อมต่อหรือโครงข่ายถูกตัดขาด (Disconnected) การจำลองนี้จะแบ่งเป็นสองส่วน

(1) ปรับเปลี่ยนจำนวนโหนดในโครงข่ายเพื่อดูประสิทธิภาพของระเบียบวิธีที่นำเสนอ เมื่อโครงข่ายมีการขยายตัว โดยจะใช้จำนวนโหนดตั้งแต่ 30 โหนด ถึง 70 โหนด ทำการสุ่มตำแหน่งในพื้นที่  $1000 \times 1000$  ตร.ม.

(2) ปรับเปลี่ยนขนาดของพื้นที่จำลอง โดยมีขนาดตั้งแต่ 5000 ตร.ม.ต่อโหนด จนถึง 30000 ตร.ม.ต่อโหนด และมีจำนวนของโหนดเท่ากับ 50 โหนด เพื่อสังเกตถึงผลกระทบจากโครงข่ายที่มีการเชื่อมต่อที่หนาแน่น และโครงข่ายที่มีการเชื่อมต่อที่เบาบาง

#### พารามิเตอร์ที่ใช้ในการบอกประสิทธิภาพ

- จำนวนของแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้ (Successfully Delivered Packet) เป็นจำนวนของแพ็กเก็ตที่โหนดต้นทางสามารถส่งถึงโหนดปลายทางได้ ภายในช่วงระยะเวลาของการจำลอง
- จำนวนของแพ็กเก็ตที่เกิดการสูญเสียในชั้นโครงข่ายสื่อสารย่อย MAC (Collided Packet) เป็นจำนวนของแพ็กเก็ตที่เกิดจากการทิ้ง (Drop) เนื่องจากการหมดเวลาของการพยายามส่ง (Retransmission Timeout) หรือเกิดจากการที่โหนดที่ส่งไม่ได้รับการตอบรับของการส่ง (Acknowledgment)
- ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยของแพ็กเก็ต (Delay Time) เป็นเวลาเฉลี่ยในการส่งแพ็กเก็ตหนึ่งแพ็กเก็ต
- จำนวนฮอปต่อแพ็กเก็ต (Average Number of Hop/Packet) เป็นจำนวนของฮอปเฉลี่ยที่แต่ละแพ็กเก็ตใช้เดินทาง

- พลังงานที่ใช้ต่อการส่งหนึ่งแพ็กเก็ต (Energy/Packet) เป็นค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตหนึ่งแพ็กเก็ต
- ช่วงเวลาของโครงข่าย (Life Time of Network) เป็นเวลาที่ทั้งหมดตั้งแต่เริ่มจำลองจนถึงมีโหนดใดโหนดหนึ่งในโครงข่ายพลังงานหมด

### 3.3.2 ผลการจำลองและการวิเคราะห์

#### 3.3.2.1 ปรับเปลี่ยนจำนวนของโหนดในโครงข่าย

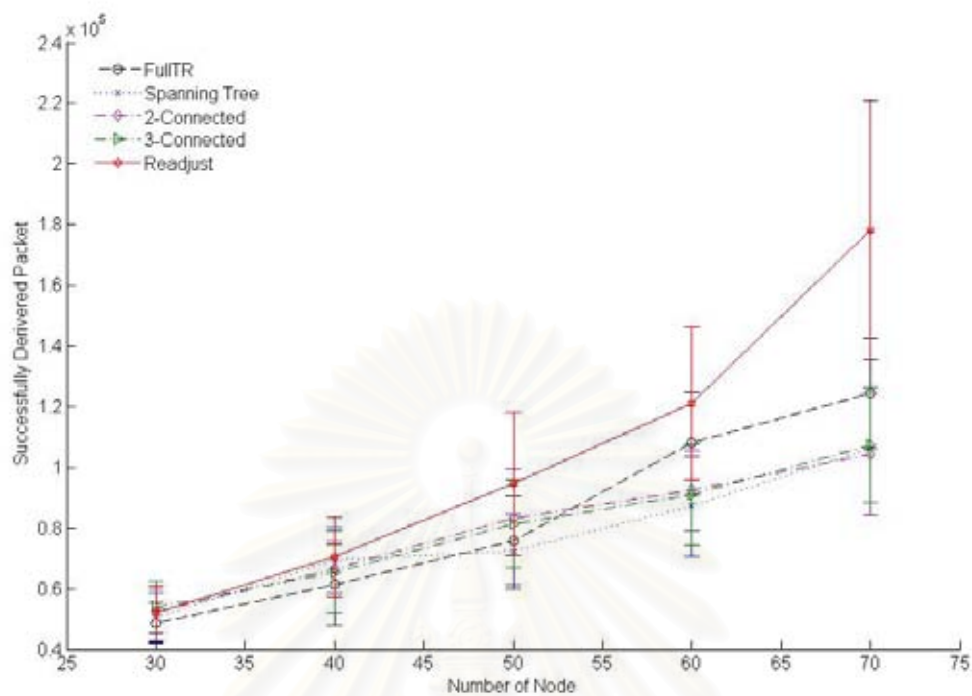
ในช่วงแรกของกราฟรูปที่ 3.12 ซึ่งโครงข่ายมีจำนวนโหนดน้อยโอกาสที่ตำแหน่งของแต่ละโหนดจะอยู่กระจายกันมีความเป็นไปได้สูง ซึ่งเป็นเหตุให้ลักษณะของกราฟในโครงข่ายต่างๆ มีค่าไม่ต่างกันมากนัก แต่เมื่อโครงข่ายมีจำนวนโหนดที่เพิ่มขึ้นทำให้การส่งข้อมูลด้วยพลังงานการส่งข้อมูลที่สูงสุด สามารถจะส่งแพ็กเก็ตถึงทุกโหนดในโครงข่ายได้โดยง่ายโดยไม่ต้องผ่านโหนดใดโหนดเดียวจึงเป็นสาเหตุให้มีจำนวนแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้สูงกว่า แต่โครงข่ายต้นไม้ โครงข่ายที่โหนดมีชายเชื่อมโยงอย่างต่ำ 2 ชายเชื่อมโยง และโครงข่ายที่โหนดมีชายเชื่อมโยงอย่างต่ำ 3 ชายเชื่อมโยง เหล่านี้มีปริมาณของข้อมูลที่จำเป็นต้องส่งเพิ่มขึ้น และต้องอาศัยจำนวนฮอปที่เพิ่มขึ้นในการส่งข้อมูลดังรูปที่ 3.13 ส่งผลให้โหนดใดโหนดหนึ่งที่ต้องคอยทำการส่งแพ็กเก็ตของแต่ละโหนดในโครงข่ายมีพลังงานหมดก่อนโหนดอื่นๆ โครงข่ายจึงมีระยะเวลาในการทำงานที่สั้นลง ส่งผลถึงปริมาณแพ็กเก็ตที่ส่งได้น้อยกว่าโครงข่ายต้นไม้เมื่อจำนวนโหนดเพิ่มขึ้น ไม่เพียงแค่นั้นการเพิ่มชายเชื่อมโยงเพียงหนึ่งหรือสองชายเชื่อมโยงต่อโหนด ก็ยังไม่มีอิทธิพลเท่าไรถึงโทโพโลยีของโครงข่ายที่ได้จากการสุ่มตำแหน่งของโหนด ทำให้กราฟทั้งสามเส้นซึ่งได้จากการเพิ่มชายเชื่อมโยงจากโครงข่ายต้นไม้ไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจนสำหรับโครงข่ายที่โหนดมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเมื่อพลังงานลดต่ำลงนั้นช่วงแรกของกราฟรูปที่ 3.13 จะมีค่าไม่ต่างกับโครงข่ายอื่นๆ มากนัก เพราะโหนดที่มีจำนวนน้อยทำให้โอกาสที่ตำแหน่งของโหนดจะมีการกระจายห่างกันมีความเป็นไปได้สูง ส่งผลให้โอกาสที่โหนดจะปรับเปลี่ยนชายเชื่อมโยงเมื่อพลังงานลดต่ำลงทำได้ยาก หรือไม่สามารทำได้ แต่เมื่อจำนวนโหนดเพิ่มขึ้น จะทำให้โอกาสที่แต่ละโหนดจะอยู่ใกล้กันมีสูง ดังนั้นเมื่อโหนดมีพลังงานลดต่ำลงจะสามารถปรับเปลี่ยนชายเชื่อมโยงได้ เป็นเหตุให้โหนดที่พลังงานลดลงมีการชะลอการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลและโครงข่ายมีช่วงระยะเวลาการทำงานที่ยาวนานขึ้น สิ่งนี้ทำให้ปริมาณแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้โดยรวมของโครงข่ายมีค่าสูงกว่าโครงข่ายอื่นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อโครงข่ายมีปริมาณโหนดที่มากขึ้น

รูปที่ 3.13 และ 3.14 แสดงค่าประวิงเวลาเฉลี่ย และจำนวนฮอปเฉลี่ยของแพ็กเก็ต ซึ่งกราฟที่ได้จะมีแนวโน้มที่คล้ายกันเนื่องจากว่าค่าประวิงเวลาจะแปรผันตรงกับจำนวนของฮอป และยังเห็นได้ว่าระเบียบวิธีที่มีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเมื่อพลังงานลดต่ำลงนั้นจะมีค่าประวิงเวลาและจำนวนฮอปใกล้เคียงกับโครงข่ายต้นไม้ม เนื่องจากโครงข่ายมีลักษณะเป็นโครงข่ายต้นไม้มเหมือนกัน ไม่เพียงแค่นั้นจะสังเกตได้ว่าโครงข่ายที่มีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลกราฟจะมีแนวโน้มที่สูงขึ้นเมื่อจำนวนโนดเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากระเบียบวิธีนี้จะทำให้ค่าเฉลี่ยของข่ายเชื่อมโยงที่แต่ละโนดคงที่ เมื่อจำนวนของโนดเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันโครงข่ายที่ใช้พลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุดแต่ละโนดจะมีจำนวนโนดข้างเคียงที่เพิ่มขึ้นตามจำนวนโนดหรือโครงข่ายมีจำนวนข่ายเชื่อมโยงเฉลี่ยต่อโนดมากขึ้น ทำให้การส่งข้อมูลใช้จำนวนฮอปเฉลี่ยที่ลดลงเมื่อจำนวนโนดเพิ่มขึ้น

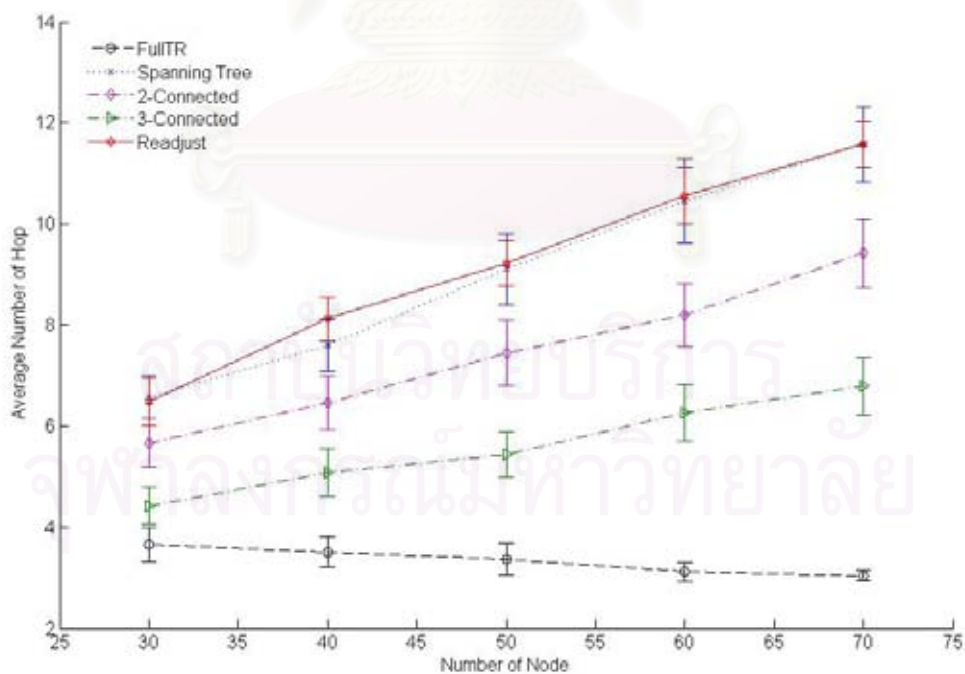
การที่แต่ละโนดใช้พลังงานในการส่งข้อมูลไม่เท่ากันจะส่งผลเสียถึงปริมาณของแพ็กเก็ตที่สูญเสียในชั้นสื่อสารย่อย MAC เพราะทำให้เกิดเหตุการณ์ที่โนดซึ่งจะทำการส่งข้อมูลไม่สามารถทราบได้ว่ามีโนดอื่นกำลังส่งข้อมูลอยู่ในขณะนั้นหรือ ข่ายเชื่อมโยงทางเดียว (Directional Link) และการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่มีค่ามากยังเป็นการทำให้มีโนดจำนวนมากสามารถรับรู้การส่งข้อมูลได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ซึ่งโครงข่ายที่ใช้พลังงานการส่งที่สูงกว่าจะมีโอกาสเกิดการสูญเสียของแพ็กเก็ตน้อยกว่า อย่างไรก็ตามการสูญเสียในชั้นสื่อสารย่อย MAC ยังแปรผันตรงกับจำนวนแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้ จึงเป็นเหตุให้โครงข่ายที่ใช้ระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยงระหว่างใช้งานมีการสูญเสียเพิ่มอย่างเห็นได้ชัดเมื่อจำนวนโนดเพิ่มขึ้น แต่ถึงกระนั้นจำนวนแพ็กเก็ตที่สูญเสียนั้นมีค่าแค่ประมาณ 0.3 % เมื่อเทียบจำนวนแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้

แต่อย่างไรก็ดีในรูปที่ 3.16 แสดงว่าการปรับเปลี่ยนพลังงานการส่งข้อมูลจะเป็นการลดการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลเฉลี่ยต่อแพ็กเก็ต ซึ่งหมายความว่าโครงข่ายต้นไม้มจะใช้พลังงานน้อยกว่า และเป็นเหตุให้ระเบียบวิธีที่ปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเมื่อพลังงานลดต่ำลงซึ่งมีพื้นฐานจากโครงข่ายต้นไม้มจะใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่น้อยกว่าโครงข่ายอื่น โดยเฉพาะในช่วงที่โครงข่ายมีจำนวนโนดที่เพิ่มขึ้น หรือระยะห่างเฉลี่ยโดยรวมของแต่ละคุโนดต่ำลง สาเหตุนี้ส่งผลให้โนดที่พลังงานใกล้เคียงหมดสามารถลดการใช้พลังงานลงได้โดย ใช้โนดตัวอื่นเป็นตัวเชื่อมต่อโครงข่ายแทนจึงทำให้ช่วงเวลาการทำงานของโครงข่ายมีค่าสูงส่งผลถึงปริมาณแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้มีค่าสูงขึ้นด้วย

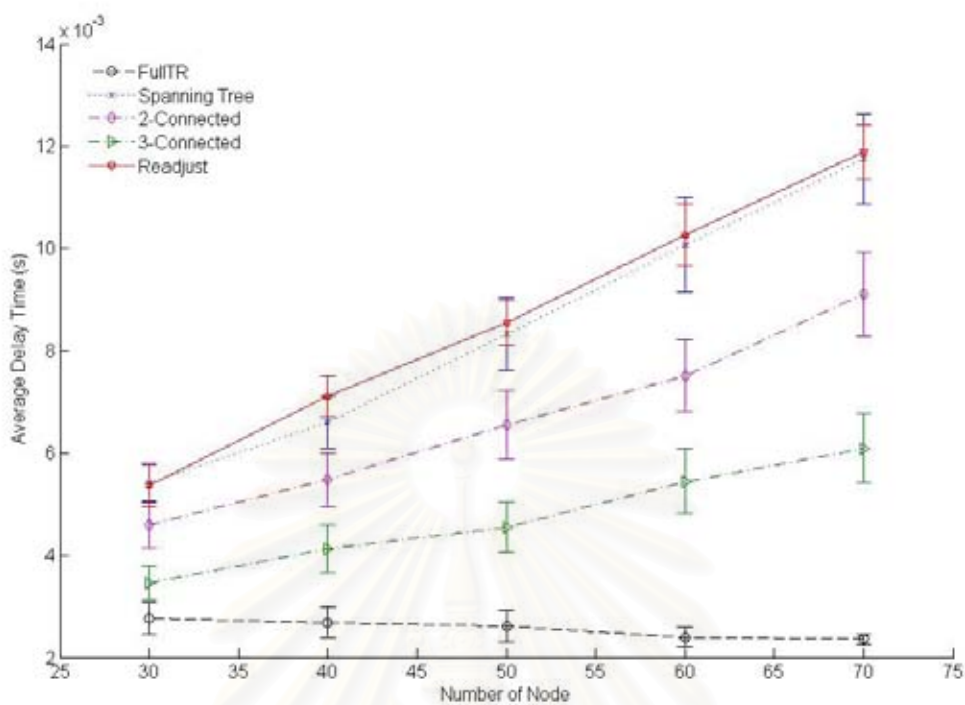
เนื่องจากอิทธิพลของการสุ่มตำแหน่งของโนดจึงทำให้ค่าความมั่นใจ (Confidence Interval) มีค่าสูง เพราะถ้าตำแหน่งของโนดที่สุ่มได้เกิดลักษณะของคอขวด จะเป็นการลดตัวเลือกในการปรับเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยงหรือลดประสิทธิภาพของระเบียบวิธี แต่ถ้าตำแหน่งของโนดมีการรวมตัวกัน จะเป็นการเพิ่มโอกาสในการปรับเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยง



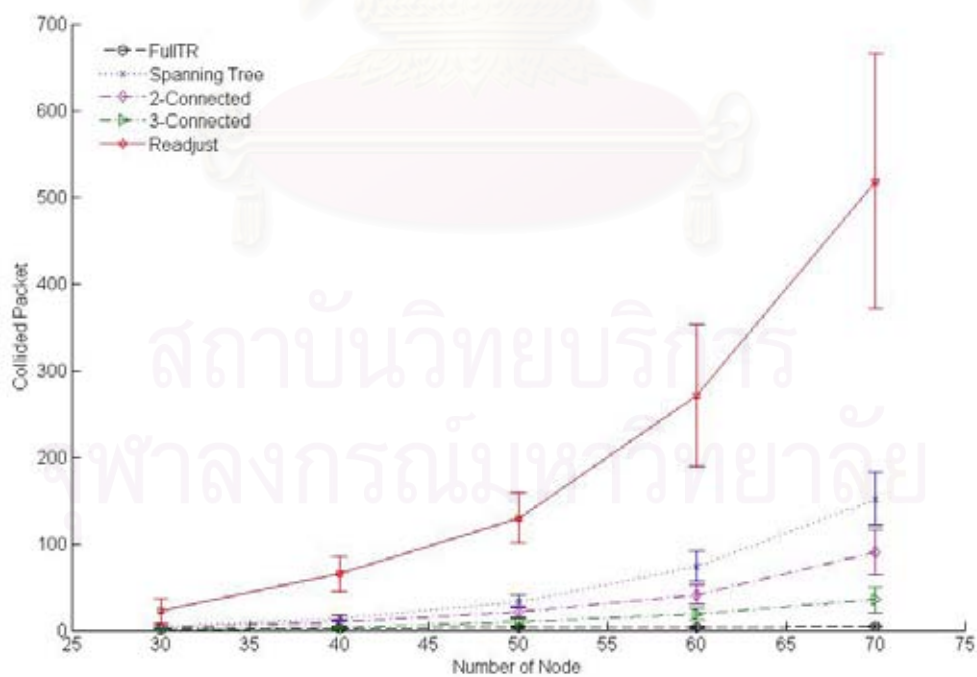
รูปที่ 3.12 จำนวนของแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้เมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด



รูปที่ 3.13 จำนวนฮอปเฉลี่ยของแพ็กเก็ตเมื่อทำการปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด

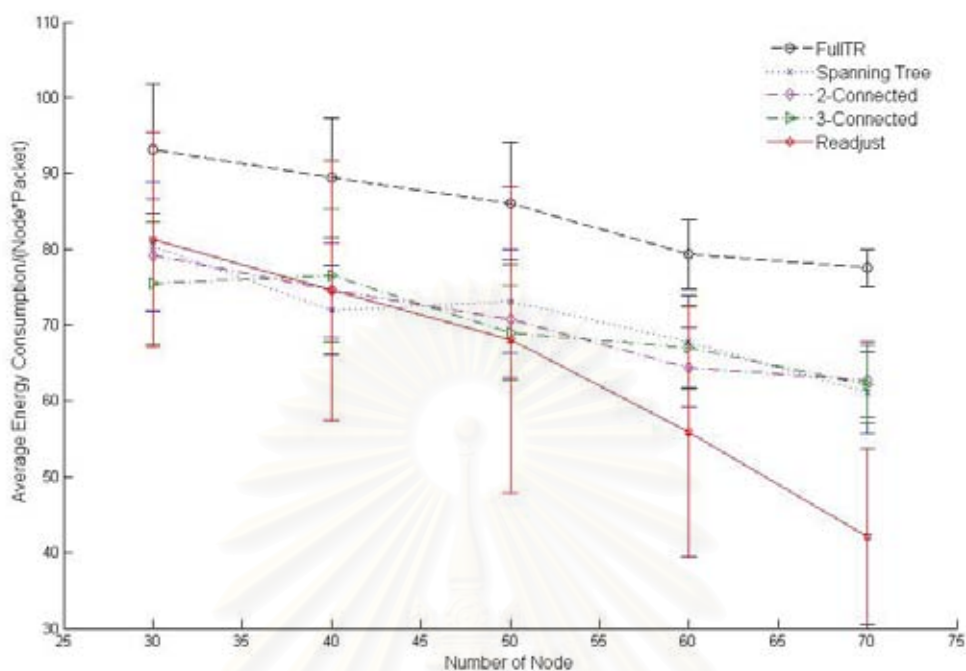


รูปที่ 3.14 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยของแพ็กเก็ตเมื่อทำการปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด



รูปที่ 3.15 จำนวนของแพ็กเก็ตที่สูญเสียนในชั้นโครงข่ายสื่อสารย่อย MAC เมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด



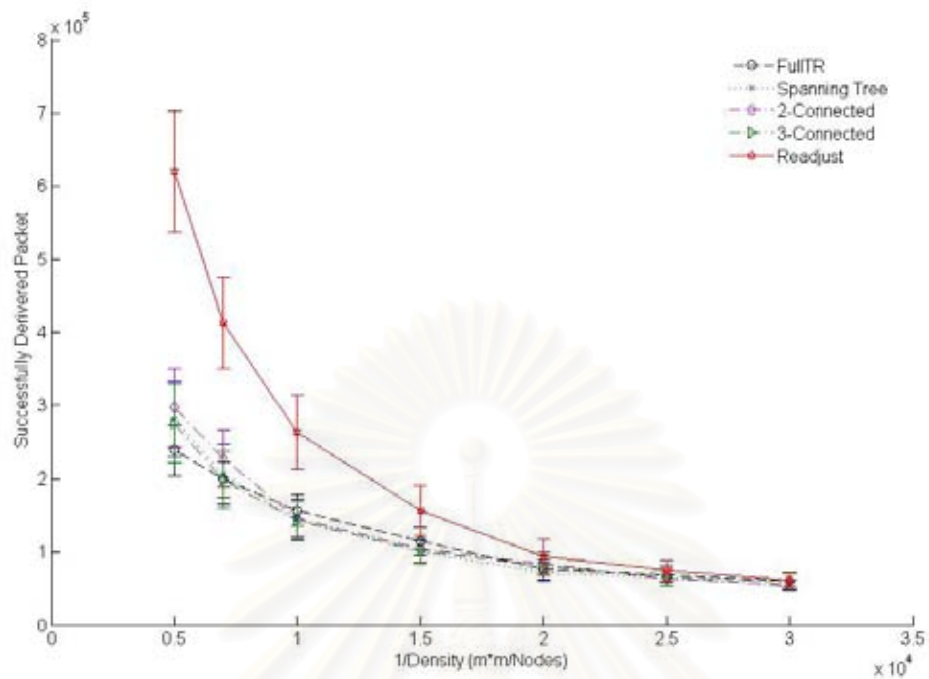


รูปที่ 3.16 พลังงานที่ใช้ต่อการส่งหนึ่งแพ็กเก็ตเมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด

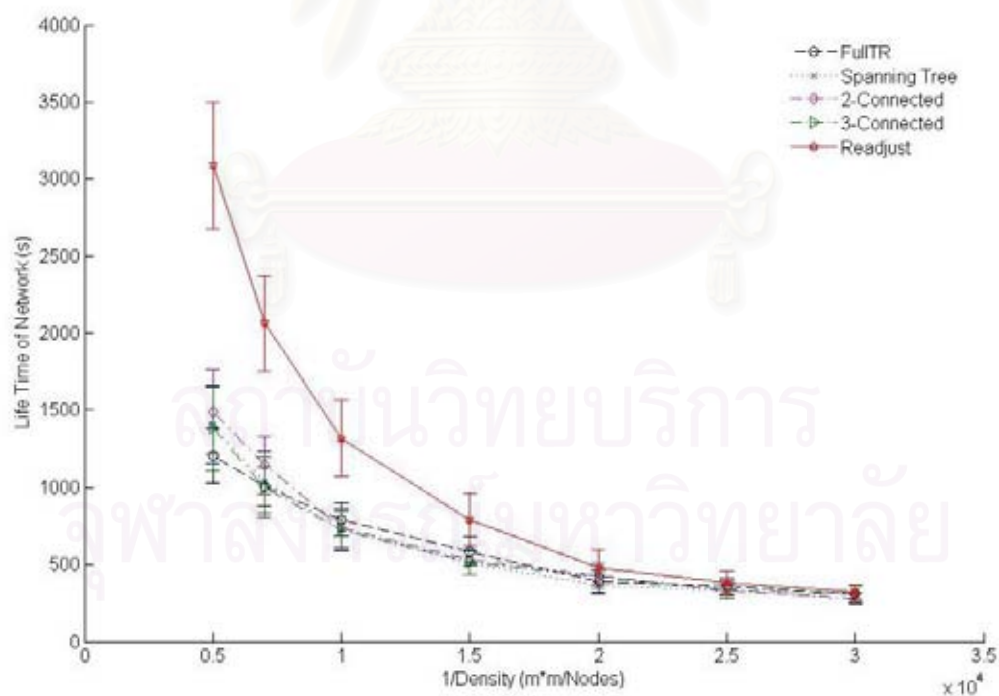
### 3.3.2.2 ปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่จำลอง

ผลการจำลองในส่วนนี้จะเป็นการยืนยันว่าตำแหน่งของโหนดในโครงข่ายมีอิทธิพลอย่างมากถึงประสิทธิภาพของระเบียบวิธี ดังแสดงในรูปที่ 3.17 และ 3.18 ซึ่งเมื่อพื้นที่ของการจำลองมีค่าน้อยทำให้ตำแหน่งของโหนดที่เกิดขึ้นจะอยู่ใกล้ๆ กัน โหนดจะสูญเสียพลังงานในการส่งข้อมูลที่ต่ำ เพราะระยะทางระหว่างโหนดมีค่าน้อย เป็นผลให้ช่วงเวลาการทำงานของโครงข่ายมีค่าสูง อย่างไรก็ตามพื้นที่จำลองที่แคบนี้ยังทำให้ระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเมื่อพลังงานต่ำลงสามารถมีโอกาสอย่างสูงในการหาข่ายเชื่อมโยงใหม่ ซึ่งทำให้ปริมาณแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้ของโครงข่ายมีค่าเพิ่มขึ้น

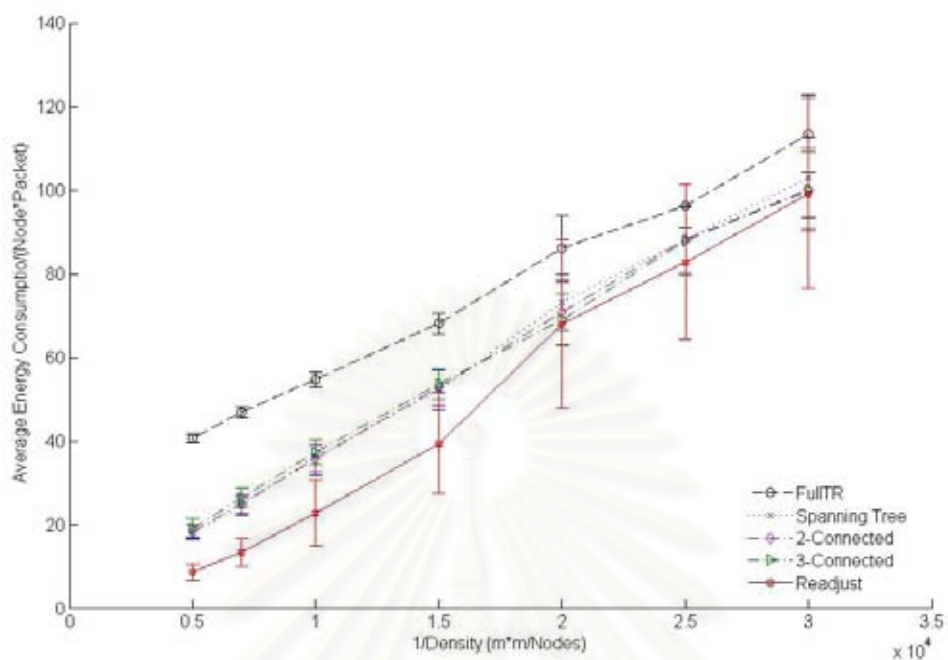
ดังเช่น ช่วงต้นของกราฟซึ่งโหนดในโครงข่ายมีความหนาแน่นกันมาก ระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเมื่อพลังงานต่ำลง จะมีโอกาสอย่างมากในการปรับเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยง ซึ่งทำให้ช่วงเวลาการทำงานของโครงข่าย และจำนวนแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้มีค่าสูงอย่างมากในส่วนต้นของกราฟทั้งสอง แสดงในรูปที่ 3.17 และ 3.18



รูปที่ 3.17 จำนวนของแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้เมื่อปรับเปลี่ยนขนาดของพื้นที่จำลอง



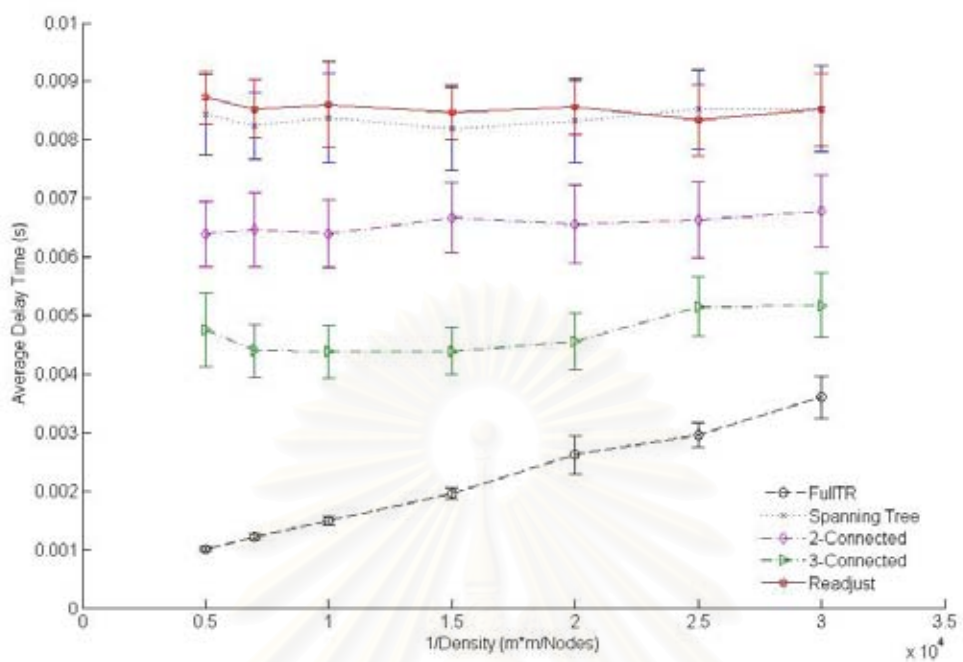
รูปที่ 3.18 ช่วงระยะเวลาการทำงานของโครงข่ายเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดของพื้นที่จำลอง



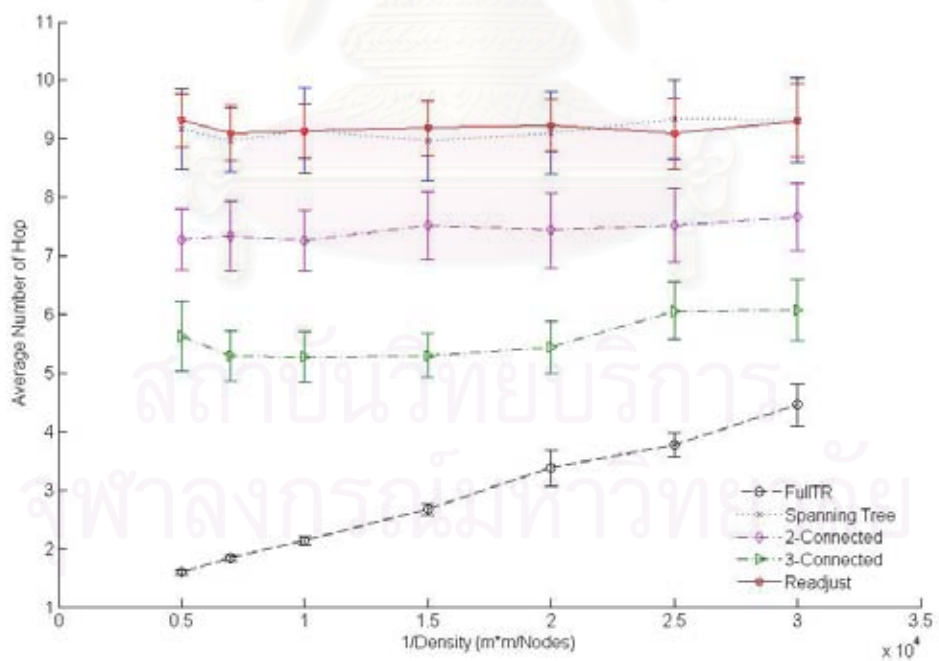
รูปที่ 3.19 พลังงานที่ใช้ต่อการส่งหนึ่งแพ็กเก็ตเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดของพื้นที่จำลอง

รูปที่ 3.19 พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการส่งต่อหนึ่งแพ็กเก็ตของระเบียบวิธีที่มีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเมื่อพลังงานต่ำลง จะมีค่าต่ำในช่วงแรกเนื่องจากระยะห่างระหว่างโหนดจะมีค่าน้อยทำให้สามารถส่งแพ็กเก็ตได้เป็นระยะเวลาสั้นและปริมาณแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้มาก แต่เมื่อระยะห่างระหว่างโหนดมีค่าสูง ทำให้โอกาสที่จะปรับเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยงนั้นน้อยลง จึงเป็นเหตุให้พลังงานที่ใช้มีค่าใกล้เคียงกับโครงข่ายต้นไม้ โครงข่ายที่มีจำนวนข่ายเชื่อมโยงอย่างต่ำต่อโหนด 2 หรือ 3 ข่ายเชื่อมโยง แต่อย่างไรก็ตามโครงข่ายที่ไม่ใช้การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลก็จะมีค่าการใช้พลังงานเฉลี่ยในการส่งหนึ่งแพ็กเก็ตสูงสุด

รูปที่ 3.20 และ 3.21 โครงข่ายที่ใช้ค่าพลังงานในการส่งสูงสุด จะสามารถส่งข้อมูลได้อย่างรวดเร็วโดยเฉพาะในโครงข่ายที่ตำแหน่งของโหนดอยู่ใกล้กัน เนื่องจากแต่ละโหนดส่งข้อมูลกันโดยใช้จำนวนฮอปที่ต่ำ อย่างไรก็ตามเมื่อตำแหน่งของโหนดอยู่ห่างกันมากขึ้นกราฟก็จะมีค่าเข้าใกล้โครงข่ายที่มีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล ส่วนในโครงข่ายที่มีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล จะมีจำนวนฮอปเฉลี่ยคงที่ โดยไม่ขึ้นกับการกระจายตัวของโหนด เพราะระเบียบวิธีจะปรับเปลี่ยนจำนวนข่ายเชื่อมโยงเฉลี่ยต่อโหนดให้คงที่ตลอด



รูปที่ 3.20 ค่าประวิงเวลาเฉลี่ยต่อแพ็กเก็ตเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดของพื้นที่จำลอง



รูปที่ 3.21 จำนวนฮอปเฉลี่ยต่อแพ็กเก็ตเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดของพื้นที่จำลอง

### 3.4 สรุป

ในบทนี้ได้ทำการเสนอรูปแบบของการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลไว้สองวิธี ซึ่งจากผลการจำลองจะได้ว่าโครงข่ายต้นไม้นั้นจะใช้พลังงานโดยรวมในการส่งแพ็กเก็ตที่น้อยกว่าโครงข่ายที่ใช้ค่าพลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุด แต่ข้อเสียของโครงข่ายต้นไม้นั้นจะเกิดปัญหาในดที่อยู่ส่วนกลางของโครงข่ายแบกรับภาระในการส่งข้อมูล ทำให้มีโหนดเหล่านี้อาจเกิดการหมดพลังงานก่อนจึงได้เสนอการปรับเปลี่ยนรูปแบบที่สองขึ้น ซึ่งจะปรับเปลี่ยนสายเชื่อมโยงเมื่อโหนดมีพลังงานลดน้อยลง เป็นการแก้ปัญหาในส่วนนี้ อย่างไรก็ตามโครงข่ายที่มีสายเชื่อมโยงจำนวนน้อยจะมีค่าประวิงเวลา และจำนวนฮอปสูงกว่าอาจจะไม่เหมาะสมกับข้อมูลประเภทเวลาจริง (Real-Time) ไม่เพียงแค่นั้นตำแหน่งของโหนดที่กระจายตัวหรืออยู่เป็นกลุ่มในโครงข่ายนั้นส่งผลอย่างมากถึงประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแอตฮอกแบบพลวัตที่นำเสนอ

บทนี้เป็นการเสนอระเบียบวิธีในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล ซึ่งโหนดในโครงข่ายมีความสามารถในการเคลื่อนที่ ปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อให้โครงข่ายเชื่อมต่อกันเป็นโครงข่ายต้นไม้ (Spanning Tree) เนื้อหาในบทนี้ แบ่งเป็น 2 ส่วนหลักๆ

(1) เป็นการปรับพลังงานในการส่งข้อมูลในกรณีที่โหนดในโครงข่ายมีการเคลื่อนที่เป็นแบบรายคาบ (Periodic Movement) และทำการสังเกตถึงค่าของพลังงานที่ใช้เปรียบเทียบกับจำนวนครั้งของการเปลี่ยนแปลงโทโพโลยีของโครงข่าย

(2) เป็นระเบียบวิธีที่ให้โหนดในโครงข่ายมีการปรับพลังงานในการส่งข้อมูลให้โทโพโลยีเป็นรูปต้นไม้ เพื่อลดการใช้พลังงานของโครงข่าย

ในแต่ละส่วนได้ทำการจำลองเพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของระเบียบวิธี และผลกระทบของโครงข่าย เมื่อทำการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล

#### 4.1 การปรับเปลี่ยนพลังงานการส่งข้อมูลเมื่อการเคลื่อนที่ของโหนดเป็นแบบรายคาบ

ระเบียบวิธีที่เสนอในการปรับเปลี่ยนพลังงานเมื่อโหนดในโครงข่ายเคลื่อนที่เป็นแบบรายคาบนั้น มีจุดเด่นคือทุกโหนดในโครงข่ายจะเคลื่อนที่กลับมาที่ตำแหน่งเดิมเมื่อครบหนึ่งคาบ ดังนั้นในระเบียบวิธีนี้จะใช้ช่วงระยะเวลาในคาบแรกเป็นช่วงของการเรียนรู้ (Learning Period) ทุกโหนดจะใช้ค่าพลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุดเพื่อทำการค้นหาโหนดข้างเคียง และพยายามหาค่าพลังงานในการส่งต่ำสุดในแต่ละเวลาโดยที่โครงข่ายยังสามารถเชื่อมต่อกันได้ และทำการเก็บค่าเหล่านั้นไว้ ในคาบถัดไปจึงสามารถนำค่าเหล่านั้นมาใช้ปรับเปลี่ยนพลังงาน ดังนั้นจึงสามารถลดความจำเป็นในการที่ต้องคำนวณ หรือการกระจายแพ็กเก็ตเพื่อหาค่าพลังงานในการส่งข้อมูลอีกครั้ง โดยรายละเอียดจะแบ่งเป็น 5 ส่วน คือ ในส่วนแรกจะกล่าวถึงแบบจำลองการเคลื่อนที่ ส่วนที่สองจะเป็นกลไกการเรียนรู้ ส่วนที่สามจะกล่าวถึงวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานส่งในคาบถัดๆ ไป ส่วนที่สี่จะเป็นสภาวะแวดล้อมของการจำลองและผลการจำลอง ส่วนสุดท้ายจะเป็นการสรุปผลของการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล

### 4.1.1 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของโนด

กำหนดให้แต่ละโนดมีการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงก่อนมีการเปลี่ยนแปลงทิศทาง การเคลื่อนที่ และการเคลื่อนที่เป็นแบบรายคาบตัวอย่างในรูปที่ 4.1 ซึ่งสามารถแสดงสมการการเคลื่อนที่ได้ในสมการที่ (4.1), (4.2) และสามารถคำนวณคาบการเคลื่อนที่ตามสมการที่ (4.3)



รูปที่ 4.1 การเคลื่อนที่ของโนดแบบรายคาบ

$$x(t) = x(t+T) \quad (4.1)$$

$$y(t) = y(t+T) \quad (4.2)$$

$$T = \frac{2S}{v} \quad (4.3)$$

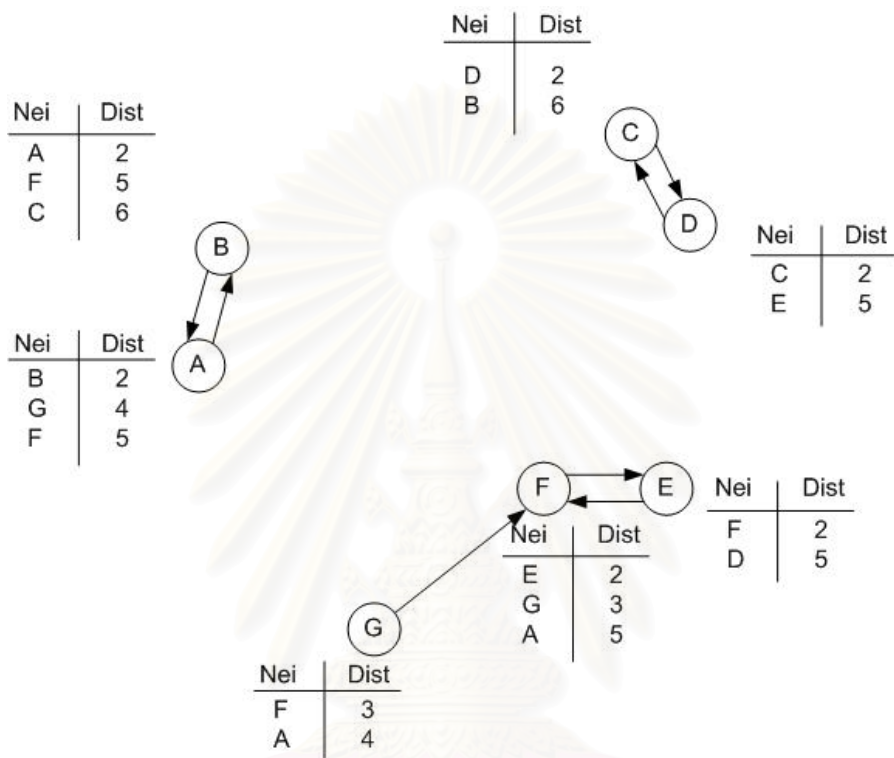
โดยที่

$T$	คือ คาบการเคลื่อนที่ของโนด (วินาที)
$t$	คือ เวลาที่มีค่า $0 \leq t < T$ (วินาที)
$S$	คือ ระยะทางที่โนดเคลื่อนที่ (เมตร)
$v$	คือ ความเร็วของโนด (เมตรต่อวินาที)

### 4.1.2 กลไกและหลักการในการเรียนรู้ค่าพลังงานในการส่งข้อมูลที่จำเป็นต่อใช้เพื่อเชื่อมโครงข่ายเป็นต้นไม้ที่มีระยะรวมทางต่ำสุด (Minimum Spanning Tree)

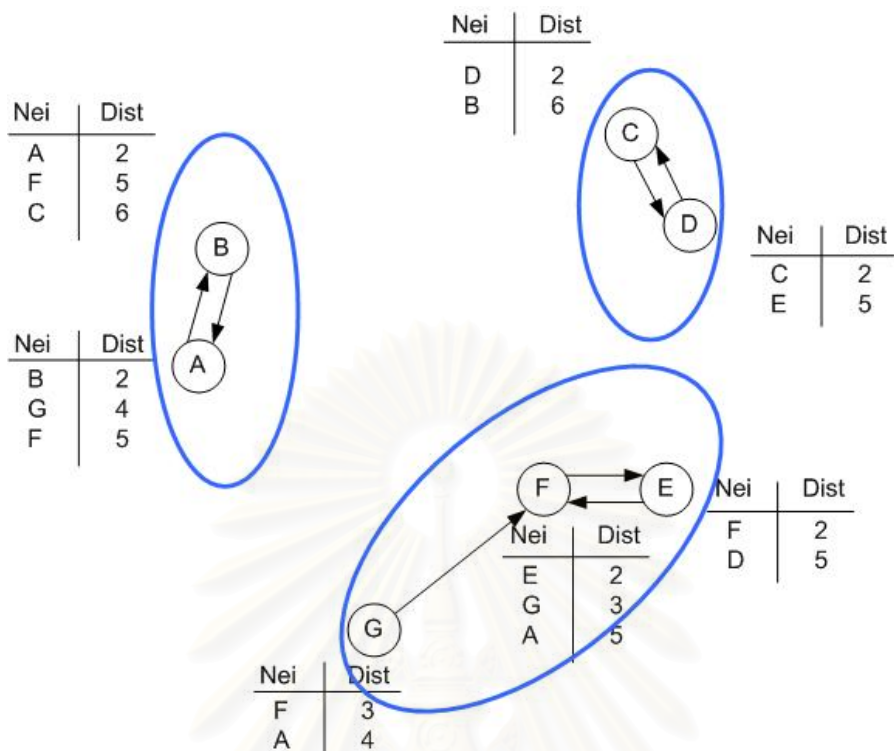
หลักการของกลไกนี้คือแต่ละโนดจะทำการส่งสัญญาณบีคอนถึงโนดข้างเคียง ซึ่งโนดสามารถที่จะตรวจวัดความแรงของสัญญาณและบอกระยะทางระหว่างตัวมันเองกับโนดข้างเคียงได้ ดังนั้นทำให้โนดรู้ระยะห่างของโนดข้างเคียงทุกโนด ขั้นตอนถัดไปโนดจะทำการเชื่อมต่อโครงข่ายย่อยแต่ละโครงข่ายเข้าด้วยกัน โดยการเชื่อมจะเลือกสายเชื่อมโยงที่สั้นที่สุดในแต่ละโครงข่ายย่อยนั้นๆ เป็นตัวเชื่อม ขั้นตอนแรกจะมีจำนวนโครงข่ายย่อยเป็น  $N$  ซึ่งเท่ากับจำนวนโนดทั้งหมดในโครงข่ายแต่ละโนด  $u$  ในโครงข่ายจะทำการเลือกโนด  $v$  ซึ่งเป็นโนดข้างเคียงที่มีระยะห่างระหว่างกันน้อยสุด เมื่อทำการเลือกเสร็จโนด  $u$  ก็จะมีการส่งแพ็กเก็ตเพื่อบอกถึงการเลือกโนดที่ใกล้สุด (Reserving

Nearest Node) ดังรูปที่ 4.2 และทำการคอยการรับแพ็กเก็ตนี้ของโหนด  $w$  อื่น เมื่อโหนด  $u$  ทำการคอยจนแน่ใจว่าได้รับแพ็กเก็ตที่บอกถึงการเลือกโหนดที่ใกล้นี้ของโหนดอื่นทั้งหมดในโครงข่ายแล้ว โหนด  $u$  จะสามารถรับรู้การเชื่อมต่อของแต่ละโหนดในโครงข่ายได้ ซึ่งการเชื่อมต่อของโครงข่ายแสดงได้ดังรูปที่ 4.3

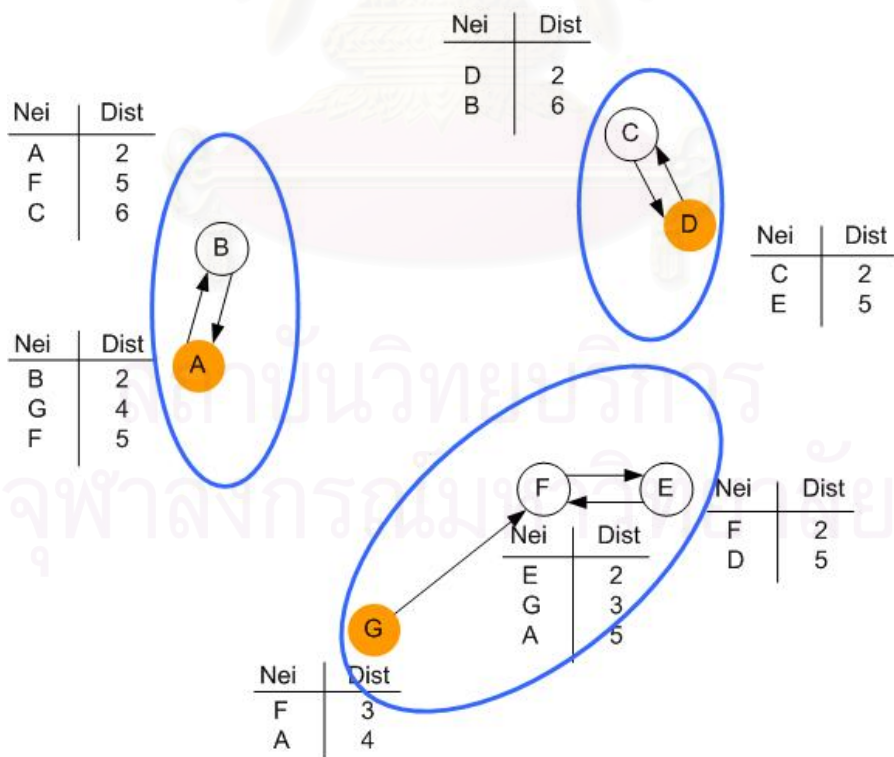


รูปที่ 4.2 โหนดแต่ละโหนดทำการเลือกโหนดข้างเคียงที่ใกล้ตัวเองที่สุด

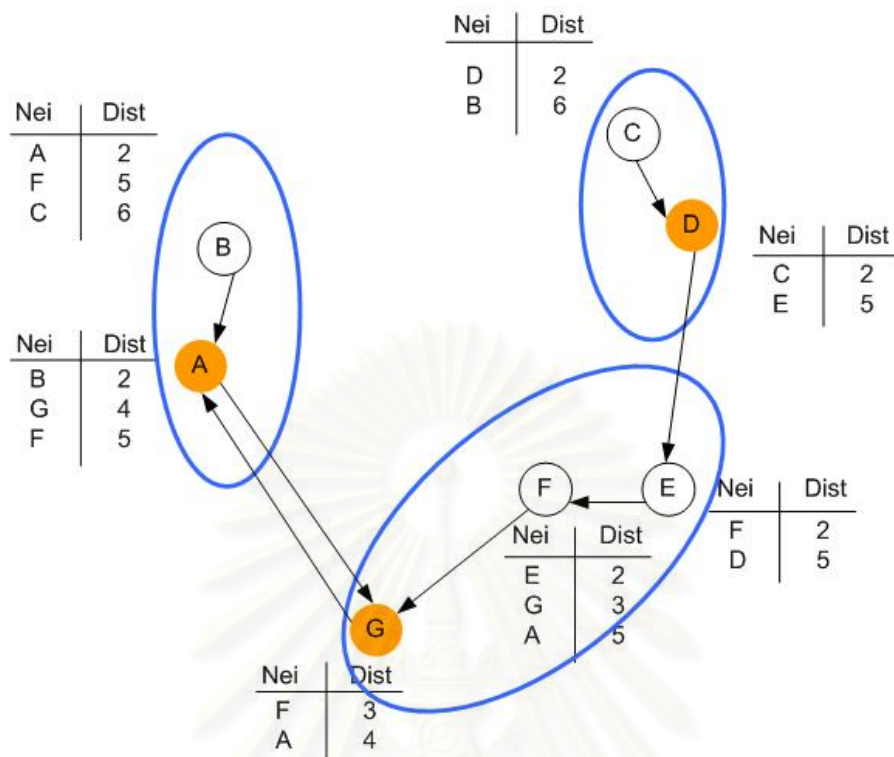




รูปที่ 4.3 การเชื่อมต่อของโครงข่ายหลังทำการเลือก



รูปที่ 4.4 โหนดที่อยู่ไกลโครงข่ายย่อยอื่นที่สุดของแต่ละโครงข่ายย่อย



รูปที่ 4.5 โหนดทำการเลือกเพื่อสร้างข่ายเชื่อมโยงระหว่างโครงข่ายย่อยด้วยกัน

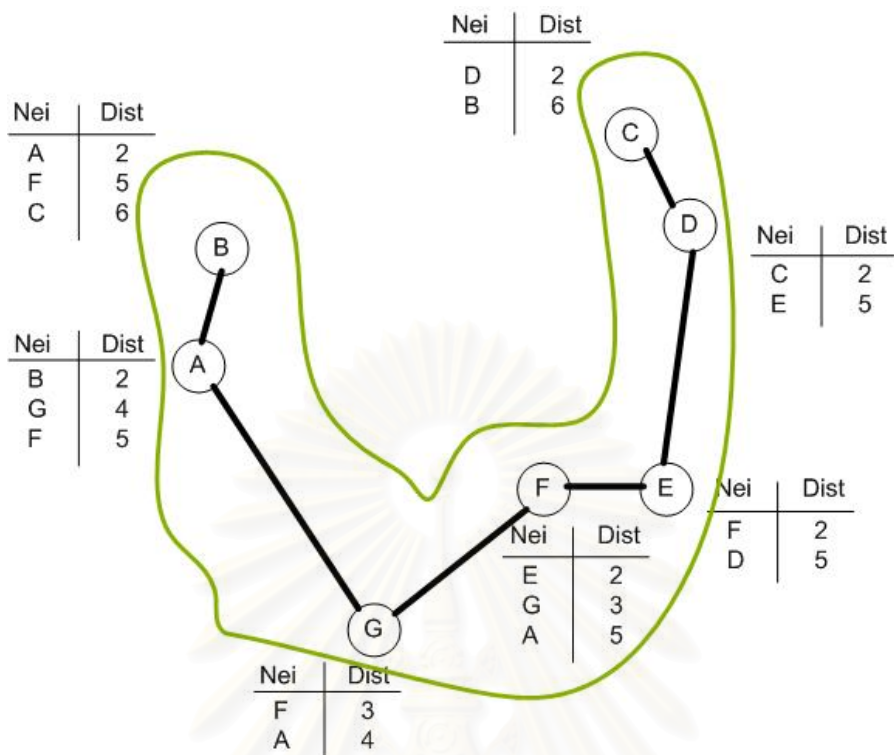
ต่อไปเป็นขั้นตอนที่สองซึ่งแต่ละโหนดจะตรวจสอบดูว่าโครงข่ายสามารถที่จะเชื่อมต่อกันได้ทั้งหมดหรือไม่ ถ้าโครงข่ายยังไม่สามารถเชื่อมต่อกันได้ทั้งหมด ทุกโหนดในแต่ละโครงข่ายก็จะส่งแพ็กเก็ตเพื่อบอกระยะห่างของโหนดข้างเคียงซึ่งอยู่ในโครงข่ายอื่น (Nearest Neighbor Distance) ที่อยู่ใกล้ตัวมันเองที่สุด ซึ่งขั้นตอนนี้ทำเพื่อหาโครงข่ายย่อยที่ใกล้กับโครงข่ายตัวเองที่สุด และหาข่ายเชื่อมโยงที่ควรจะมีการเชื่อมต่อ เมื่อขั้นตอนนี้เสร็จสิ้น แต่ละโหนดในโครงข่ายจะทราบถึงโครงข่ายที่จะต้องทำการเชื่อมต่อ และทราบว่าโหนดไหนจะเป็นตัวทำการเชื่อมโครงข่ายนี้ ดังรูปที่ 4.4 ขั้นตอนที่สามารถนั้นโหนดที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อ จะแพร่กระจายแพ็กเก็ตการจอง เพื่อจองโหนดในโครงข่ายย่อยอื่นที่ใกล้ที่สุด (Reserving Nearest Subnetwork) ถึงทุกโหนดในโครงข่าย เมื่อแต่ละโหนดได้รับแพ็กเก็ตนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงการเลือกโหนดในโครงข่ายย่อยของตัวเอง แสดงในรูปที่ 4.5 และในตารางที่ 4.1 หลังจากทุกโหนดได้รับรู้ถึงข่าวสารการเชื่อมต่อระหว่างแต่ละโครงข่ายย่อยก็จะทำการตรวจสอบถึงการเชื่อมต่อกันทั้งหมดของทั้งโครงข่ายอีกครั้ง ซึ่งถ้าโครงข่ายยังไม่สามารถเชื่อมต่อกันทั้งหมด ก็จะกลับเข้าสู่ขั้นตอนที่สอง จนโครงข่ายสามารถเชื่อมต่อกันได้ทั้งหมด แสดงในรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.1 โหนดข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดและโหนดที่ถูกเลือกในแต่ละโหนด

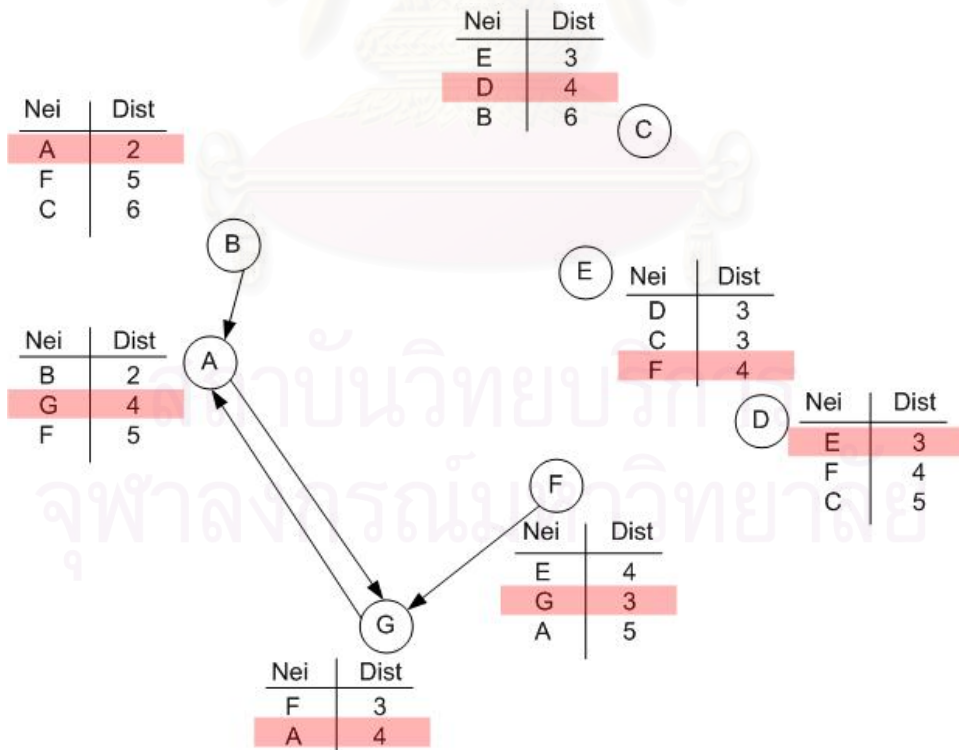
Node	Nearest Neighbor Node	Chosen Node
A	B	G
B	A	A
C	D	D
D	C	E
E	F	F
F	E	G
G	F	A

เมื่อโครงข่ายเชื่อมต่อกันหมดแล้ว แต่ละโหนดก็จะเก็บค่าความห่างของระยะทางของโหนดที่ตัวเองได้ทำการเลือกไว้ และนำค่าเหล่านั้นมาเป็นค่าที่ใช้ระบุค่าพลังงานในการส่งข้อมูลในคาบถัดไป

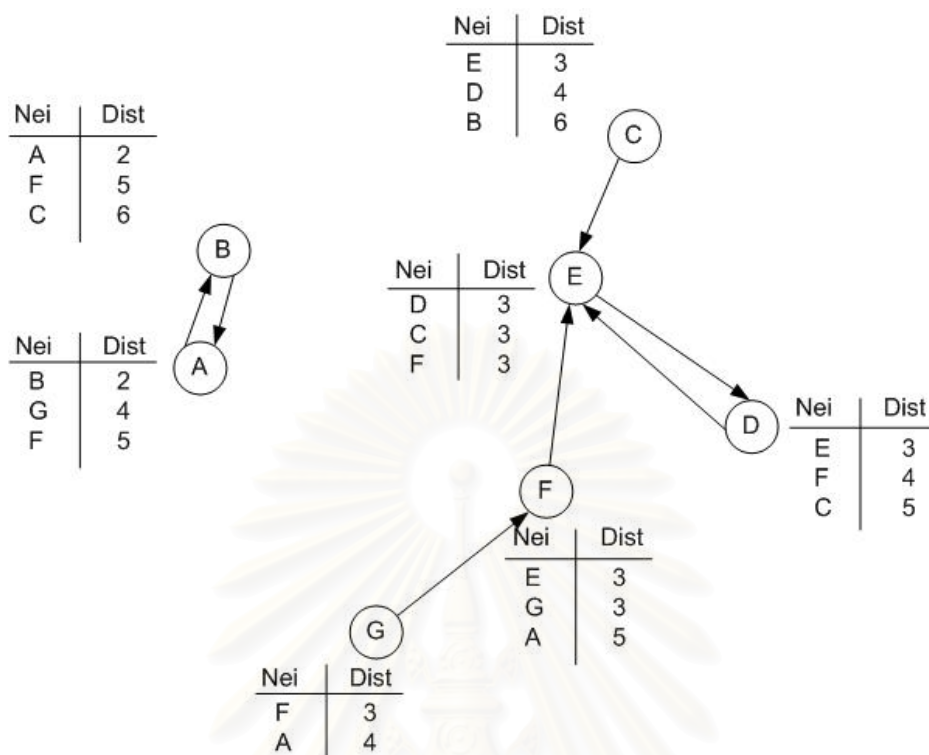
อย่างไรก็ตามเมื่อโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างโหนดใดๆ เนื่องจากการเคลื่อนที่แล้ว ถ้าการเปลี่ยนแปลงนี้ส่งผลให้มีการเปลี่ยนลำดับความใกล้ไกลของโหนดข้างเคียงที่โหนดใดๆ ก็ตาม ซึ่งเป็นผลให้โครงข่ายไม่ได้เชื่อมต่อกัน ด้วยระยะทางที่ต่ำสุด (Minimum Spanning Tree) ทำให้โหนดนั้นต้องเลือกโหนดข้างเคียงใหม่ เพื่อให้ได้ระยะห่างระหว่างโหนดโดยรวมของโครงข่ายมีค่าต่ำสุดดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.6 โครงข่ายย่อยที่สามารถเชื่อมต่อกันได้ทั้งหมด



รูปที่ 4.7 เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะทางระหว่างโหนด



รูปที่ 4.8 โหนดในโครงข่ายทำการจัดรูปแบบโทโพโลยีใหม่

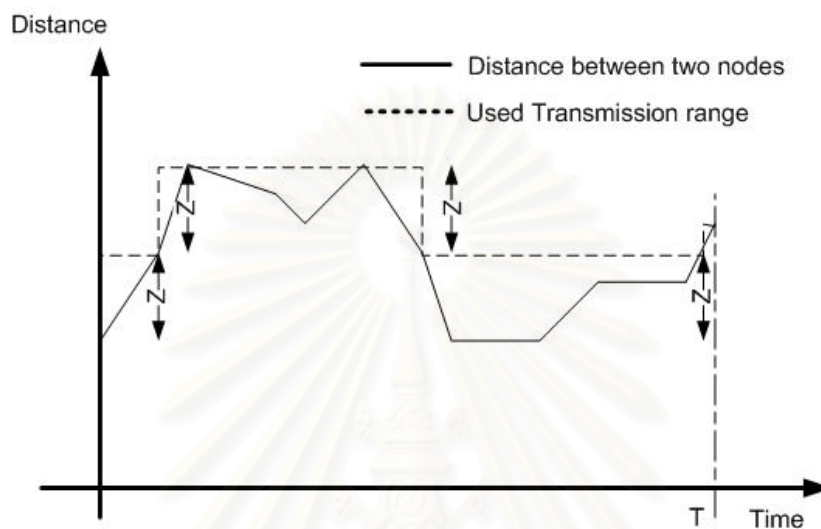
โหนด C, D และ E มีการเปลี่ยนแปลงดังนั้นสามโหนดนี้จะทำการแพร่กระจายแพ็กเกตเพื่อบอกถึงการเลือกโหนดที่ใกล้ที่สุด (Reserving Nearest Node) ใหม่อีกครั้ง เมื่อโหนดใดๆ ได้รับแพ็กเกตนี้รูปแบบของการเลือกก็จะกลับไปเลือกโหนดข้างเคียงที่ใกล้ที่สุดอีกครั้ง ดังรูปที่ 4.8 แล้วจึงทำการเชื่อมระหว่างโครงข่ายย่อยจนสามารถเชื่อมต่อโครงข่ายทั้งหมดเหมือนเดิม

#### 4.1.3 วิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในแต่ละคาบ

แต่ละโหนดได้รู้ถึงค่าพลังงานในการส่งข้อมูลที่จำเป็นต้องใช้ในแต่ละเวลาของคาบแรกแล้ว ก็จะมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกัน เพื่อหาค่าพลังงานในการส่งข้อมูลที่ควรจะใช้ในคาบถัดไป โดยค่าพลังงานนี้จะเป็นค่าสูงสุดของทุกโหนดในแต่ละเวลา และนำค่าพลังงานในการส่งข้อมูลนี้มาปรับเปลี่ยน ซึ่งการปรับเปลี่ยนจะมีด้วยกันสองวิธี

(1) ปรับเปลี่ยนที่เวลาคงที่ ซึ่งโหนดจะปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลที่ค่าเวลาคงที่ใดๆ และ  $X$  จำนวนครั้งของการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการส่งข้อมูลใน 1 คาบของการเคลื่อนที่ของโหนดในโครงข่าย

(2) ปรับเปลี่ยนเมื่อระยะทางเปลี่ยนแปลงเกินกว่าขีดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งแสดงได้ดังรูป 4.9 เมื่อค่าพลังงานที่ควรจะถูกใช้มีค่ามากกว่าหรือน้อยกว่าค่าพลังงานเริ่มต้น  $Z$  โคร่งข่ายก็จะทำการปรับค่าพลังงานในการส่งข้อมูล เมื่อ  $T$  เป็นคาบของโคร่งข่าย และ  $Z$  เป็นขีดเริ่มเปลี่ยน



รูปที่ 4.9 การปรับเปลี่ยนพลังงานตามขีดเริ่มเปลี่ยน

#### 4.1.4 การจำลองผลของการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเมื่อโหนดมีการเคลื่อนที่แบบรายคาบ

ในส่วนนี้จะเป็นการจำลองการเคลื่อนที่ของโหนดและผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลทั้งสองแบบ โดยจะแบ่งเป็นสองหัวข้อ

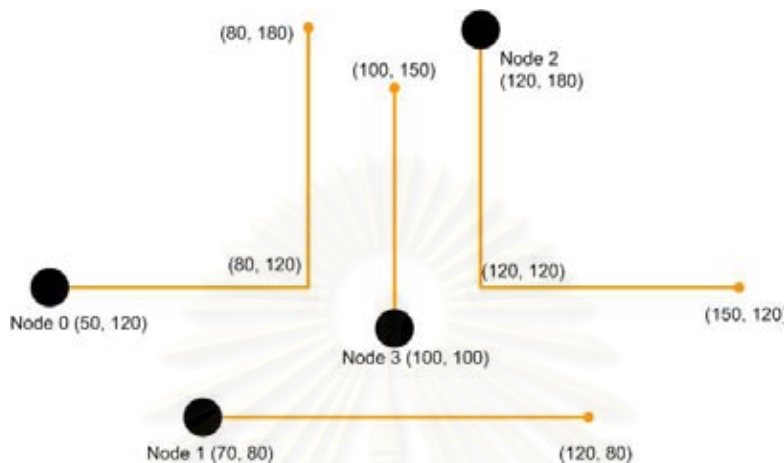
(1) สภาวะแวดล้อมของการจำลอง ซึ่งจะบอกถึงรูปแบบลักษณะการเคลื่อนที่ของโหนดที่ใช้ในการจำลอง

(2) ผลการจำลอง จะเป็นการแสดงและวิเคราะห์ถึงข้อดีและข้อเสียของการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล

##### 4.1.4.1 สภาวะแวดล้อมของการจำลอง

โหนดในการจำลองนั้นมี 4 โหนดและมีการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 4.10 แต่ละโหนดมีค่าพลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุด 100 ม. ในการทดลองนี้จะใช้โปรโตคอลการหาเส้นทางแบบพิจารณา

สถานะการเชื่อมต่อ และแต่ละโหนดเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 10 เมตรต่อวินาที ซึ่งจะได้คาบการเคลื่อนที่ของแต่ละโหนดดังนี้



รูปที่ 4.10 การเคลื่อนที่ของโหนดในการจำลอง

$$T_{node\_0} = 18s, T_{node\_1} = 10s, T_{node\_2} = 18s, T_{node\_3} = 10s$$

ดังนั้นจึงแสดงได้ว่าเวลาที่โหนดในโครงข่ายทุกโหนดจะกลับไปที่ตำแหน่งเดิมพร้อมกัน หรือคาบของโครงข่าย  $T_{network}$  มีค่าเท่ากับ

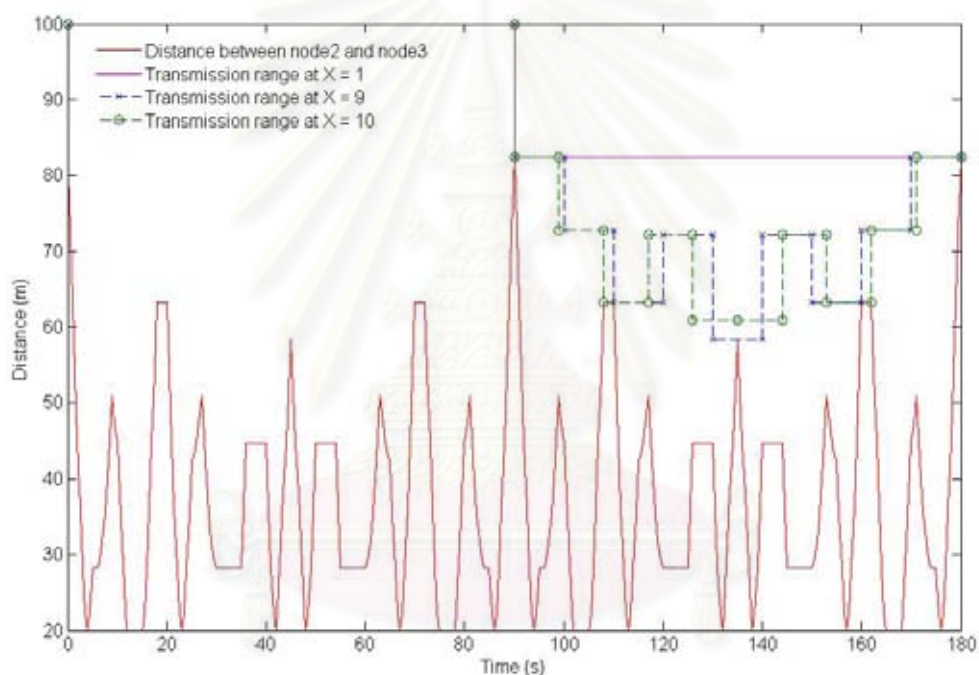
$$T_{network} = 90s$$

ซึ่งในวิธีการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการส่งข้อมูลโดยปรับเปลี่ยนที่เวลาคงที่ จะกำหนดจำนวนครั้งในการปรับเปลี่ยนภายใน 1 คาบ  $X$  มีค่าเท่ากับ 1, 2, 3, 5, 6, 9, 10 และ 15 ส่วนในการปรับเปลี่ยนเมื่อระยะทางระหว่างโหนดมีการเปลี่ยนแปลงเกินกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยน  $Z$  จะกำหนดค่า  $Z$  มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 50

#### 4.1.4.2 ผลการจำลองและการวิเคราะห์

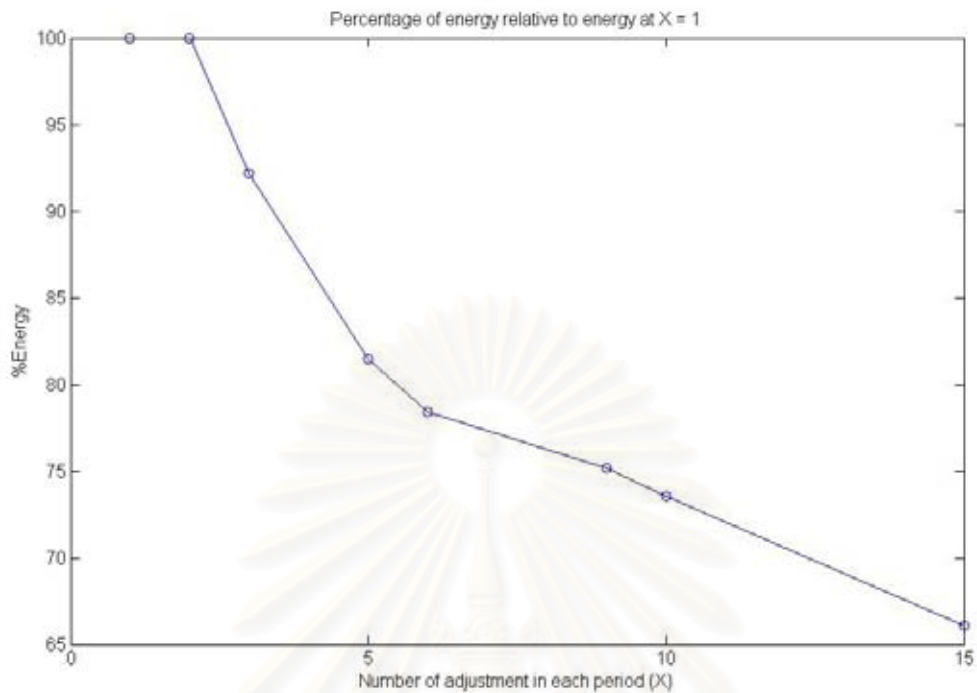
หัวข้อนี้ได้แสดงผลการทดลองสองส่วนซึ่งในส่วนแรกจะปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในแต่ละคาบเป็นจำนวน  $X$  ครั้ง จะเห็นได้ว่าถ้ามีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในแต่ละคาบบ่อยครั้งขึ้น เมื่อค่า  $X$  มีค่ามากขึ้น และทำให้การใช้พลังงานในการส่งข้อมูลของโครงข่ายน้อยลงดังรูปที่ 4.11 และจากสิ่งนี้ส่งผลให้พลังงานที่ใช้ของโครงข่ายมีค่าน้อยลงเมื่อค่า  $X$  มากขึ้นดังรูปที่ 4.12 แต่อย่างไรก็ตามการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่ครอบคลุมพื้นที่น้อยลงทำให้โอกาสที่ระ

ห่างระหว่างคูนิดใด ๆ มีการเปลี่ยนแปลงค่าอยู่ระหว่าง ค่าพลังงานในการส่งข้อมูลที่ใช้มีสูง เป็นเหตุให้มีจำนวนครั้งของการกระจาย (Flooding) แพ็กเก็ตเพื่อบอกสถานะในโปรโตคอลการค้นหาเส้นทางเกิดบ่อยครั้ง ซึ่งในที่นี่จะแทนเป็นจำนวนโอเวอร์เฮด ดังรูปที่ 4.13 ที่จำนวนโอเวอร์เฮดมีค่าสูงขึ้นเมื่อการปรับเปลี่ยนพลังงานที่บ่อยครั้ง อย่างไรก็ตามก็มีบางจุดที่ไม่เป็นไปตามแนวโน้ม เช่นที่จุด  $X$  เท่ากับ 9 มีจำนวนโอเวอร์เฮดสูงกว่าที่  $X$  เท่ากับ 10 ซึ่งเกิดจากระยะห่างของคูนิดใด ๆ มีจำนวนครั้งการเปลี่ยนแปลงระหว่างค่าพลังงานในการส่งข้อมูลที่ใช้เนื่องจาก  $X$  เท่ากับ 9 มากกว่า ค่าพลังงานในการส่งข้อมูลที่ใช้เนื่องจาก  $X$  เท่ากับ 10

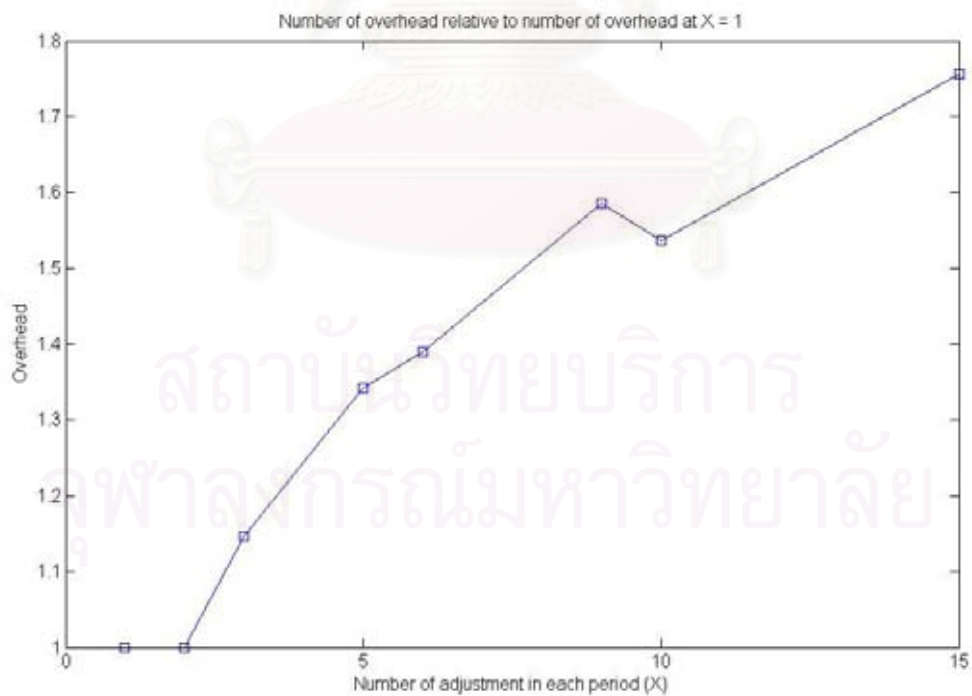


รูปที่ 4.11 การปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการส่งข้อมูลระหว่างนิต 2 และ นิต 3 เมื่อ  $X$  เท่ากับ 1, 9 และ 10

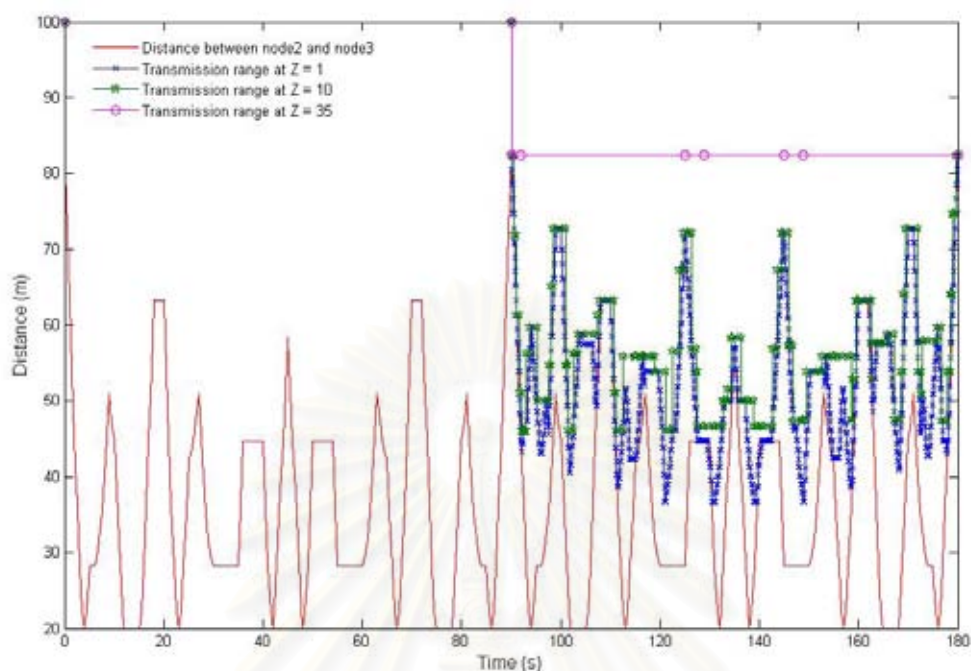




รูปที่ 4.12 พลังงานที่ถูกใช้โดยเปรียบเทียบกับพลังงานที่ถูกใช้เมื่อ X เท่ากับ 1

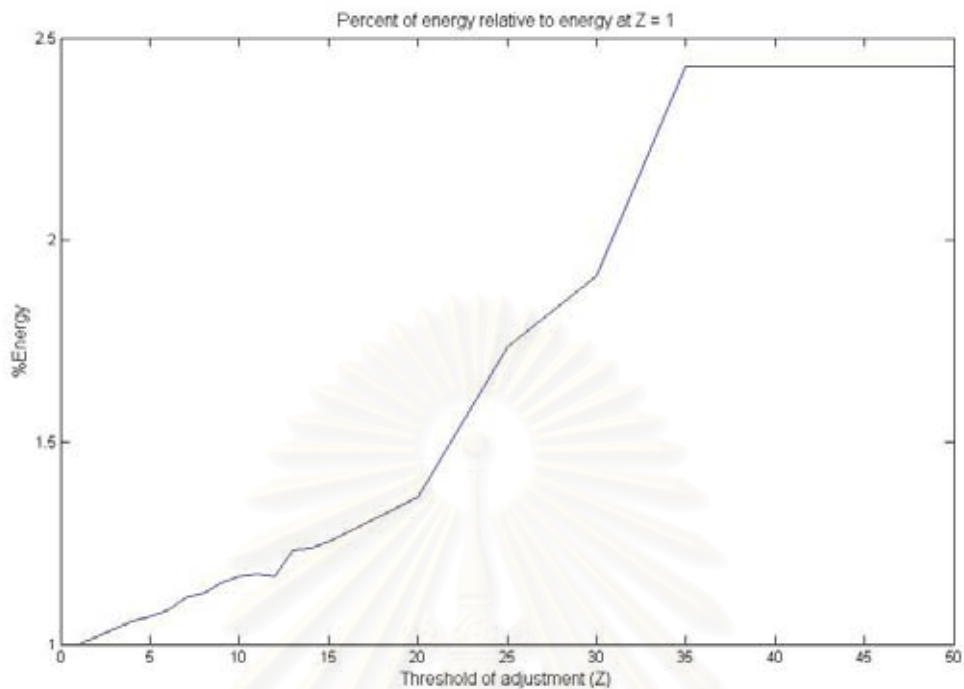


รูปที่ 4.13 จำนวนแพ็กเกตโอเวอร์เฮดเปรียบเทียบกับจำนวนแพ็กเกตโอเวอร์เฮดเมื่อ X เท่ากับ 1

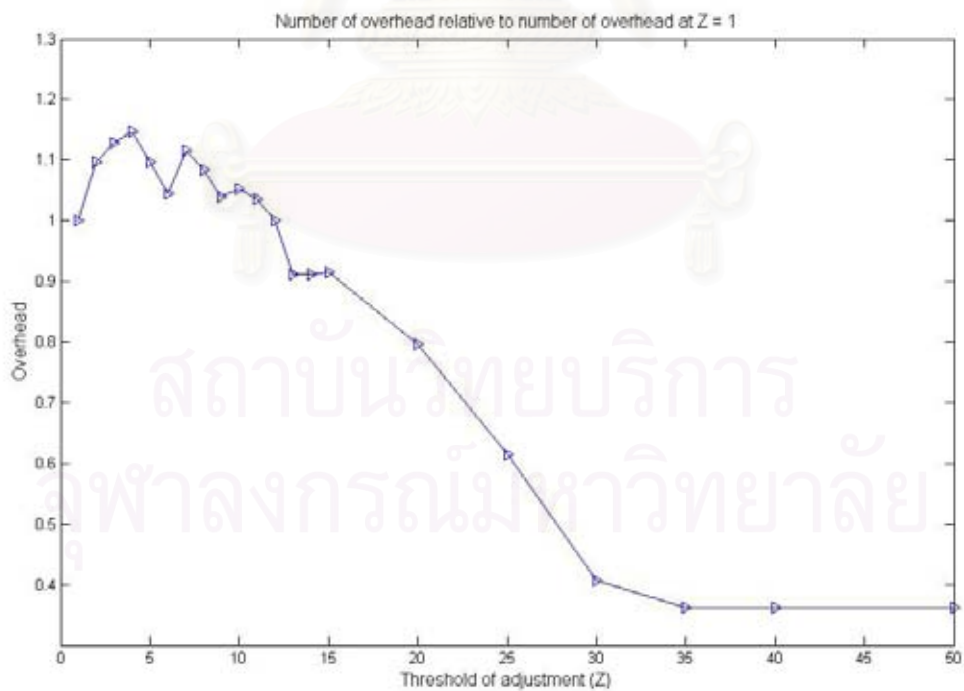


รูปที่ 4.14 การปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการส่งข้อมูลระหว่างโนด 2 และ โนด 3 เมื่อ  $Z$  เท่ากับ 1, 10 และ 35

ผลการจำลองส่วนที่สองนี้ จะทำการปรับเปลี่ยนพลังงานการส่งข้อมูลโดยขึ้นกับขีดเริ่มเปลี่ยน จะเห็นได้ว่าถ้าขีดเริ่มเปลี่ยนที่ใช้มีค่าน้อย ซึ่งทำให้โอกาสในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลมีค่าสูงหรือมีจำนวนครั้งของการปรับเปลี่ยนถี่ ดังรูปที่ 4.14 หมายความว่าถ้าใช้ค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่มีค่าต่ำ ก็จะทำให้โครงข่ายใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่มีค่าต่ำด้วย และเช่นเดียวกันกับการทดลองแรก เหล่านี้ส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในโครงข่ายมีค่าน้อยลงตามไปด้วย เมื่อค่า  $Z$  มากขึ้นดังรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 จำนวนของโอเวอร์เฮดในโครงข่ายจึงลดลงตามค่า  $Z$  ที่เพิ่มขึ้น ส่วนในช่วงต้นของกราฟจะมีการขึ้นลงหรือไม่เป็นตามแนวโน้ม ซึ่งมีสาเหตุจากการเปลี่ยนแปลงของระยะห่างระหว่างแต่ละคู่โนดที่เกิดจากการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ มีความถี่ในการขึ้นลงระหว่างค่าที่มากกว่าและค่าน้อยกว่าของระยะทางในการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่ได้จากค่าขีดเริ่มเปลี่ยนนั้น



รูปที่ 4.15 พลังงานที่ถูกใช้โดยเปรียบเทียบกับพลังงานที่ถูกใช้เมื่อ Z เท่ากับ 1



รูปที่ 4.16 จำนวนแพ็กเกตโอเวอร์เฮดเปรียบเทียบกับจำนวนแพ็กเกตโอเวอร์เฮดเมื่อ Z เท่ากับ 1

#### 4.1.5 สรุปผลของการปรับเปลี่ยพลังงานการส่งข้อมูลเมื่อการเคลื่อนที่ของโนดเป็นแบบรายคาบ

ในส่วนนี้ได้เสนอระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในโครงข่ายเมื่อโนดในโครงข่ายมีการเคลื่อนที่แบบรายคาบ และยังได้เสนอวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานการส่งข้อมูล 2 รูปแบบด้วยกัน โดยปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลที่เวลาคงที่ และปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลโดยขึ้นกับค่าขีดเริ่มเปลี่ยน ซึ่งผลในการจำลองนั้นได้ว่าถ้าใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่มีค่าน้อย จะทำให้ช่วยลดการใช้พลังงานของโครงข่ายลงได้ แต่เหล่านี้จะส่งผลถึงจำนวนครั้งที่เพิ่มขึ้นของการเปลี่ยนแปลงโทโพโลยี อย่างไรก็ตามวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลนั้นควรจะสามารถปรับเปลี่ยนตามลักษณะการเคลื่อนที่สัมพัทธ์ของแต่ละคู่โนดในโครงข่าย เพื่อที่จะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของการลดการใช้พลังงานได้

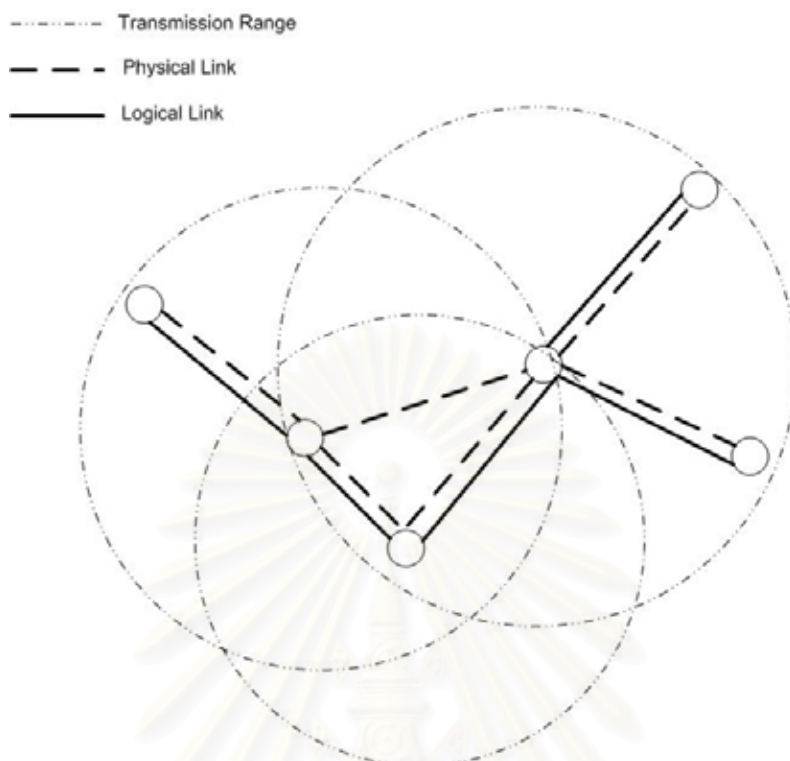
#### 4.2 การปรับเปลี่ยนพลังงานการส่งข้อมูลเมื่อการเคลื่อนที่ของโนดเป็นแบบสุ่ม

หัวข้อนี้เป็นการเสนอระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อช่วยลดการใช้พลังงานของโครงข่ายโดยโนดมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม ระเบียบวิธีนี้เป็นแบบกระจาย (Distributed Algorithm) เพื่อลดผลกระทบของการแพร่กระจายแพ็กเก็ตเนื่องจากการปรับเปลี่ยนของโทโพโลยี แต่ละโนดทำการส่งสัญญาณบีคอนอย่างเป็นรายคาบ และโนดสามารถรู้ระยะห่างของโนดข้างเคียงได้โดยอาศัยการวัดความแรงของสัญญาณที่ได้รับ ระเบียบวิธีนี้จะมีข่ายเชื่อมโยงสองประเภท

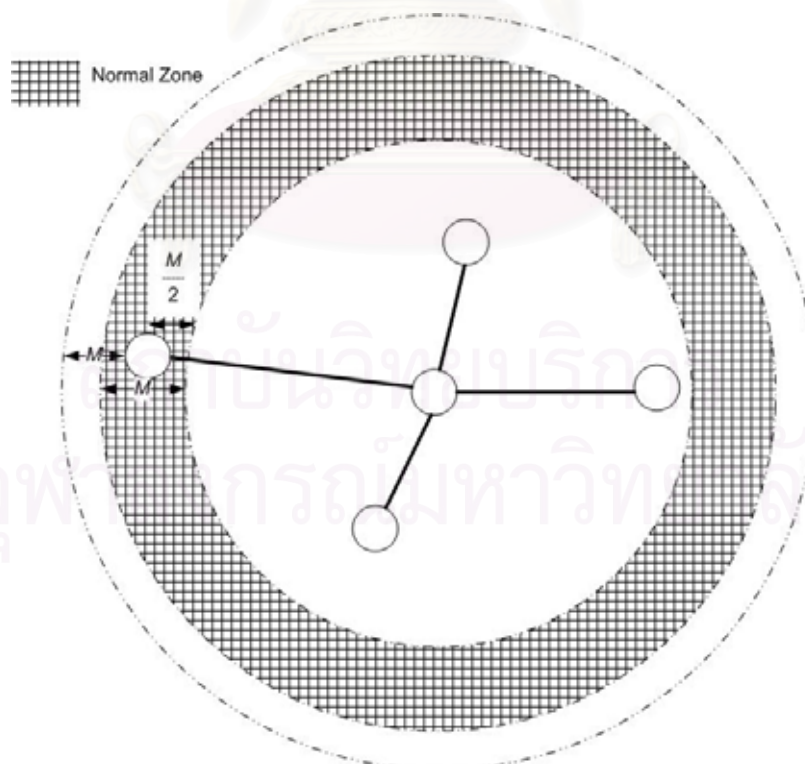
(1) ข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical Link) เป็นข่ายเชื่อมโยงระหว่างสองโนดใดๆอยู่ในช่วงระยะของการส่งข้อมูลของกันและกัน ซึ่งสองโนดนั้นสามารถส่งข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทาง

(2) ข่ายเชื่อมโยงทางตรรก (Logical Link) เป็นข่ายเชื่อมโยงที่แต่ละโนดจะเก็บรายชื่อของโนดข้างเคียงไว้ ซึ่งการเชื่อมต่อกับโนดข้างเคียงเหล่านี้ทำให้โครงข่ายสามารถเชื่อมต่อเป็นโครงข่ายต้นไม้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.17

ซึ่งรูปต่างๆที่เสนอในบทนี้แสดงถึงข่ายเชื่อมโยงทางตรรกเท่านั้น และพลังงานในการส่งข้อมูลที่แต่ละโนดใช้ ถูกกำหนดตามข่ายเชื่อมโยงทางตรรก โดยโนดพยายาม



รูปที่ 4.17 ข่ายเชื่อมโยงของโหนดในโครงข่าย



รูปที่ 4.18 การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อเชื่อมต่อข่ายเชื่อมโยงตรง

ปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลให้ครอบคลุมเฉพาะโหนดที่ถูกเชื่อมต่อด้วยข่ายเชื่อมโยงทางตรงกแสดงในรูปที่ 4.18 และพลังงานในการส่งข้อมูลจะเป็นตามสมการที่ (4.4)

$$TR_n = \min(\max(dist_{n,m}) + M, TR_{full}) \quad (4.4)$$

โดยที่

$TR_n$	คือ พลังงานการส่งข้อมูลที่โหนด $n$ (ม.)
$dist_{n,m}$	คือ รัห่างระหว่างโหนด $n$ กับโหนด $m$ ซึ่งเป็นโหนดที่มีข่ายเชื่อมโยงทางตรงก (ม.)
$TR_{full}$	คือ พลังงานการส่งข้อมูลสูงสุดที่โหนดสามารถใช้ได้ (ม.)
$M$	คือ รัห่างเพื่อป้องกันการขาดการเชื่อมต่อกจากการเคลื่อนที่ของโหนด มีค่าตามสมการที่ (4.5)(ม.)

$$M = k * Beacon\_Interval * v_{max} \quad (4.5)$$

โดยที่

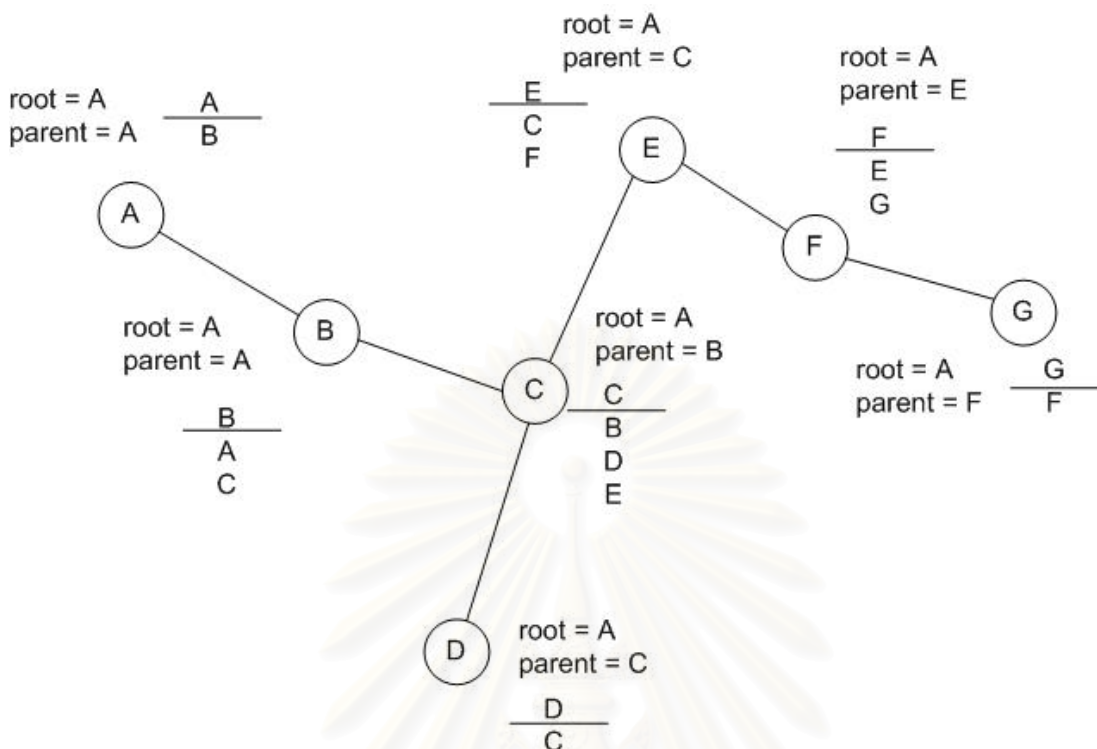
$k$	คือ ค่าคงที่
$Beacon\_Interval$	คือ ช่วงระยะเวลาของการแพร่กระจายแพ็กเก็ตคอนแต่ละครั้ง (วินาที)
$v_{max}$	คือ ความเร็วสูงสุดที่โหนดเคลื่อนที่ (เมตรต่อวินาที)

ในรูปที่ 4.18 ถ้าโหนดข้างเคียงที่ไกลที่สุดเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ปกติ โหนดจะทำการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล อย่างไรก็ตามถ้าโหนดที่ไม่ได้มีข่ายเชื่อมโยงตรงต่อกกับโหนดใด ๆ ในโครงข่าย โหนดนั้นก็จะใช้ค่าพลังงานการส่งข้อมูลสูงสุดเพื่อหาการเชื่อมต่อก

#### 4.2.1 พารามิเตอร์ของโหนดและชนิดของแพ็กเก็ต

##### พารามิเตอร์ของโหนด

$LNT_n$	ตารางโหนดข้างเคียงตรงก (Logical Neighbor Node Table) เก็บโหนดข้างเคียงที่โหนด $n$ จำเป็นต้องเชื่อมต่อกเพื่อให้โครงข่ายเป็นรูปต้นไม้
$root_n$	คือ ชื่อของโครงข่ายโยงที่โหนด $n$ กำลังเชื่อมต่อก
$parent_n$	คือ ชื่อโหนดที่อยู่ข้างหน้าโหนด $n$ หนึ่งโหนดในแต่ละโครงข่ายย่อย



รูปที่ 4.19 พารามิเตอร์ต่างๆ ในระเบียบวิธี

โดยที่ตัวอย่างของพารามิเตอร์เหล่านี้ถูกแสดงดังรูปที่ 4.19 ซึ่งโครงข่ายนี้มีโนด A เป็นรากของโครงข่าย

### ชนิดของแพ็กเกต

แพ็กเกตบีคอน (Beacon Packet) ประกอบด้วย

- $n_S$  : โหนดที่ทำการส่งแพ็กเกต (Source Node)
- $S_S$  : สถานะของโหนดที่ทำการส่งแพ็กเกต (Source Status)
- $L_S$  : ข่ายเชื่อมโยงตรรกะที่กำลังเชื่อมต่ออยู่ของโหนดที่ส่ง  $S$

### ชนิดของแพ็กเกตในสถานการณ์ปรับเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยงตรรกะระหว่างโครงข่ายย่อย

แพ็กเกตร้องขอการเชื่อมต่อ (Request Packet: REQ) ประกอบด้วย

- $n_S$  : โหนดที่ทำการส่งแพ็กเกต (Source Node)
- $n_R$  : โหนดปลายทาง (Destination Node)
- $root_S$  : รากของโหนดที่ส่งแพ็กเกต

แพ็กเก็ตตอบรับการเชื่อมต่อ (Reply Packet: REP) ประกอบด้วย

- $n_S$  : โหนดที่ทำการส่งแพ็กเก็ต (Source Node)
- $n_R$  : โหนดปลายทาง (Destination Node)
- $root_S$  : รุทของโหนดที่ส่งแพ็กเก็ต

แพ็กเก็ตตัดข่ายเชื่อมโยง (Disconnect Packet) ประกอบด้วย

- $n_S$  : โหนดที่ทำการส่งแพ็กเก็ต (Source Node)
- $n_R$  : โหนดปลายทาง (Destination Node)

แพ็กเก็ตปรับปรุงรูทและพาเรนต์ (Update Packet) ประกอบด้วย

- $n_S$  : โหนดที่ทำการส่งแพ็กเก็ต (Source Node)
- $n_R$  : โหนดปลายทาง (Destination Node)
- $parent_S$  : พาเรนต์ของโหนดที่ส่งแพ็กเก็ต

**ชนิดของแพ็กเก็ตในส่วนของารปรับเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยงตรรกภายในโครงข่ายย่อย**

แพ็กเก็ตรบกวน (Interrupt Packet) ประกอบด้วย

- $n_S$  : โหนดที่ทำการส่งแพ็กเก็ต (Source Node)
- $n_{INT}$  : โหนดรบกวน (Interrupt Node)
- $n_{DEC}$  : โหนดตัดสินใจ (Decision Node)
- $n_{ACC}$  : โหนดตอบรับ (Accept Node)
- $parent_{INT}$  : พาเรนต์ของโหนดรบกวน

แพ็กเก็ตตัดสินใจ (Decision Packet) ประกอบด้วย

- $n_S$  : โหนดที่ทำการส่งแพ็กเก็ต (Source Node)
- $n_{INT}$  : โหนดรบกวน (Interrupt Node)
- $n_{DEC}$  : โหนดตัดสินใจ (Decision Node)
- $n_{ACC}$  : โหนดตอบรับ (Accept Node)
- $parent_{DEC}$  : พาเรนต์ของโหนดตัดสินใจ

Topology Changed Bit : บิตสำหรับบอกการเปลี่ยนแปลงของโทโพโลยี



$NL_{u,v}$	: คู่โหนด $u$ และ $v$ ที่จะเป็นข่ายเชื่อมโยงตรรกใหม่
$delay_{INT}$	: ค่าหน่วยเวลาสำหรับโหนดรบกวน

แพ็กเก็ตตอบรับ (Accept Packet) ประกอบด้วย

$n_S$	: โหนดที่ทำการส่งแพ็กเก็ต (Source Node)
$n_{INT}$	: โหนดรบกวน (Interrupt Node)
$n_{DEC}$	: โหนดตัดสินใจ (Decision Node)
$n_{ACC}$	: โหนดตอบรับ (Accept Node)
$parent_{INT,DEC,ACC}$	: พาเรนต์ใหม่ของโหนดทั้งสามชนิด

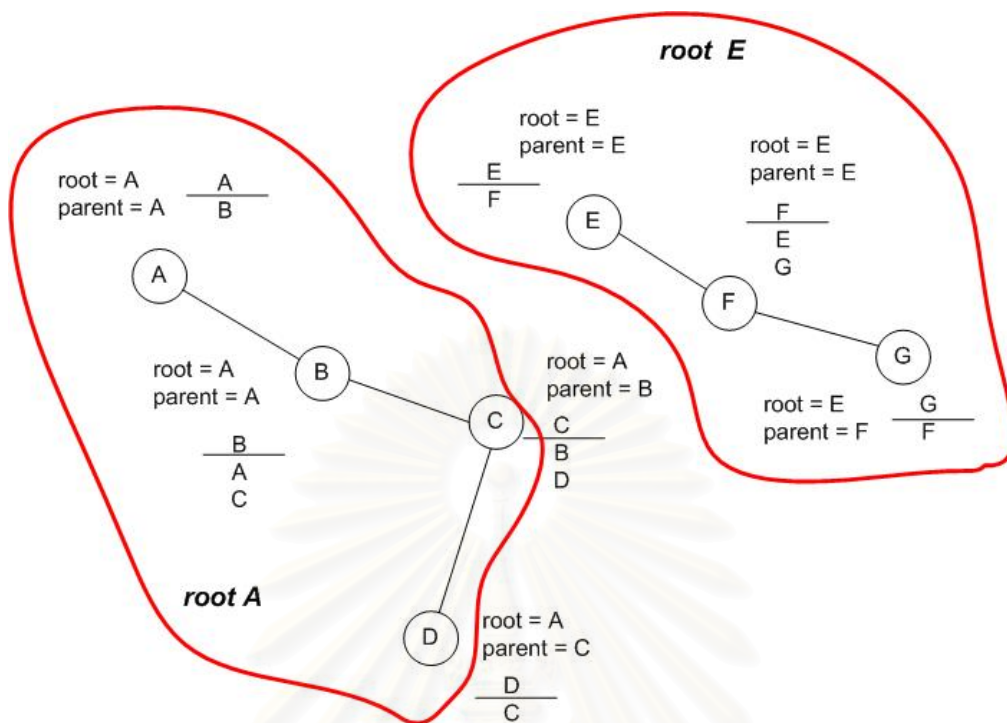
#### 4.2.2 สถานะเริ่มต้นของโครงข่าย

ที่เวลาเริ่มต้นทุกโหนดจะมีค่าพาเรนต์ (Parent) และราก (Root) เท่ากับตัวเอง และจะใช้ระเบียบวิธีในการสร้างโครงข่ายรูปต้นไม้ที่ได้มีการเสนอในบทที่ 3 และเก็บโหนดที่จำเป็นต้องเชื่อมต่อเพื่อสร้างโครงข่ายต้นไม้ในตารางโหนดข้างเคียงตรรก (Logical Neighbor Node Table) เพื่อใช้สำหรับทำการปรับเปลี่ยนค่าพลังงานในการส่งข้อมูล ขึ้นตอนถัดไปเป็นการตั้งค่ารากและพาเรนต์เริ่มต้นให้กับแต่ละโหนด โดยโหนดที่มีหมายเลขที่อยู่ (ID ที่แต่ละโหนด) ต่ำสุดทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตปรับปรุงรูปไปตามโครงข่าย เมื่อโหนดได้รับแพ็กเก็ตปรับปรุงรูป จะตรวจเช็คค่าพาเรนต์ของโหนดต้นทางที่ส่งนั้นไม่ตรงกับตัวมันเองและตัวมันเองมีข่ายเชื่อมโยงตรรกเชื่อมถึงโหนดต้นทาง ก็จะเก็บโหนดต้นทางเป็นพาเรนต์และเปลี่ยนค่ารากตามรากในแพ็กเก็ตปรับปรุงรูป จากนั้นจะแพร่กระจายแพ็กเก็ตปรับปรุงโดยใช้ข้อมูลของตัวเองให้กับโหนดอื่น แต่ถ้าพาเรนต์ของโหนดต้นทางที่ส่งนั้นตรงกับตัวมันเองหรือไม่มีข่ายเชื่อมโยงตรรกเชื่อมถึงกัน ก็จะทิ้งแพ็กเก็ตนี้ ซึ่งจะได้โครงข่ายเป็นดังรูปที่ 4.19 โหนด  $A$  จะเป็นโหนดที่เริ่มต้นการแพร่กระจายแพ็กเก็ตปรับปรุงรูป ไปยังโหนด  $B$  โหนด  $B$  ก็จะทำการปรับปรุงข้อมูลต่างๆ ตามแพ็กเก็ต แล้วจึงทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตปรับปรุงรูปของตัวเอง เมื่อโหนด  $A$  ได้รับแพ็กเก็ตปรับปรุงรูปจากโหนด  $B$  ก็จะทิ้งแพ็กเก็ตนี้ ในทางกลับกันโหนด  $C$  จะทำการปรับปรุงข้อมูลแล้วทำการแพร่กระจายต่อไปจนทั่วโครงข่าย

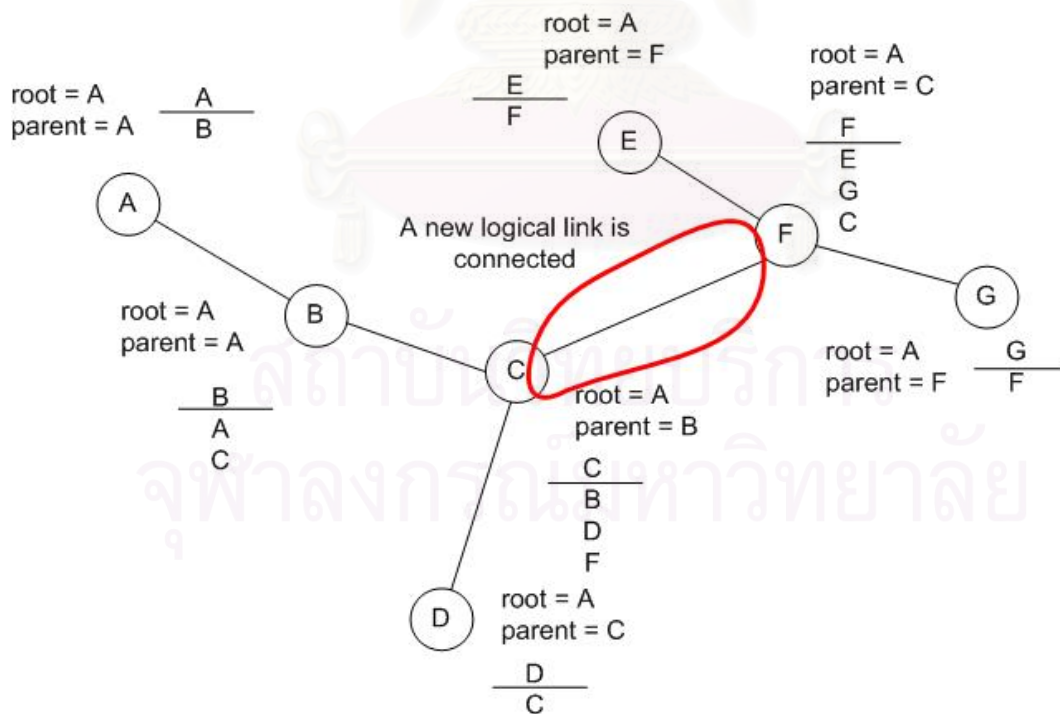
### 4.2.3 การปรับเปลี่ยนโครงข่ายรูปต้นไม้ระหว่างโครงข่ายย่อย

ระเบียบวิธีส่วนนี้จะเป็นการปรับเปลี่ยนรูปร่างของโครงข่ายเมื่อโครงข่ายมีการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมต่อ เช่น การแยกจากโครงข่ายใหญ่เป็นโครงข่ายย่อยเนื่องจากระยะห่างระหว่างโนดเกินค่าพลังงานการส่งข้อมูลสูงสุด ดังรูปที่ 4.20 ซึ่งโนด  $E$  ขาดการเชื่อมต่อกับพาเรนธ์ จึงทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตปรับปรุงรูทไปยังโนดที่เป็นโนดลูก เมื่อโนดที่มีโนด  $E$  เป็นพาเรนธ์ได้รับแพ็กเก็ตปรับปรุงรูทนี้และตรวจเช็คค่าโนด  $E$  เป็นพาเรนธ์จึงทำการเปลี่ยนค่ารูท แล้วแพร่กระจายแพ็กเก็ตปรับปรุงรูทไปยังโนดลูกต่อไป ซึ่งในที่นี้จะได้โครงข่ายย่อยสองโครงข่าย นั่นคือโครงข่ายย่อยรูท  $A$  และโครงข่ายย่อยรูท  $E$  นอกจากนี้ยังมีกรณีที่โครงข่ายย่อยมีการกลับมาเชื่อมต่อกันอีกครั้ง แสดงในรูปที่ 4.21 ซึ่งโนด  $C$  และโนด  $F$  ทำการเชื่อมต่อกัน โหนด  $F$  อยู่ในโครงข่ายที่มีลำดับสูงกว่า ดังนั้นโครงข่ายของโนด  $F$  จึงเป็นฝ่ายถูกรวมเข้ากับโครงข่ายของโนด  $C$  โดยโนด  $F$  ทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตปรับปรุงรูทเมื่อโนด  $E$  และโนด  $G$  ได้รับแพ็กเก็ตนี้แล้วรูทของมันมีค่าสูงกว่าก็จะเปลี่ยนรูทและเปลี่ยนพาเรนธ์ของตัวเอง แล้วจึงทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตนี้ต่อไป ซึ่งในกรณีดังกล่าวระเบียบวิธีนี้พยายามปรับเปลี่ยนการเชื่อมต่อของข่ายเชื่อมโยงตรรกให้กับมาเป็นโครงข่ายรูปต้นไม้อีกครั้ง กลไกการทำงานของระเบียบวิธีนี้จะถูกอธิบายในส่วนถัดไป

ระเบียบวิธีนี้แบ่งเป็นสามส่วน ส่วนแรกเป็นส่วนของการเชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายย่อยสองโครงข่าย ส่วนที่สองเป็นส่วนของการที่โครงข่ายขาดการเชื่อมต่อเป็นโครงข่ายย่อยสองโครงข่าย และส่วนสุดท้ายเป็นการปรับปรุงค่ารูท และพาเรนธ์ในโครงข่ายย่อย



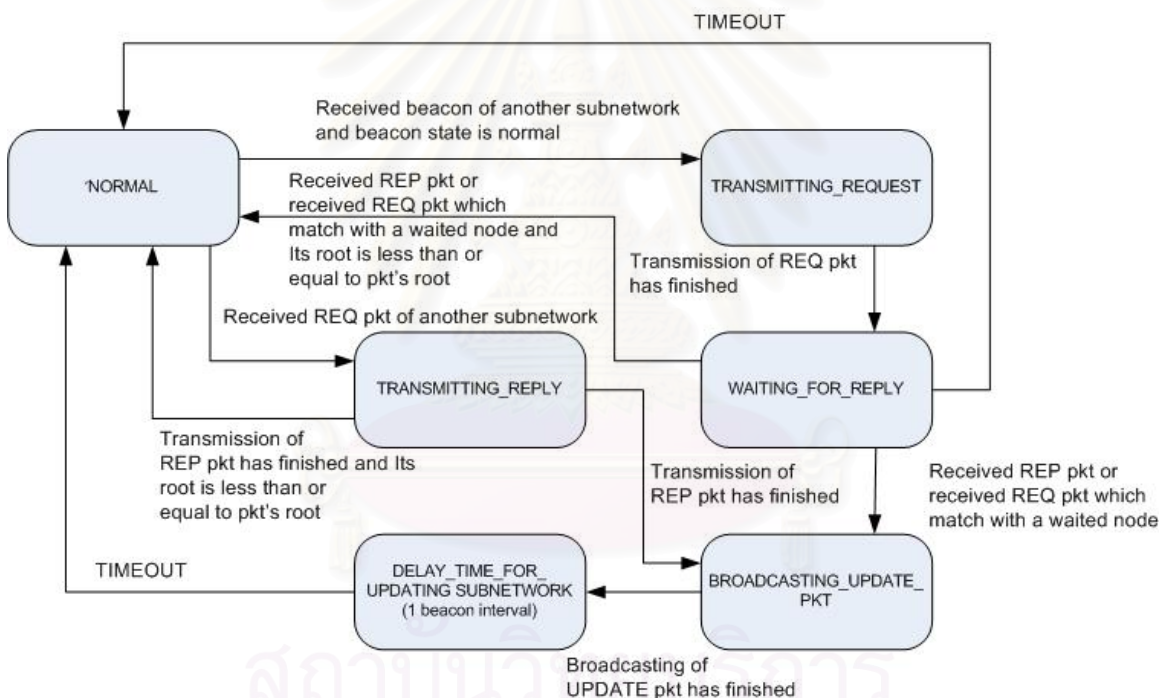
รูปที่ 4.20 การขาดการเชื่อมต่อของโครงข่ายต้นไม้



รูปที่ 4.21 การเชื่อมต่อของโครงข่ายย่อยสองโครงข่าย

### การเชื่อมต่อสองโครงข่ายย่อย

การเชื่อมต่อสองโครงข่ายย่อยนั้นอธิบายโดยใช้สเตตแมชชีนในรูปที่ 4.22 ซึ่งการเชื่อมต่อนี้เกิดจากการที่โหนดใดๆ ในโครงข่ายย่อยหนึ่งได้รับสัญญาณบีคอนของโหนดในโครงข่ายย่อยอื่น และทั้งสองโหนดอยู่ในสถานะปกติ จึงทำการตรวจเช็คระยะห่าง โดยถ้าระยะห่างระหว่างสองโหนดนี้ น้อยกว่า  $TR_{full} - M$  โหนดสองโหนดนี้สรุปได้ว่าจะสามารถเชื่อมต่อกันได้ ขั้นตอนนี้ทำเพื่อแน่ใจว่าโครงข่าย หลังการเชื่อมต่อจะมีช่วงเวลาการเชื่อมต่อที่พอเหมาะหรือป้องกันการขาดการเชื่อมต่อทันทีทันใด หลังจากนั้นจึงทำการเก็บค่าโหนดและรูทของโหนดที่จะทำการเชื่อมต่อและส่งแพ็กเก็ตร้องขอการเชื่อมต่อ (Request Packet: REQ) เพื่อร้องขอการเชื่อมต่อ แล้วเปลี่ยนไปยังสถานะ WAITING\_FOR\_REPLY



รูปที่ 4.22 สเตตแมชชีนของการเชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายย่อย

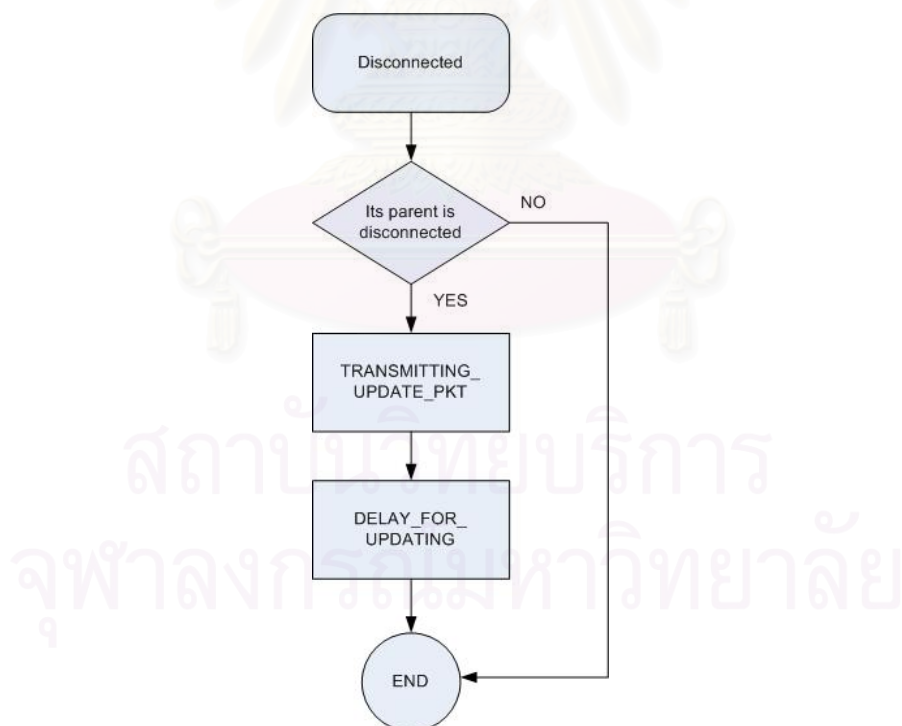
เพื่อรอคอยการตอบรับ เมื่อได้รับแพ็กเก็ตตอบรับ (Reply Packet: REP) หรือแพ็กเก็ตร้องขอการเชื่อมต่อ โดยโหนดต้นทางเป็นโหนดที่ต้องการเชื่อมต่อ โหนดจะทำการเชื่อมต่อกับโหนดต้นทางของแพ็กเก็ต หลังจากนั้นถ้ารูทของมันมีค่ามากกว่ารูทของโหนดที่กำลังเชื่อมต่อก็เปลี่ยนค่ารูท และไปยังสถานะ BROADCASTING\_UPDATE\_PKT จึงแพร่กระจายแพ็กเก็ตปรับปรุง (Update Packet) เพื่อ

ปรับปรุงข้อมูลในโครงข่ายย่อยเดิมของตัวเอง แล้วเปลี่ยนไปยังสถานะหน่วงเวลา (1 ช่วงเวลาของการส่งบิตคอน) เพื่อคอยการปรับปรุงโครงข่ายย่อยแล้วจึงเปลี่ยนกลับสถานะปกติ

โหนดที่อยู่ในสถานะปกติ ถ้าได้รับแพ็กเก็ตร้องขอการเชื่อมต่อ ของโหนดในโครงข่ายย่อยอื่น จะส่งแพ็กเก็ตตอบรับและทำการเชื่อมต่อโครงข่ายย่อย จากนั้นถ้ารูทของมันมีค่ามากกว่ารูทของโหนดที่กำลังเชื่อมต่อก็เปลี่ยนค่ารูท และแพร่กระจายแพ็กเก็ตปรับปรุง เพื่อปรับปรุงข้อมูลในโครงข่ายย่อยเดิมของตัวเอง แล้วเปลี่ยนไปยังสถานะหน่วงเวลา เพื่อคอยการปรับปรุงโครงข่ายย่อยแล้วจึงเปลี่ยนกลับสถานะปกติ

### โครงข่ายขาดการเชื่อมต่อเป็นโครงข่ายย่อยสองโครงข่าย

เมื่อข่ายเชื่อมโยงทางตรรกของโหนดขาดการเชื่อมต่อ ถ้าโหนดที่หลุดออกไปเป็นพาเรนท์ของตัวโหนดเอง จะทำการแจ้งถึงการเปลี่ยนแปลงไปยังโหนดลูก โดยการส่งแพ็กเก็ตปรับปรุงรูทไปยังโหนดลูก แล้วจึงทำการหน่วงเวลาสำหรับการปรับปรุงข้อมูลในโครงข่ายย่อยของตัวเอง ดังอธิบายในรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.23 ผังงานเมื่อข่ายเชื่อมโยงทางตรรกมีการขาดการเชื่อมต่อ

## การปรับปรุงค่ารูท และพาเรนทีในโครงข่ายย่อย

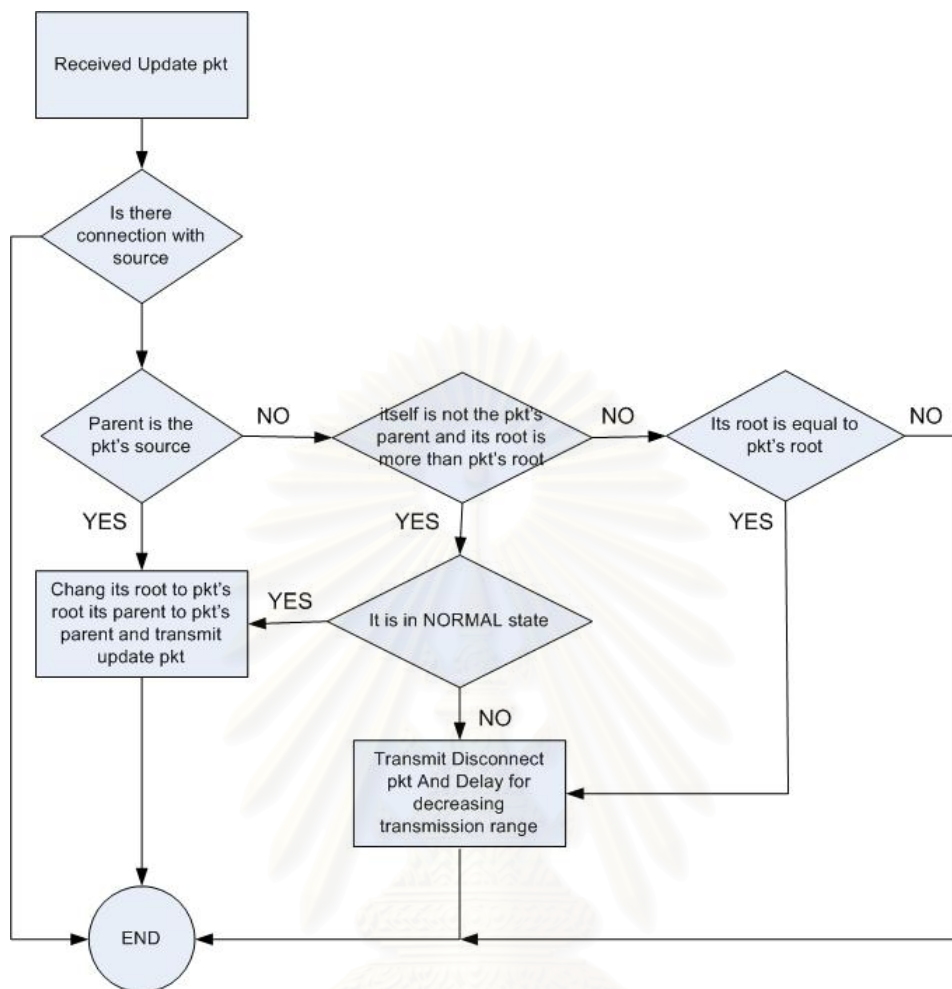
ในส่วนนี้เป็นการอธิบายถึงเมื่อใดที่ต้องปรับเปลี่ยนค่ารูทของโครงข่ายย่อยของตัวเอง ซึ่งหมายความว่าเมื่อใดใดในโครงข่ายย่อยขาดการเชื่อมต่อหรือเชื่อมต่อใหม่กับโครงข่ายย่อยอื่น ในการเปลี่ยนแปลงทั้งสองแบบนี้จะมีการส่งแพ็กเก็ตปรับปรุงภายในโครงข่ายย่อยนั้นๆ เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่ารูทที่แต่ละโหนด เมื่อโหนดรับแพ็กเก็ตนี้ จะมีกระบวนการการคิดดังนี้ โหนดที่ส่งและรับมีสายเชื่อมโยงตอระหว่างกัน จะทำการแบ่งเป็นสามกรณี ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.24 นั่นคือ

กรณีที่ 1 ถ้าโหนดที่ส่งเป็นพาเรนที จะทำการปรับปรุงรูทแล้วส่งแพ็กเก็ตปรับปรุงถึงโหนดอื่นๆในโครงข่ายของมันเองทันที

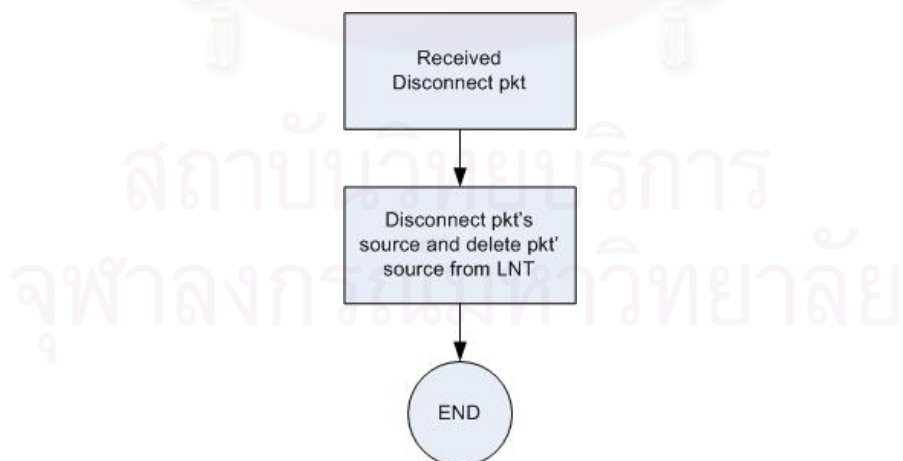
กรณีที่ 2 โหนดที่ส่งแพ็กเก็ตไม่เป็นพาเรนทีและมีรูทต่ำกว่ารูทในแพ็กเก็ตซึ่งกรณีนี้โหนดที่รับต้องอยู่ในสถานะ NORMAL จึงจะทำการเปลี่ยนค่ารูทและเปลี่ยนค่าพาเรนทีของมันให้มีค่าเท่ากับโหนดที่ส่งแพ็กเก็ต (Source Node) จากนั้นจึงส่งแพ็กเก็ตปรับปรุงถึงโหนดอื่น แต่ถ้าตัวมันไม่ได้ อยู่ในสถานะ NORMAL ก็ จะทำการส่งแพ็กเก็ตเพื่อแจ้งถึงโหนดที่ส่งแพ็กเก็ตให้ตัดสายเชื่อมโยงตอระหว่างกันออก แล้วจากนั้นจึงปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลของตัวเอง

กรณีที่ 3 โหนดที่ส่งแพ็กเก็ตไม่เป็นพาเรนทีและมีรูทเท่ากับรูทในแพ็กเก็ตซึ่งกรณีนี้ แสดงว่าเกิดลูปในโครงข่ายย่อยของมัน ดังนั้นโหนดจะส่งแพ็กเก็ตเพื่อแจ้งถึงโหนดที่ส่งให้ตัดสายเชื่อมโยงตอระหว่างกันออก แล้วจากนั้นจึงปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลของตัวเอง

เมื่อโหนดใดๆ ได้รับแพ็กเก็ตเพื่อตัดสายเชื่อมโยงก็จะตัดสายเชื่อมโยงตามแพ็กเก็ตที่ได้รับ จากนั้นจึงปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล ดังรูปที่ 4.25



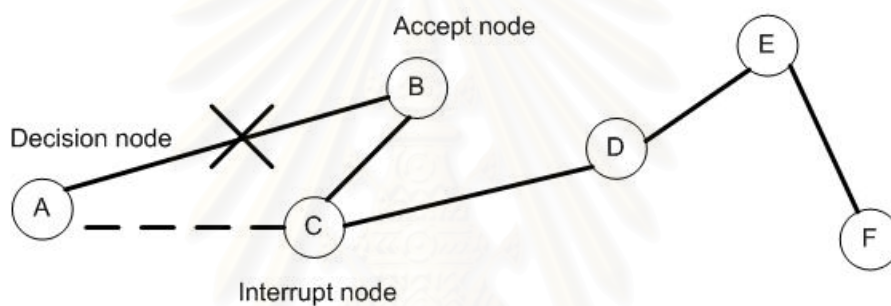
รูปที่ 4.24 ผังงานเมื่อโนดรับแพ็กเก็ตปรับปรุงรูทและพาเรนต์



รูปที่ 4.25 ผังงานเมื่อโนดรับแพ็กเก็ตสำหรับตัดข้ายเชื่อมต่อ

#### 4.2.4 การปรับเปลี่ยนโครงข่ายรูปต้นไม้ภายในโครงข่ายย่อย

ส่วนนี้จะเป็นการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อให้ข่ายเชื่อมโยงตรรกเป็นโครงข่ายต้นไม้ที่มีระยะห่างโดยรวมระหว่างคูนิดน้อย ดังรูปที่ 4.26 เส้นทึบเป็นข่ายเชื่อมโยงตรรกเดิม แต่เมื่อโนด  $B$  มีการเคลื่อนที่ออกห่างโนด  $C$  หรือโนด  $C$  เคลื่อนที่เข้ามาใกล้โนด  $A$  ซึ่งเป็นผลให้ระยะห่างระหว่างโนด  $A$  และโนด  $B$  มีค่ามากกว่า ระยะห่างระหว่างโนด  $B$  และโนด  $C$  จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ควรเปลี่ยนแปลงการเชื่อมต่อนอกจากโนด  $A$  ไปยังโนด  $C$  แทน โดยการปรับเปลี่ยนในระเบียบวิธีส่วนนี้เป็นการปรับเปลี่ยนภายในโครงข่ายย่อยเดียวกันเอง (มีค่ารูทเท่ากัน) ซึ่งทำให้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่ารูทที่แต่ละโนด



รูปที่ 4.26 การปรับเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยงทางตรรกในโครงข่ายย่อย

ในที่นี้จะเรียกโนด  $C$  ว่าโนดรบกวน (Interrupt node) ซึ่งเป็นโนดที่เข้ามาทำการรบกวนข่ายเชื่อมโยงตรรกของคูนิดใดๆ โหนด  $A$  คือโนดตัดสินใจ (Decision Node) โดยโนดนี้จะมีระยะห่างระหว่างโนด  $C$  มากกว่าโนด  $B$  ( $AC \geq BC$ ) โหนดนี้ทำหน้าที่ตัดสินใจว่าเมื่อไรควรจะมีการปรับเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยงและระบุข่ายเชื่อมโยงตรรกใหม่ของโทโพโลยี และโนด  $B$  คือโนดตอบรับ (Accept Node) ซึ่งเป็นโนดที่คอยกำหนดถึงการเปลี่ยนแปลงพาเรนทีที่แต่ละโนด

รูปที่ 4.27 เป็นสเตตแมชชีนของโนดรบกวน ซึ่งเมื่อโนดที่อยู่สถานะปกติค้นพบว่าตัวเองเข้าไปอยู่ในช่วงพลังงานส่งข้อมูลของข่ายเชื่อมโยงตรรกของสองโนดใดๆ จะเก็บค่าสองโนดนั้นและสุ่มค่าเวลาแบบยูนิฟอร์มระหว่างศูนย์ถึงหนึ่งวินาที ซึ่งเป็นเวลาที่จะใช้อยู่ในสถานะ PRE-INTERRUPT พอหมดช่วงเวลาดังกล่าวนี้ ถ้าสองโนดใดๆ ไม่อยู่ในสถานะปกติก็จะกลับไปยังสถานะปกติ แต่ถ้าสองโนดนั้นยังคงอยู่ในสถานะปกติ ก็จะเปลี่ยนไปยังสถานะ TRANSMITTING\_INT\_PKT แล้วกำหนดโนดตัดสินใจกับโนดตอบรับระหว่างสองโนดที่ถูกรบกวน แล้วจึงส่งแพ็กเกตรบกวนจากนั้นเปลี่ยนไปยังสถานะ WAITING\_FOR\_DEC\_PKT เพื่อคอยรับแพ็กเกตตัดสินใจ เมื่อ

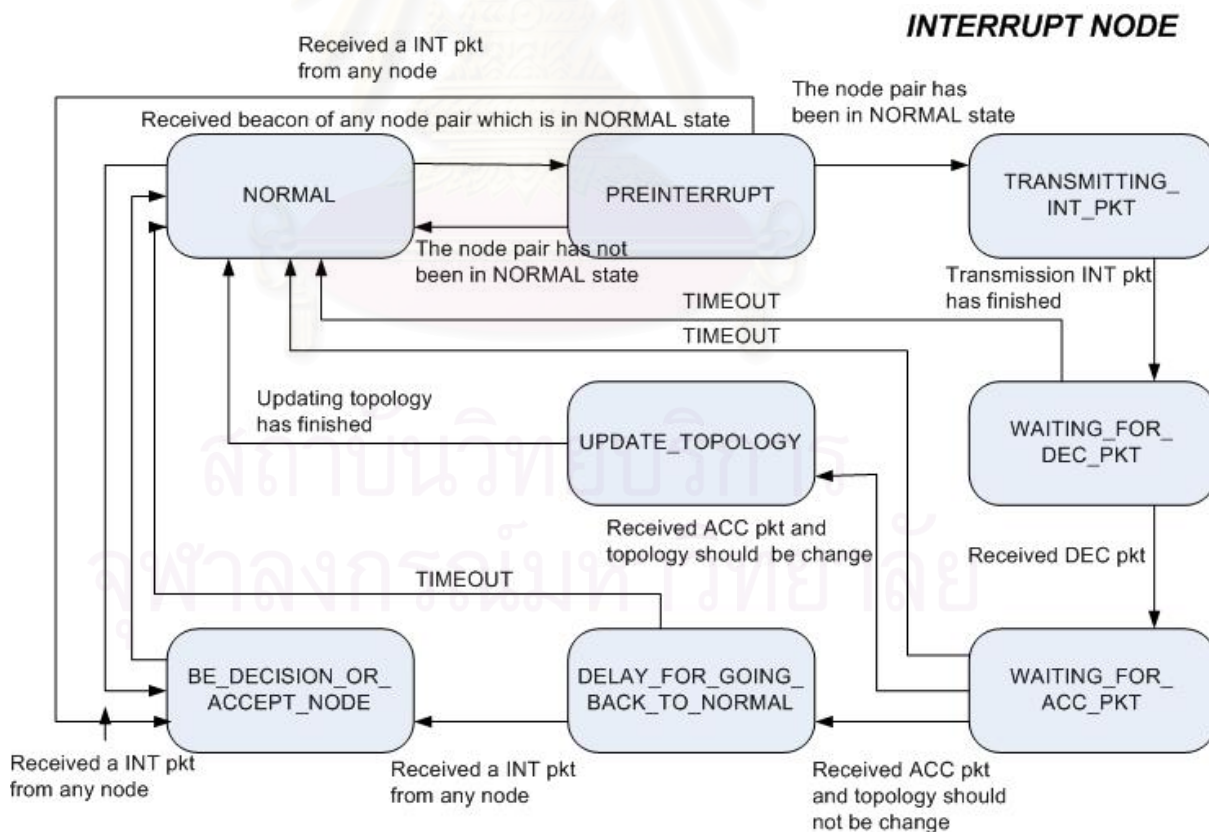


ได้รับแพ็กเก็ตตัดสินใจ ก็จะเปลี่ยนเป็นสถานะ WAITING\_FOR\_ACC\_PKT เพื่อคอยการรับแพ็กเก็ตตอบรับ หลังจากได้รับแพ็กเก็ตตอบรับถ้าโทโพโลยีควรมีการเปลี่ยนแปลงซึ่งทราบได้จากแพ็กเก็ตตัดสินใจ จึงทำการเชื่อมข่ายเชื่อมโยงตวรรษใหม่ แล้วปรับปรุงค่าพาเรนต์ตามข้อมูลในแพ็กเก็ตตอบรับ อย่างไรก็ตามก็ดี ถ้า โทโพโลยี ไม่ ควร เปลี่ยน แปลง ก็ จะ ไป ยัง สถานะ DELAY\_FOR\_GOING\_BACK\_TO\_NORMAL เพื่อทำการหน่วงเวลาซึ่งเป็นการป้องกันการเกิดการรบกวนข่ายเชื่อมโยงตวรรษที่ซ้ำซ้อน โดยค่าที่หน่วงเวลาดำนวนได้จากสมการที่ 4.6 แล้วจึงกลับไปยังสถานะปกติ

$$Time = \frac{(Dist_{DEC,INT} - Dist_{DEC,ACC})}{v} \tag{4.6}$$

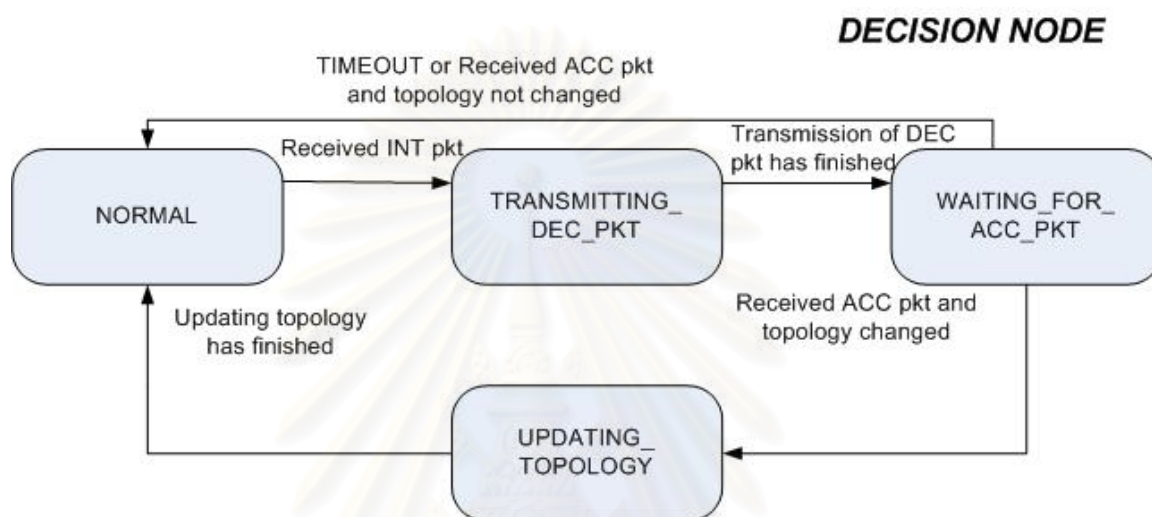
โดยที่

- Time* คือ เวลาที่คำนวณได้ (วินาที)
- Dist<sub>u,v</sub>* ระยะห่างระหว่างสองโหนด *u* และ *v* ใดๆ (เมตร)
- v* ความเร็วเฉลี่ยของโหนด (เมตรต่อวินาที)



รูปที่ 4.27 สเตทแมชชีนของโนตรบกวน

อย่างไรก็ดีระหว่างขณะที่โหนดอยู่ที่สามสถานะ ซึ่งคือ NORMAL, PREINTERRUPT และ DELAY\_FOR\_GOING\_BACK\_TO\_NORMAL ถ้ามันได้รับแพ็กเก็ตทรบกวอน ก็จะสามารถที่จะเป็นโหนดตัดสินใจหรือโหนดตอบรับได้ และเมื่อเสร็จกระบวนการจึงกลับไปสู่สถานะปกติ

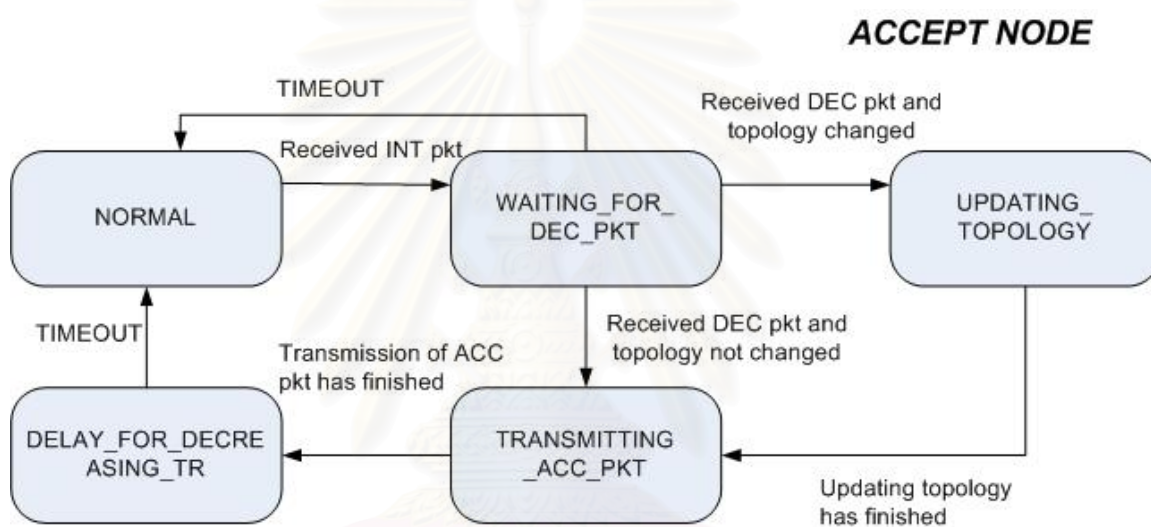


รูปที่ 4.28 สเตตแมชชีนของโหนดตัดสินใจ

เมื่อโหนดใดๆ ได้รับแพ็กเก็ตทรบกวอนแล้วมีการระบุว่าตัวมันเองเป็นโหนดตัดสินใจ ก็จะทำกรคำนวณถึงระยะระหว่างข่ายเชื่อมโยงตกรกเดิมกับข่ายเชื่อมโยงตกรกใหม่ ถ้าข่ายเชื่อมโยงตกรกใหม่มีค่าน้อยกว่าก็จะทำการเปลี่ยนแปลงโทโพลยีและทำการกำหนดถึงโหนดที่จะทำการสร้างข่ายเชื่อมโยงตกรกใหม่ แต่ถ้าข่ายเชื่อมโยงตกรกใหม่มีค่ามากกว่าจะคำนวณช่วงเวลาของการหน่วงเวลาสำหรับโหนดทรบกวอนโดยใช้สมการที่ 4.6 ซึ่งเมื่อเสร็จขั้นตอนนี้จึงทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตตัดสินใจแล้วเปลี่ยนไปยังสถานะ WAITING\_FOR\_ACC\_PKT หลังจากได้รับแพ็กเก็ตตอบรับและไม่มีการเปลี่ยนแปลงโทโพลยี หรือสิ้นสุดเวลาการคอยจะทำการกลับไปยังสถานะปกติ อย่างไรก็ตามถ้าโทโพลยีมีการเปลี่ยนแปลงจะไปยังสถานะ UPDATING\_TOPOLOGY และตัดข่ายเชื่อมโยงเดิมทิ้ง แล้วถ้าตัวมันเองเป็นโหนดที่ต้องสร้างข่ายเชื่อมโยงใหม่ก็จะเชื่อมต่อกับข่ายเชื่อมโยงใหม่ หลังจากนั้นจะทำการปรับปรุงพารามิเตอร์ของมันเองตามข้อมูลในแพ็กเก็ตตอบรับแล้วกลับไปยังสถานะปกติ

รูปที่ 4.29 เป็นการทํางานของโหนดตอบรับซึ่งมีหน้าที่ระบุการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของแต่ละโหนด โหนดเมื่อโหนดใดๆ ที่อยู่สถานะ NORMAL ได้รับแพ็กเก็ตทรบกวอนแล้วระบุว่าตัวมันเองเป็นโหนดตอบรับ ก็จะไปยังสถานะ WAITING\_FOR\_DEC\_PKT เพื่อรอรับแพ็กเก็ตตัดสินใจ เมื่อ

ได้รับแพ็กเก็ตตัดสินใจถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงโทโพโลยี ก็จะไปยังสถานะ TRANSMITTING\_ACC\_PKT โหนดก็จะทำการแพร่กระจายแพ็กเก็ตตอบรับ แต่ถ้าโทโพโลยีมีการเปลี่ยนแปลง จะไปยังสถานะ UPDATING\_TOPOLOGY และตัดขาดเชื่อมโยงเก่าทิ้ง ถ้าเป็นโหนดที่ต้องสร้างข่ายเชื่อมโยงใหม่จะสร้างข่ายเชื่อมโยง แล้วเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ จากนั้นไปยังสถานะ TRANSMITTING\_ACC\_PKT และแพร่กระจายแพ็กเก็ตตอบรับ ถัดมาจะไปยังสถานะ DELAY\_FOR DECREASING\_TR เพื่อหน่วงเวลาสำหรับการลดพลังงานการส่งข้อมูล เมื่อสิ้นสุดกระบวนการนี้ก็กลับไปยังสถานะปกติ



รูปที่ 4.29 สเตตแมชชีนของโหนดตอบรับ

#### 4.2.5 การจำลองระเบียบวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่ง

ในส่วนนี้จะทำการจำลองระเบียบวิธีที่ได้ทำการเสนอมา เพื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการที่โครงข่ายไม่ใช้การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล ส่วนแรกจะกล่าวถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำลอง และส่วนที่สองจะทำการแสดงและวิเคราะห์ผลการทดลอง

##### 4.2.5.1 สภาวะแวดล้อมของการจำลอง

การจำลองนี้เขียนโดยใช้โปรแกรม C++ ซึ่งเป็นการจำลองชนิดเหตุการณ์เต็มหน่วย (Discrete Event Simulation) ในส่วนของชั้นโครงข่ายสื่อสารย่อย MAC จะใช้มาตรฐาน IEEE

802.11b และชั้นโครงข่ายจะใช้โปรโตคอลการหาเส้นทางแบบการเลือกเส้นทางแบบพิจารณาสถานะการเชื่อมต่อ แต่ละโหนดมีพลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุดได้ไกลถึง 250 ม. ทุกโหนดสามารถเป็นตัวกำเนิดแพ็กเก็ตข้อมูลได้ โดยมีช่วงเวลากการเข้าของแต่ละแพ็กเก็ตอย่างเอ็กซ์โปเนนเชียลเฉลี่ยเท่ากับ 0.5 วินาทีต่อแพ็กเก็ต โดยการจำลองจะใช้เวลาทั้งหมด 1000 วินาที การจำลองนี้จะแบ่งเป็นสองส่วน

(1) ปรับเปลี่ยนจำนวนโหนดในโครงข่ายเพื่อดูประสิทธิภาพของระเบียบวิธีที่นำเสนอเมื่อโครงข่ายมีการขยายตัว โดยจะใช้จำนวนโหนดตั้งแต่ 10 โหนด ถึง 50 โหนด ทำการสุ่มตำแหน่งในพื้นที่  $750 \times 750$  ตร.ม. และระยะเวลาในการเคลื่อนที่ในแบบจำลองการเดินทางแบบสุ่มเท่ากับ 5 วินาที

(2) ปรับเปลี่ยนขนาดของพื้นที่จำลอง โดยมีขนาดตั้งแต่ 5000 ตร.ม. ต่อโหนด จนถึง 30000 ตร.ม. ต่อโหนด มีจำนวนของโหนดเท่ากับ 30 โหนด และระยะเวลาในการเคลื่อนที่ในแบบจำลองการเดินทางแบบสุ่มเท่ากับ 5 วินาที เพื่อสังเกตถึงผลกระทบจากโครงข่ายที่มีการเชื่อมต่อที่หนาแน่น และโครงข่ายที่มีการเชื่อมต่อที่เบาบาง

(3) ปรับเปลี่ยนระยะเวลาในการเคลื่อนที่ในแบบจำลองการเดินทางแบบสุ่มระหว่าง 1 ถึง 9 วินาที ทำการสุ่มตำแหน่งในพื้นที่  $750 \times 750$  ตร.ม. มีจำนวนของโหนดเท่ากับ 30 โหนด

### พารามิเตอร์ที่ใช้ในการบอกประสิทธิภาพ

- จำนวนของแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้ (Successfully Delivered Packet) เป็นจำนวนของแพ็กเก็ตที่โหนดต้นทางสามารถส่งถึงโหนดปลายทางได้ ภายในช่วงระยะเวลาของการจำลอง
- จำนวนของแพ็กเก็ตที่เกิดการสูญเสียในชั้นโครงข่ายสื่อสารถ้อย MAC (Collided Packet) เป็นจำนวนของแพ็กเก็ตที่เกิดจากการทิ้ง (Drop) เนื่องจากการหมดเวลาของการพยายามส่ง (Retransmission Timeout) หรือเกิดจากการที่โหนดที่ส่งไม่ได้รับการตอบรับของการส่ง (Acknowledgment)
- จำนวนแพ็กเก็ตที่สูญเสียเนื่องจากโครงข่ายขาดการเชื่อมต่อ (Packet Lost due to Network Disconnected)
- จำนวนฮอปต่อแพ็กเก็ต (Average Number of Hop/Packet) เป็นจำนวนของฮอปเฉลี่ยที่แต่ละแพ็กเก็ตใช้เดินทาง

- พลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งโหนด (Energy/Number of Node) เป็นค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในหนึ่งโหนด
- พลังงานที่ใช้ต่อการส่งหนึ่งแพ็กเก็ต (Energy/Packet) เป็นค่าพลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการส่งแพ็กเก็ตหนึ่งแพ็กเก็ต

#### 4.2.5.2 ผลการจำลองและการวิเคราะห์

##### 4.2.5.2.1 ปรับเปลี่ยนจำนวนของโหนดในโครงข่าย

รูปที่ 4.30 แสดงจำนวนแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้ โดยโครงข่ายที่มีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งจะมีจำนวนแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้มีค่าน้อยกว่า เพราะการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลทำให้เกิดการสูญเสียของแพ็กเก็ตมากขึ้น ซึ่งเกิดจากการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่ไม่เท่ากันในแต่ละโหนดทำให้เกิดการสูญเสียของแพ็กเก็ตในชั้นสื่อสารย่อย MAC ดังรูปที่ 4.31 และการสูญเสียแพ็กเก็ตเนื่องจากโครงข่ายขาดการเชื่อมต่อ ดังรูปที่ 4.32

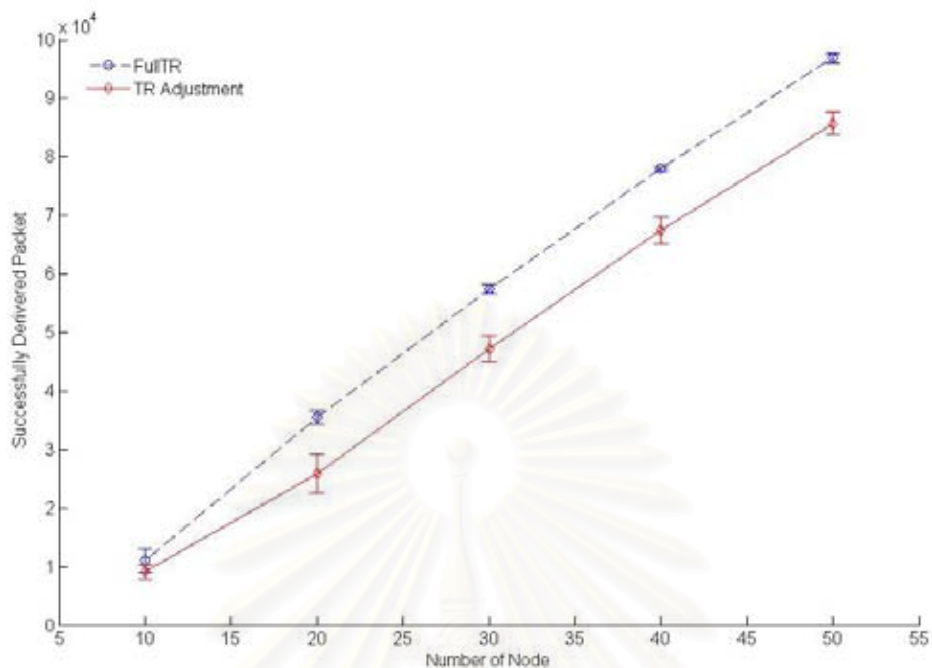
รูปที่ 4.31 เห็นได้ว่าการปรับเปลี่ยนโครงข่ายเป็นรูปต้นไม้จะเกิดการสูญเสียของแพ็กเก็ตในชั้นสื่อสารย่อย MAC มากกว่าการใช้พลังงานในการส่งสูงสุด สาเหตุเนื่องจากโหนดไม่สามารถรับรู้ได้เมื่อมีโหนดรอบข้างทำการส่งข้อมูล โดยเฉพาะเมื่อจำนวนโหนดเพิ่มขึ้น ในขณะที่พื้นที่จำลองมีขนาดเท่าเดิม ส่งผลให้โครงข่ายเกิดการรวมกลุ่มของโหนด เมื่อหลายโหนดพยายามส่งข้อมูลพร้อมกันทำให้อาจเกิดการสูญเสียของแพ็กเก็ตในชั้นสื่อสารย่อย MAC เพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 4.32 ในโครงข่ายที่สามารถปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลจะมีแพ็กเก็ตที่สูญเสียเนื่องจากโครงข่ายมีการขาดการเชื่อมต่อที่ลดลง เมื่อจำนวนโหนดในโครงข่ายมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามตามจำนวนแพ็กเก็ตที่สูญเสียเนื่องจากโครงข่ายขาดการเชื่อมต่อเมื่อจำนวนโหนดเท่ากับ 10 โหนด มีค่าน้อยกว่าจำนวนแพ็กเก็ตที่สูญเสียเนื่องจากโครงข่ายขาดการเชื่อมต่อเมื่อจำนวนโหนดเท่ากับ 20 โหนด เพราะว่าการเพิ่มจำนวนโหนดทำให้ปริมาณแพ็กเก็ตในโครงข่ายมีปริมาณมากขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ของจำนวนแพ็กเก็ตที่สูญเสียเนื่องจากโครงข่ายมีการขาดการเชื่อมต่อกับปริมาณแพ็กเก็ตในโครงข่ายทั้งหมด ก็จะเป็นไปตามแนวโน้มคือโครงข่ายที่มีจำนวนโหนดน้อยมีเปอร์เซ็นต์ของการสูญเสียแพ็กเก็ตเนื่องจากโครงข่ายขาดการเชื่อมต่อสูงกว่าโครงข่ายที่มีจำนวนโหนดมาก ตัวอย่างเช่น เมื่อจำนวนโหนดมีค่าเท่ากับ 10 โหนด เปอร์เซ็นต์ของแพ็กเก็ตที่สูญเสียมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ของแพ็กเก็ตทั้งหมดในโครงข่าย แต่เมื่อจำนวนโหนดเท่ากับ 20 โหนดจำนวนแพ็กเก็ตที่สูญเสียน้อยลงเหลือประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของแพ็กเก็ตทั้งหมด ส่วนกรณีของโครงข่ายที่ใช้พลังงานในการส่ง

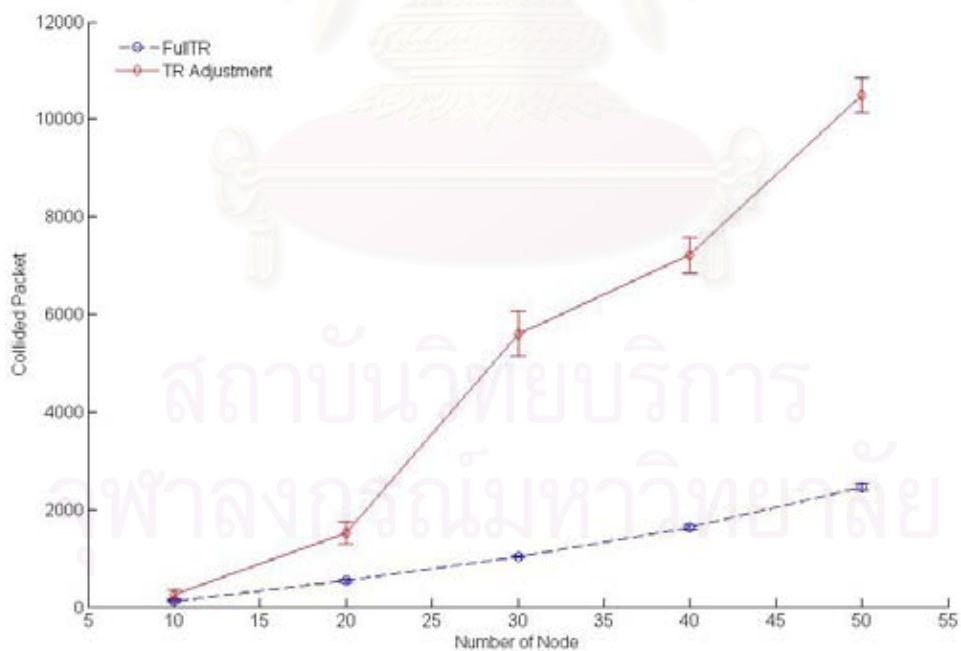
ข้อมูลสูงสุดจะมีปริมาณแพ็กเก็ตที่สูญเสียเนื่องจากโครงข่ายขาดการเชื่อมต่อลดลงเมื่อปริมาณโหนดในโครงข่ายเพิ่มขึ้น

รูปที่ 4.33 จำนวนฮอปเฉลี่ยของแพ็กเก็ตในโครงข่ายที่มีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนโหนดที่เพิ่มขึ้น นั่นเพราะว่าโครงข่ายจะพยายามปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเพื่อให้เป็นโครงข่ายต้นไม้ ทำให้จำนวนของสายเชื่อมโยงต่อโหนดมีค่าคงที่ กรณีของโครงข่ายที่ใช้พลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุดจะมีปริมาณของฮอปเฉลี่ยที่ลดลงในขณะที่จำนวนโหนดในโครงข่ายเพิ่มขึ้น นั่นเพราะว่าการเพิ่มจำนวนของโหนดทำให้มีปริมาณของสายเชื่อมโยงต่อจำนวนโหนดที่เพิ่มขึ้น แต่จุดที่จำนวนโหนดเท่ากับ 10 โหนดมีปริมาณฮอปเฉลี่ยที่น้อยกว่าจุดที่จำนวนโหนดเท่ากับ 20 โหนด นั่นเพราะการขาดการเชื่อมต่อของโครงข่ายที่จำนวนโหนดเท่ากับ 10 ทำให้โหนดสามารถส่งแพ็กเก็ตได้เฉพาะโหนดที่อยู่ใกล้ๆ ขณะที่โครงข่ายที่จำนวนโหนดเท่ากับ 20 มีการเชื่อมต่อของโครงข่ายมากกว่า จึงสามารถส่งแพ็กเก็ตถึงโหนดที่อยู่ไกลได้

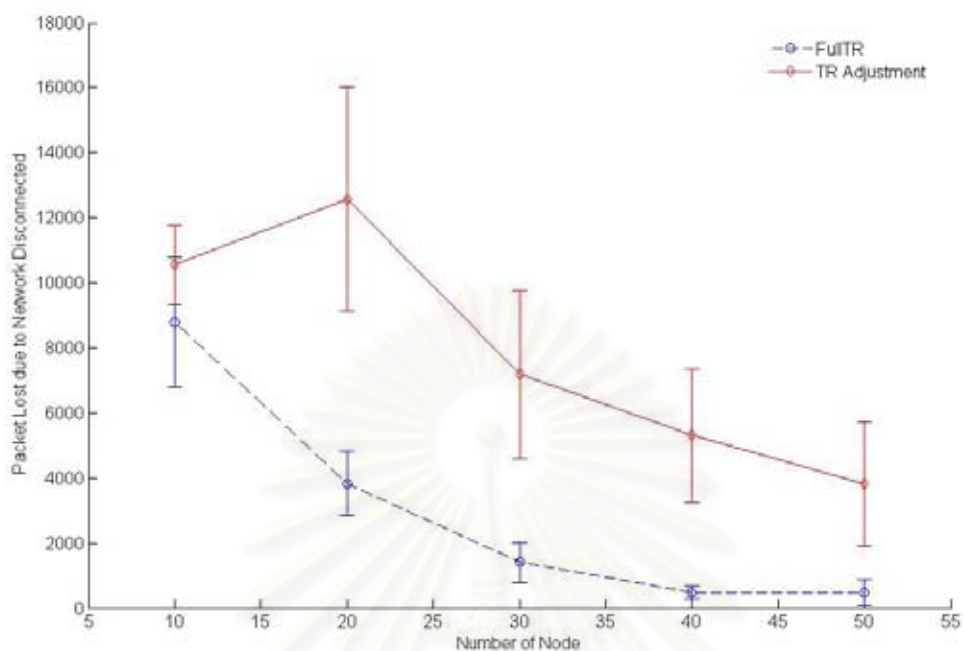
รูปที่ 4.34 แสดงว่าโครงข่ายที่ใช้ค่าพลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุด มีการใช้พลังงานเฉลี่ยต่อโหนดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อมีจำนวนของโหนดในโครงข่ายเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มจำนวนของโหนดทำให้มีปริมาณข้อมูลในโครงข่ายเพิ่มขึ้นจึงเป็นการเพิ่มการใช้พลังงานทั้งการรับและการส่งข้อมูล ในขณะที่โครงข่ายที่สามารถปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลได้ก็มีการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่เพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนโหนดเพิ่มขึ้นแต่จะมีความชันของกราฟไม่มาก นั่นคือ เมื่อจำนวนโหนดเพิ่มขึ้นทำให้ระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโหนดลดลง แต่โหนดจึงปรับพลังงานในการส่งข้อมูลต่ำลงด้วย จึงเป็นการลดการใช้พลังงานในการส่งระหว่างโหนด และโหนดที่สูญเสียพลังงานในการรับข้อมูลยังมีจำนวนเฉลี่ยที่คงที่เมื่อจำนวนโหนดเพิ่มขึ้น ซึ่งสิ่งนี้เป็นข้อได้เปรียบของการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล นั่นคือโครงข่ายมีความสามารถในการขยายตัวได้อย่างสูง การเพิ่มของจำนวนโหนดไม่ส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงาน



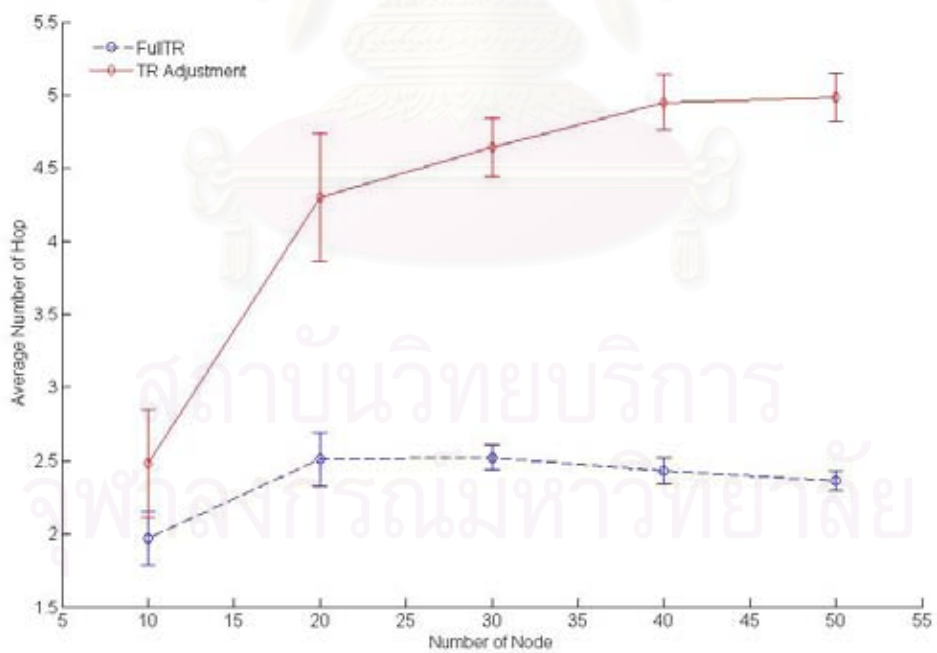
รูปที่ 4.30 จำนวนแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้เมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด



รูปที่ 4.31 จำนวนของแพ็กเก็ตที่สูญเสียนในชั้นโครงข่ายสื่อสารย่อย MAC เมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด

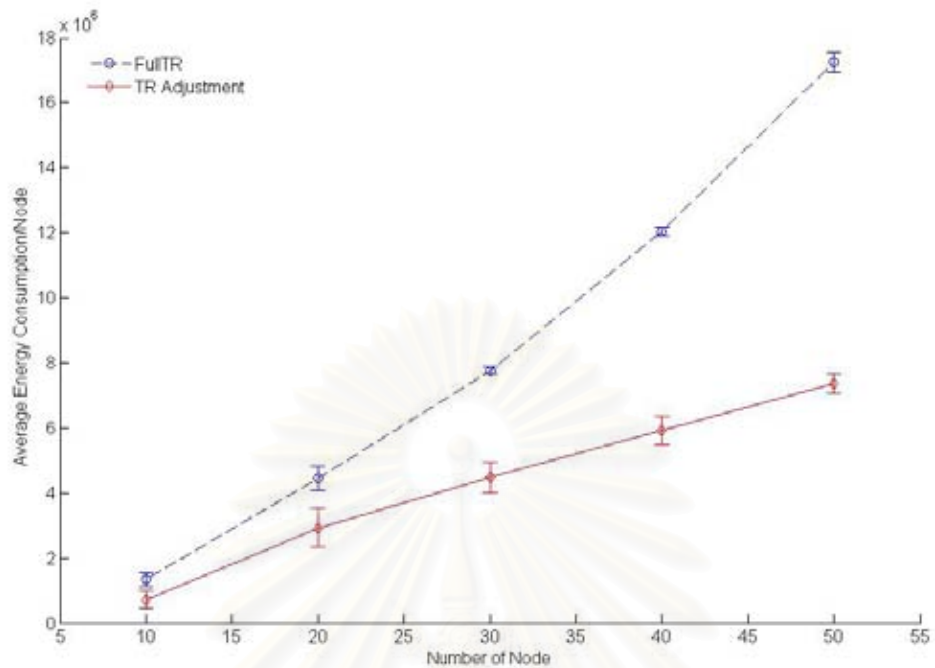


รูปที่ 4.32 จำนวนของแพ็กเก็ตที่สูญเสียนี้อาจเกิดจากไม่มีเส้นทางในการส่งเมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด

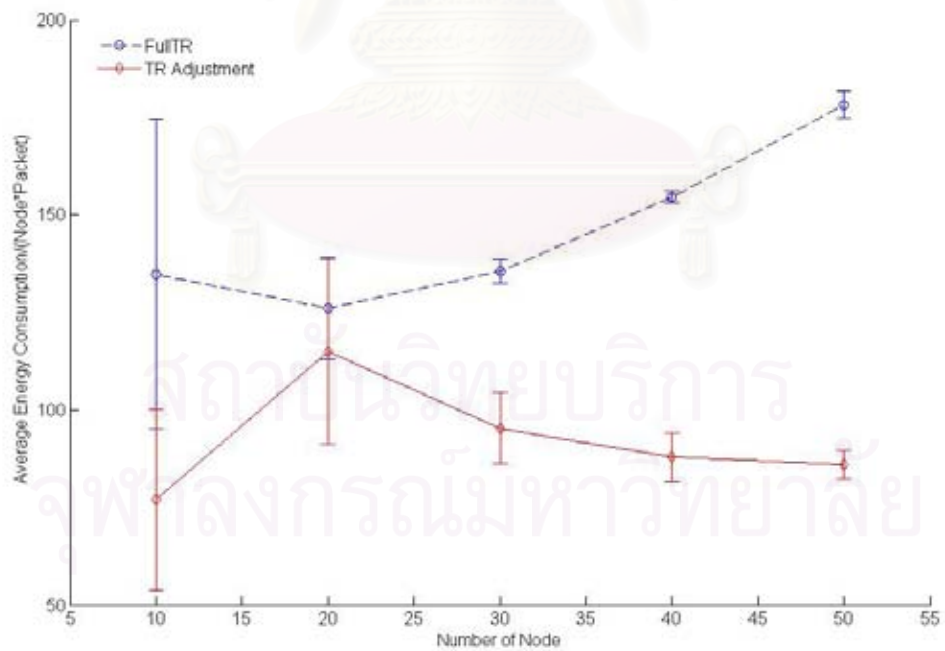


รูปที่ 4.33 จำนวนฮอปเฉลี่ยเมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด





รูปที่ 4.34 พลังงานที่ใช้ต่อหนึ่งโหนดเมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด



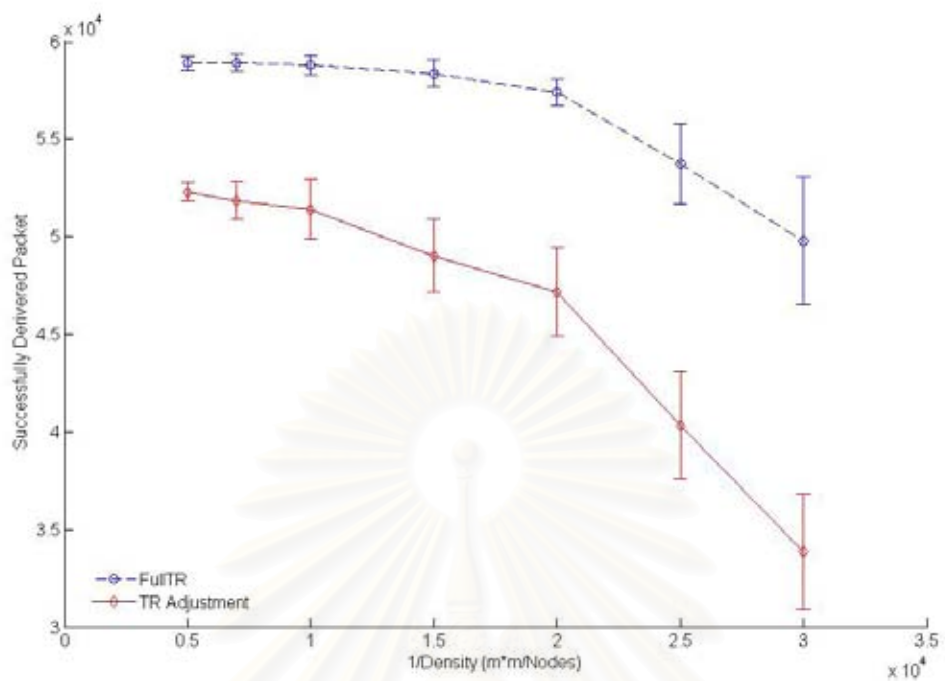
รูปที่ 4.35 พลังงานที่ใช้ในการส่ง 1 แพ็กเก็ตต่อหนึ่งโหนดเมื่อปรับเปลี่ยนจำนวนโหนด

รูปที่ 4.35 เมื่อโครงข่ายจำนวนโนดเท่ากับ 10 โนด โครงข่ายที่ใช้พลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุด เกิดการกระจายของโนดและขาดการเชื่อมต่อทำให้โนดไม่สามารถส่งข้อมูลถึงกันได้ แต่โนดที่กระจายออกไปยังคงสูญเสียพลังงานในการส่งบิตคอนแพ็กเกตทุกๆ ช่วงเวลา ส่งผลให้มีการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่สูงกว่ากรณีที่จำนวนโนดเท่ากับ 20 ซึ่งเป็นช่วงที่โครงข่ายเริ่มสามารถที่จะเชื่อมต่อกันได้ หลังจากนั้นกราฟจะมีค่าที่สูงขึ้นตามจำนวนโนด เนื่องจากการสูญเสียพลังงานในการรับข้อมูลที่เพิ่มขึ้น สำหรับโครงข่ายที่มีความสามารถในการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลได้นั้น ที่จำนวนโนดเท่ากับ 10 โนด ถึงแม้ว่าโนดกระจายตัวกันออกไป แต่โนดเหล่านั้นจะทำการลดพลังงานในการส่งข้อมูลให้เชื่อมต่อเพียงโครงข่ายย่อย ทำให้การใช้พลังงานลดลง และโครงข่ายใช้จำนวนฮอปที่ต่ำในการส่งข้อมูล เป็นเหตุให้โครงข่ายใช้พลังงานในการส่งข้อมูลเฉลี่ยต่อแพ็กเกตต่ำกว่าการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลเฉลี่ยเมื่อจำนวนโนดเท่ากับ 20 ซึ่งช่วงนั้นโครงข่ายเริ่มทำการเชื่อมต่อกัน จึงมีแพ็กเกตที่ใช้จำนวนของฮอปที่สูงสำหรับการส่งข้อมูล และกราฟจะมีค่าลดลงเมื่อจำนวนโนดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดของระยะห่างเฉลี่ยระหว่างคู่โนดในโครงข่าย

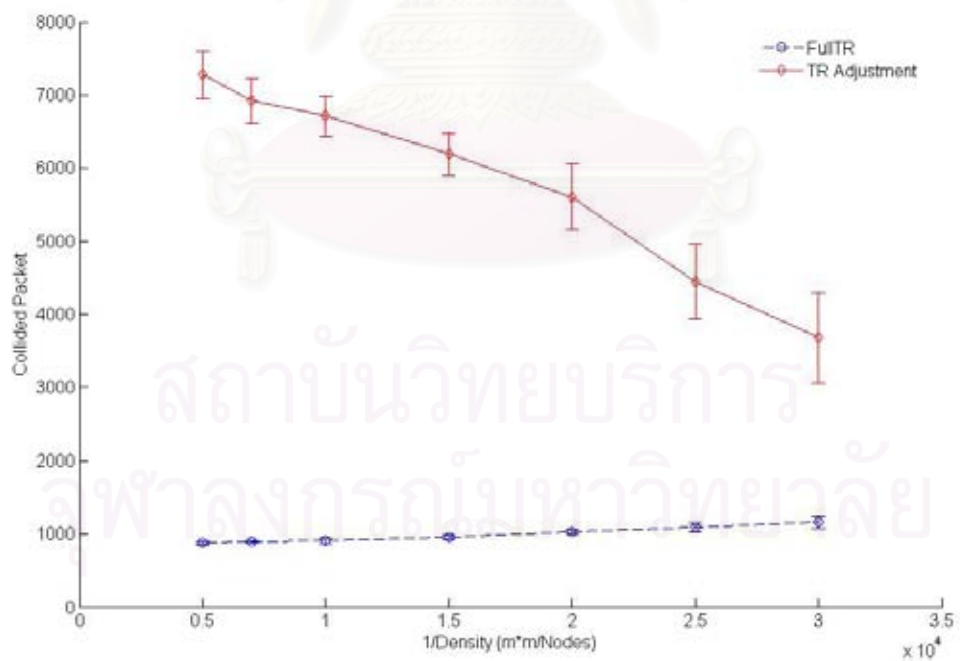
#### 4.2.5.2.2 ปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่จำลอง

รูปที่ 4.36 ทั้งสองโครงข่ายมีปริมาณแพ็กเกตที่สามารถส่งได้ลดลง เมื่อพื้นที่ของการจำลองมีขนาดเพิ่มขึ้น เนื่องจากการขาดการเชื่อมต่อของโครงข่ายดังรูปที่ 4.38 และโครงข่ายที่มีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล มีปริมาณแพ็กเกตที่สามารถส่งได้ต่ำกว่า เพราะในกรณีที่พื้นที่จำลองแคบจะมีปริมาณของแพ็กเกตสูญเสียเนื่องในชั้นสื่อสารย่อย MAC ที่สูงดังรูปที่ 4.37 และเมื่อพื้นที่จำลองมีขนาดกว้าง ส่งผลให้ปริมาณแพ็กเกตสูญเสียในชั้นสื่อสารย่อย MAC มีค่าลดต่ำลง แต่ปริมาณแพ็กเกตสูญเสียเนื่องจากโครงข่ายขาดการเชื่อมต่อมีค่าเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4.38 เนื่องจากแต่ละโนดจะปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเพียงแค่เชื่อมต่อกับโครงข่ายย่อยเท่านั้น

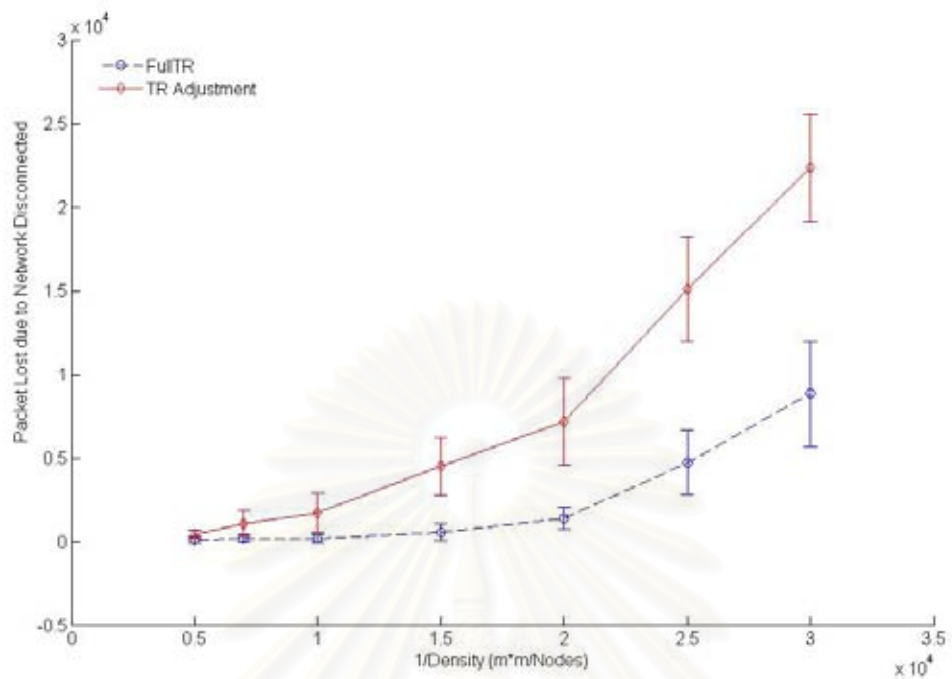
รูปที่ 4.39 จำนวนฮอปของทั้งสองโครงข่ายมีค่ามากขึ้นเมื่อพื้นที่การจำลองเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างคู่โนดที่เพิ่มขึ้น และโครงข่ายที่ปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลจะมีจำนวนฮอปสูงกว่าโครงข่ายที่ใช้พลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุด เนื่องจากจำนวนข่ายเชื่อมโยงที่ต่ำกว่า



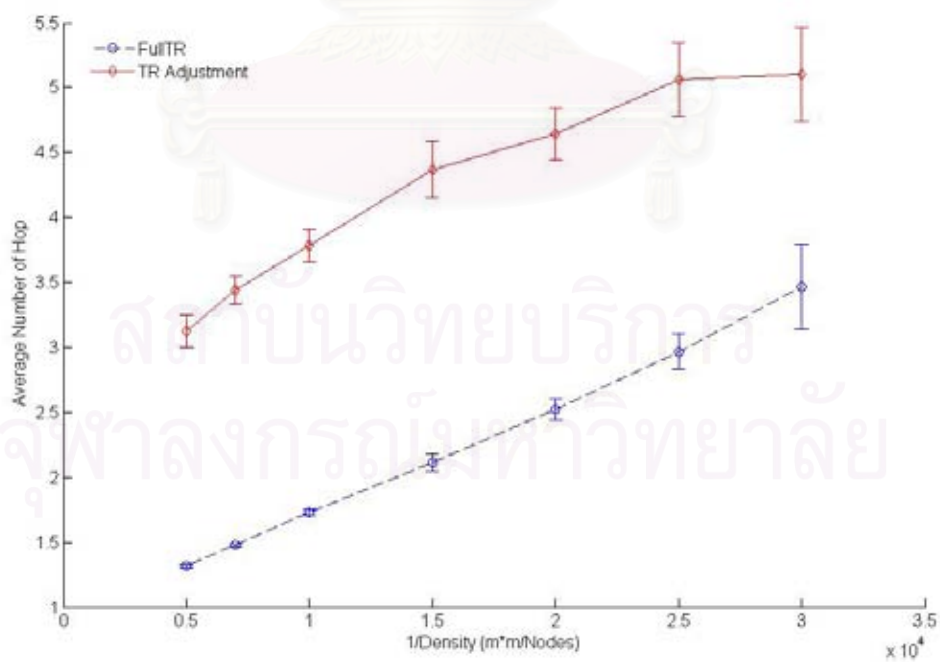
รูปที่ 4.36 จำนวนแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้เมื่อปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่จำลอง



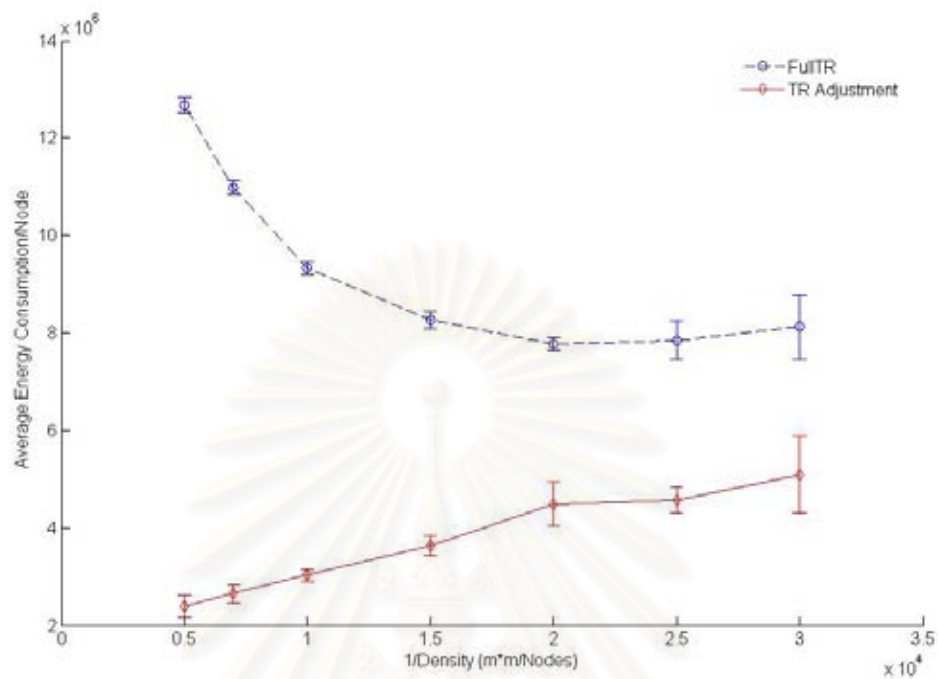
รูปที่ 4.37 จำนวนแพ็กเก็ตที่สูญเสียในชั้นสื่อสารย่อย MAC เมื่อปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่จำลอง



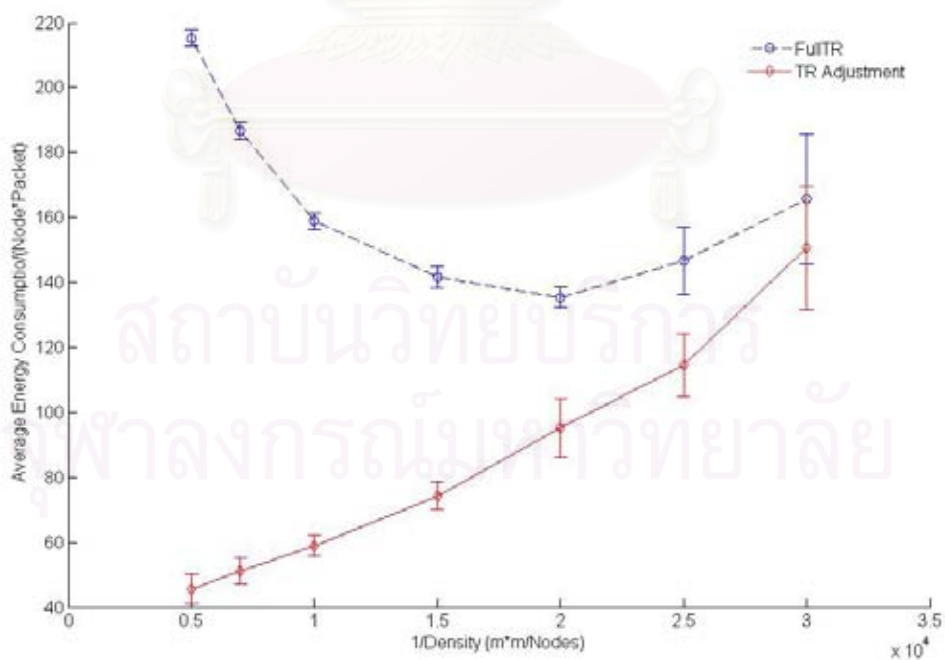
รูปที่ 4.38 จำนวนแพ็กเก็ตที่สูญเสียนองจากไม่มีเส้นทางในการส่งเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่จำลอง



รูปที่ 4.39 จำนวนฮอปเฉลี่ยเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่จำลอง



รูปที่ 4.40 ค่าพลังงานที่ใช้ต่อโนดเมื่อปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่จำลอง



รูปที่ 4.41 ค่าพลังงานที่ใช้ในการส่ง 1 แพ็กเกตต่อโนด เมื่อปรับเปลี่ยนขนาดพื้นที่จำลอง

รูปที่ 4.40 พลังงานที่ใช้ในโครงข่ายที่ใช้พลังงานในการส่งข้อมูลสูงสุด มีค่าสูงเมื่อพื้นที่จำลองมีขนาดแคบ เนื่องจากแต่ละโหนดต้องสูญเสียพลังงานในการรับแพ็กเก็ตเกิดอย่างมาก จากทุกโหนดที่ส่งข้อมูล และกราฟมีค่าต่ำลงมาเมื่อพื้นที่จำลองมีขนาดที่เพิ่มขึ้น เพราะโหนดกระจายตัวกันจึงลดการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการรับแพ็กเก็ต และมีค่าที่สูงขึ้นอีกครั้งเมื่อพื้นที่จำลองขนาดกว้างขึ้น นั่นเพราะเส้นทางที่ใช้ในการส่งข้อมูลมีจำนวนฮอปที่สูงขึ้นการส่งแต่ละแพ็กเก็ตจึงสูญเสียพลังงานในการส่งเพิ่ม สำหรับโครงข่ายที่สามารถปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล การใช้พลังงานจะเพิ่มขึ้นตามพื้นที่จำลองเพราะ ระยะห่างระหว่างโหนดที่เพิ่มขึ้น แต่ละโหนดใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่มีระยะทางสูงขึ้น เพื่อให้เชื่อมต่อถึงโหนดข้างเคียง

รูปที่ 4.41 ลักษณะของกราฟคล้ายกับรูปที่ 4.40 แต่กราฟทั้งสองจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อพื้นที่จำลองมีค่ามาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งโครงข่ายที่มีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล เนื่องจากปริมาณของแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้มีค่าต่ำลง จากการขาดการเชื่อมต่อของโครงข่าย อีกนัยคือจำนวนแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้มีค่าลดต่ำลง เป็นเหตุให้พลังงานในการส่งหนึ่งแพ็กเก็ตมีค่าสูงอย่างเห็นได้ชัด

#### 4.2.6 สรุปผลของการการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเมื่อการเคลื่อนที่ของโหนดเป็นแบบสุ่ม

การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลมีข้อเสียคือ ทำให้เกิดการสูญเสียแพ็กเก็ตที่เพิ่มขึ้น ปริมาณแพ็กเก็ตที่สูญเสียในชั้นสี่สหาย่อย MAC มีค่าสูงขึ้นเมื่อระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโหนดต่ำ เนื่องจากพลังงานในการส่งข้อมูลที่ใช้ในแต่ละโหนดไม่เท่ากัน และปริมาณแพ็กเก็ตที่สูญเสียเนื่องจากโครงข่ายขาดการเชื่อมต่อมีค่าสูง เมื่อระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโหนดมีค่ามาก เพราะแต่ละโหนดจะพยายามปรับพลังงานในการส่งให้เพียงแค่ออกไปเชื่อมต่อกับโครงข่ายย่อย จึงมีโอกาสน้อยที่สองโครงข่ายย่อยจะกลับมาเชื่อมต่อกัน

ข้อดีของการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่ง คือ เมื่อระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโหนดมีค่าน้อย โครงข่ายจะปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งให้ครอบคลุมพื้นที่เฉพาะโหนดข้างเคียง เป็นการลดการสูญเสียพลังงานการรับข้อมูลได้อย่างมาก และเมื่อโครงข่ายมีระยะห่างเฉลี่ยระหว่างโหนดมีค่ามาก โครงข่ายจะปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลให้เชื่อมต่อเพียงโครงข่ายย่อย เป็นการลดพลังงานในการส่งที่เกินความจำเป็น

## บทที่ 5

### บทสรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล เพื่อลดการใช้พลังงานในโครงข่ายแอตฮอก และเพิ่มปริมาณของแพ็กเก็ตที่สามารถส่งได้ให้มีค่ามากขึ้น ส่วนแรกที่น่าสนใจในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ วิธีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลในโครงข่ายแอตฮอกแบบสถิติ ซึ่งโหนดในโครงข่ายจะพยายามจัดรูปแบบการเชื่อมต่อให้เป็นโครงข่ายต้นไม้ และทำการปรับเปลี่ยนจำนวนข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายให้มีจำนวนเพิ่มขึ้นเพื่อให้โครงข่ายทนทานต่อการถูกตัดขาดเป็นโครงข่ายย่อย ยังได้เสนอการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเมื่อพลังงานลดต่ำลง ซึ่งการปรับเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยงนั้นอยู่บนพื้นฐานของพลังงานที่เหลือในแต่ละโหนด เมื่อโหนดในโครงข่ายต้นไม้มีพลังงานลดต่ำลงก็จะทำการเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยงใหม่เพื่อชะลอการใช้พลังงานที่โหนดนั้น

จากการจำลองพบว่าโครงข่ายที่มีการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลจะสามารถลดการใช้พลังงานในการส่งลงได้ แต่จะมีข้อเสีย นั่นคือจะมีโหนดที่รับภาระในการส่งข้อมูลมากเกินไปทำให้โหนดพวกนี้มีโอกาสที่หมดพลังงานก่อน และจะเกิดการสูญเสียแพ็กเก็ตในชั้นสื่อสารย่อยสูง เนื่องจากการไม่เท่ากันของพลังงานในการส่งข้อมูลในแต่ละโหนด และการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่มีค่าต่ำ ส่วนการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งโดยการปรับเปลี่ยนข่ายเชื่อมโยงนั้นสามารถที่จะแก้ปัญหาของโหนดที่ต้องแบกรับภาระในการส่งข้อมูลได้ในโครงข่ายต้นไม้และเพิ่มช่วงเวลาการใช้งานของโครงข่าย

ส่วนที่สองเป็นการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลเมื่อโหนดมีความสามารถในการเคลื่อนที่ โดยการเคลื่อนที่จะแบ่งเป็น 2 แบบ

1) โหนดเคลื่อนที่แบบรายคาบ ระเบียบวิธีนี้โหนดจะพยายามหาค่าพลังงานในการส่งข้อมูลที่น้อยที่สุดซึ่งทำให้โครงข่ายยังสามารถเชื่อมต่อถึงกันได้ในแต่ละเวลาของคาบแรก แล้วนำค่าต่างๆเหล่านี้ มาปรับเปลี่ยนใช้งานในคาบถัดๆ ไปเพื่อลดเวลาของการคำนวณใหม่ จากการจำลองสรุปได้ว่าการใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่ต่ำเป็นการลดการใช้พลังงานของโครงข่าย แต่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโทโพโลยีมากขึ้น

2) โหนดจะเคลื่อนที่เป็นแบบสุ่มระเบียบวิธีนี้จะทำการปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูล ให้โครงข่ายมีการเชื่อมต่อแบบโครงข่ายต้นไม้ที่มีระยะทางระหว่างโหนดต่ำ โดยจะมีการปรับเปลี่ยนสายเชื่อมโยงภายในโครงข่ายย่อย และปรับเปลี่ยนสายเชื่อมโยงระหว่างโครงข่ายย่อย ระเบียบวิธีที่น่าเสนอนี้สามารถที่จะช่วยลดพลังงานที่ใช้ในการส่งข้อมูลลงได้ โดยเฉพาะในโครงข่ายที่มีระยะห่างเฉลี่ยระหว่างแต่ละโหนดที่น้อยซึ่งเป็นการลดการใช้พลังงานเนื่องจากการรับข้อมูล อย่างไรก็ตามก็ติระยะห่างเฉลี่ยระหว่างแต่ละโหนดที่น้อยจะทำให้เกิดการสูญเสียแพ็กเก็ตในชั้นสื่อสารย่อย MAC มากขึ้น

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

สำหรับงานที่ควรได้รับการพัฒนาต่อไป

- (1) การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลควรคำนึงเรื่องตำแหน่งของโหนดในโครงข่ายหรือความสำคัญของแต่ละโหนด โดยโหนดที่ต้องทำการส่งข้อมูลอยู่บ่อยครั้ง หรือมีโอกาสสูงในการเป็นโหนดตัวกลางควรจะมีพลังงานที่สูงกว่าโหนดอื่น
- (2) ในกรณีที่ข้อมูลมีปริมาณมากอาจทำให้โครงข่ายต้นไม้เกิดการติดขัดในการส่งข้อมูลได้ ควรจะปรับเปลี่ยนให้โครงข่ายมีสายเชื่อมโยงสำรอง
- (3) การปรับเปลี่ยนพลังงานในการส่งข้อมูลอาจปรับเปลี่ยนตามปริมาณของข้อมูลในแต่ละพื้นที่ โดยพื้นที่ที่มีปริมาณข้อมูลสูงควรจะใช้พลังงานในการส่งข้อมูลที่มีค่ามากเพื่อลดโอกาสในการสูญเสียแพ็กเก็ตในชั้นสื่อสารย่อย MAC หรือแบ่งโหนดเป็นกลุ่มย่อยโดยแต่ละกลุ่มโหนดมีค่าพลังงานในการส่งข้อมูลที่เท่ากันเพื่อลดปัญหาสายเชื่อมโยงที่เป็นทางเดียว (Directional Link)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## รายการอ้างอิง

1. Ramanathan, R., and Redi, J. A brief overview of ad hoc networks: challenges and directions. IEEE Communications Magazine 40, 5 (May 2002): 20–22.
2. Krunz, M. Muqattash, A. Sung-Ju Lee. Transmission power control in wireless ad hoc networks: challenges, solutions and open issues. IEEE Network 18, 5 (Sept.-Oct. 2004): 8-14.
3. Hu, L. Topology control for multihop packet radio networks. IEEE Transactions on Communications 41, 10 (Oct 1993): 1474-1481.
4. Rodoplu, V. Meng, T.H. Minimum energy mobile wireless networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications 17, 8 (Aug 1999): 1333-1344.
5. Ramanathan, R. Rosales-Hain, R. Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment. INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE Proceedings 2. (Mar 2000): 404-413.
6. Szu-Chi Wang. Wei, D.S.L. Sy-Yen Kuo. A topology control algorithm for constructing power efficient wireless ad hoc networks. 2003 Global Telecommunications Conference. IEEE GLOBECOM '03 3. (Dec 2003): 1290-1295.
7. Wattenhofer, R. Li, L. Bahl, P. Wang, Y.-M. Distributed topology control for power efficient operation in multihop wireless ad hoc networks. INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. IEEE Proceedings 3. (Apr 2001): 1388-1397.
8. Chien-Chung Shen. Srisathapornphat, C. Rui Liu. Zhuochuan Huang. Jaikaeo, C. Lloyd, E.L. CLTC: a cluster-based topology control for ad hoc networks. IEEE Transactions on Mobile Computing 3, 1 (Jan-Feb 2004): 18-32.
9. Narayanaswamy, S. Kawadia, V. Sreenivas, R. S. Kumar, P. R. Power control in ad-hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol. European Wireless Conference 2002.

10. Jilei Liu. and Baochun Li. MobileGrid: capacity-aware topology control in mobile ad hoc networks. 2002 Computer Communications and Networks. Proceedings. Eleventh International Conference on. (Oct 2002): 570-574.
11. Seung-Jong Park. and Raghupathy Sivakumar. Load-sensitive transmission power control in wireless ad-hoc networks. 2002 Global Telecommunications Conference. IEEE GLOBECOM '02 1. (Nov 2002): 42-46.
12. Gerharz, M. de Waal, C. Martini, P. James, P. A cooperative nearest neighbours topology control algorithm for wireless ad hoc networks. 2003 Computer Communications and Networks. ICCCN 2003. Proceedings. The 12th International Conference on (Oct 2003): 412-417.
13. A. Benjebbour, Y. Seki, and S. Yoshida. Simplified Channel Tracking for MIMO-OFDM Systems IEICE Transactions on Communications E-86-B, 10 (October 2003): 3013-3022.
14. Camp, T. Boleng, J. Davies, V. A survey of mobility for ad hoc network research. Wireless Communication & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications, 2002: 483-502.
15. Andrew S. Tanenbaum. สัจยุทธ์์ สว่างวรรณ. Computer networking 1996.
16. Alamouti, S.M. A simple transmit diversity techniques for wireless communications IEEE Journal on Selected Areas in Communications 16, 8 (October 1998): 1451-1458.
17. Jaikaeo, C. and Shen, C.-C. Adaptive Backbone-Based Multicast for Ad Hoc Networks. Proc. IEEE Int'l Conf. Comm. (ICC 2002), (Apr-May 2002).
18. Kozat, U.C. Kondylis, G. Ryu, B. Marina, M. K. Virtual Dynamic Backbone for Mobile Ad Hoc Networks. Proc. IEEE Int'l Conf. Comm. (ICC 2001), (June 2001).
19. Takaoka, S. and Adachi, F. Pilot-Aided Adaptive Prediction Channel Estimation in a Frequency-Nonselective Fading Channel. IEICE Transactions on Communications E-85-B, 1 (August 2002): 1552-1560.

20. Xiaoyan Hong. Kaixin Xu. Gerla, M. Scalable routing protocols for mobile ad hoc networks. IEEE Network 16, 4 (Jul-Aug 2002): 11-21.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ผลงานวิจัยของผู้เขียนที่ได้รับการตีพิมพ์แล้ว

1. Kulsirimongkol, P. and Saivichit, C. Transmission Power Adjustment based on Predeterministic movement in Ad Hoc Networks. IASTED International Conference on NETWORKS AND COMMUNICATION SYSTEMS (NCS) (Apr 2005).
2. ปกรณ์ กุลศิริมงคล, ชัยเชษฐ สหายวิจิตร. Power-Efficient Topology Control in Static Ad-Hoc Network based on Distributed Spanning Tree Algorithm. การประชุมทางวิศวกรรมไฟฟ้า (EECON) ครั้งที่ 28, ตุลาคม พ.ศ. 2548 จ. ภูเก็ต
3. Kulsirimongkol, P. and Saivichit, C. Topology Control based on Energy-Efficient Concept of Mobile Ad Hoc Networks for Multimedia Communication. International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication System (ISPACS). (2005).



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# Transmission Power Adjustment based on Predeterministic movement in Ad Hoc Networks

*Pakorn Kulsirimongkol and Chaiyachet Saivichit*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,  
Chulalongkorn University, Bangkok, 10330, Thailand  
Phone 0-2218-6907, Fax 0-2218-6912, E-mail [Chaiyachet.S@Chula.ac.th](mailto:Chaiyachet.S@Chula.ac.th)

**Abstract**—The work presented in this paper is concerned with periodic movement of mobile nodes in an Ad Hoc Networks. Each node spends the first period through learning process of its movement pattern. The proposed algorithm shall be used to calculate suitable transmission range which will, predeterministically, be adjusted at various periods accordingly. Two strategies for transmission power adjustment are proposed. The first one is an adjustment at specific interval. The latter is to adjust transmission range when the preset threshold is reached. The simulation results show that the node movement is influential on the suitable power transmission range. Efficient power transmission provides good power consumption rate but trade-off is needed for the overhead generated for topology updates.

**Keywords:** Ad Hoc Network, MANET, Adjustment of Transmission power, Periodic Movement

## I. INTRODUCTION

Wireless Ad Hoc networks become widely deployed lately as it provides great flexibility of ability to interconnect wireless devices in different scenarios. This network is constructed from mobile nodes without fixed infrastructure. Each mobile node performs equally well as a user and as a router. Various well known constraints in ad hoc networks are such as limited bandwidth and battery, link unreliability due to mobility, etc. The connectivity of the network is maintained through the cooperation of all nodes of the network. If two mobile wireless devices are within transmission range of each other, they can directly communicate. Otherwise they instead need other devices within their transmission range to relay packets. The work in [1] investigated medium sized networks (e.g. 20 nodes) that all nodes use the transmission power of which all nodes are within range of each other. Data throughput can then be maximised. However, due to limited power supply of a mobile computer, power conservation has been widely considered as a primary control parameter in the protocol design for wireless Ad Hoc networks. With this reason, the problem of power efficient topology control has been

attracting interests of many researchers from the areas of mobile computing and networking [2]-[4].

Most of mobility models proposed the performance evaluation of an Ad Hoc network protocol using random movement modeling [5]. But in several situation nodes can move in a repeated pattern such as an automation system in manufacturing industry or satellite networks [6]. With this priori information about the nodes movement, processing for topology update, in terms of delay and power consumption, in later period could be reduced. Minimizing the processing power for topology update can have significant effects on network performance in mobile environment.

Intuitively, it takes two basic steps to adjust transmission power of nodes. Firstly, nodes shall spend learning period to collect information on transmission power level which can connect to all other nodes in the networks via proposed algorithm. After that, nodes will adjust the transmission power appropriately at either every constant time interval or when a certain threshold is reached.

In this paper, it is assumed that all nodes use the same power level of signal transmission. Level is at the maximum value of all feasible transmission range computed by all nodes at any time. However, a consideration on synchronization process is beyond the scope of this paper.

The rest of the paper is organized as follows: Section II gives a brief summary of related work. Section III describes useful mobility model for our study. The proposed minimum transmission range algorithm is presented in section IV. Section V presents the simulation results and conclude the work investigated in this paper.

## II. Background

Previous schemes for power control in MANETs have focused on either throughput enhancement or energy consumption. Other researchers working in the field of energy consumption, For example, P. Santi and D.M. Blough [7]-[9] analyzed the lower bound of transmission power which could connect the network based on total nodes and tested area. In [10], the work presented a comparison among the execution time of the minimum uniform transmission power algorithm, where each node

uses the same transmission power to maintain network connectivity. However, this algorithm deployed in a centralized network is not suitable for Ad Hoc environment. In [11], a cone-based solution that guarantees network connectivity was proposed. The authors of work presented in [2] proposed the localized algorithm for constructing power efficient topology. This algorithm can reduce the transmission power by replacing path of each critical link. The method in [12] tried to maximize the life time of networks particularly for cluster-based systems by assigning nodes to cluster-heads. The papers [13]-[14] proposed adaptive transmission power algorithms that can optimize throughput performance based on network conditions. In [4], each node in the networks can cooperate in order to obtain the optimal transmission power. Whereas in [16], it compared performance of topology control algorithms separated into three categories types.

However, the past research works have focused only on power optimization in random movement environment. The periodic movement where pattern of nodes' movement is repeated has never been in the scope of their researches. In this particular scenario, it is necessary to generate the appropriate algorithm to consume network resources economically. This paper proposed such algorithm by using the characteristic of the same movement in each period to avoid repetition the calculation time needed in later period. In the next section, the discussion shall concentrate on our interested mobility modelling and how the mobile nodes form a connected topology with minimum power requirement.

### III. MOBILITY MODELLING

As stated early on, the node movement in this study concentrates on a periodic movement. The model is assumed that every node which has periodic movement knows its movement period



Fig1. Mobility Model of node

The node moves along the straight line with in one direction constant velocity and moves back in the opposite direction with the same velocity. Fig 1 shows example of a periodic movement of a node where  $v$  is velocity of node (m/s) (we assume each node has constant velocity),  $S$  is the distance that the node travels (m),  $T$  is the period of nodes movement (s)

### IV. MINIMUM TRANSMISSION POWER ALGORITHM

#### A. Algorithm

In the first period, all nodes use maximum transmission range (i.e. maximum power) which can possibly connect all nodes in the network. Each node sends periodically beaconing signal containing its sending power level. Thus,

each node can determine the distance among themselves and all of their neighbors. The value will be later formed "distance table". Every node reserves its nearest node and floods RNN (Reserved Nearest Node) packets throughout the network. The RNN packet contains sender node, reserved node(s) and sequence number. When a node receives RNN packets of all nodes in the network that are contained in the "reserved node tables", which contain its reserved node and nearest node, it will check whether the network can be connected or not. If the network cannot be connected, the node will send NSD (Nearest Subnetwork Distance) packets within its own subnetwork for finding the nearest subnetwork. Comparatively, the contents of NSD packet include sender, nearest node, distance, and sequence number. Then, the node in the subnetwork which is closed to the other nearest subnetwork reserves a node from that nearest subnetwork. That node will broadcast RNS (Reserve Nearest Subnetwork) throughout the network and then two subnetworks become connected. RNS packet contains sender node, reserved node and sequence number similar to RNN packets. This process is repeated until the whole network becomes connected.

When the nodes in the network move, the node of which the distance table changed to a higher value than its reserve value will flood RNN packets in order to declare of the change of network configuration. Node who receives RNN packets from any node will replace the reserved node with the newly nearest node in its reserve table. Then, the process will repeat when needed.

We will demonstrate the process through illustrated example. In Fig 2, all nodes reserve its nearest neighbor. Thus, the network will become as in Fig 3. Every node keeps the data of packets in its own reserve table as depicted in Fig 4.

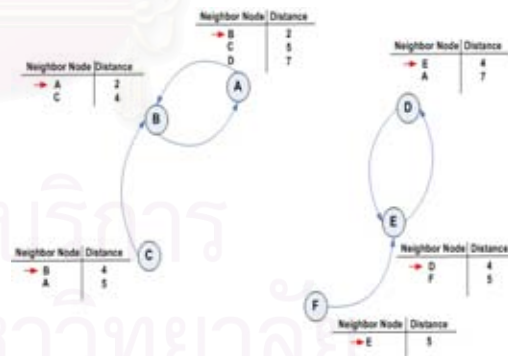


Fig 2. All nodes reserve its nearest neighbor

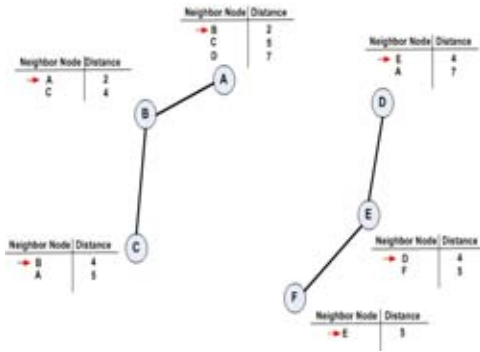


Fig 3. The virtual network when all nodes receive RNN packet for reserve first time

In Fig 4, the network has not yet connected. Therefore Node A and Node D will reserve the nearest node of the other subnetworks as shown in Fig 5 for further connection of subnetworks. Fig 6. shows the data which can connect all nodes in the network.

Node	Nearest Node	Reserved Node
A	B	B
B	A	A
C	B	B
D	E	E
E	D	D
F	E	E

Fig 4. Reserve table when all nodes receive RNN packet for reserve first time

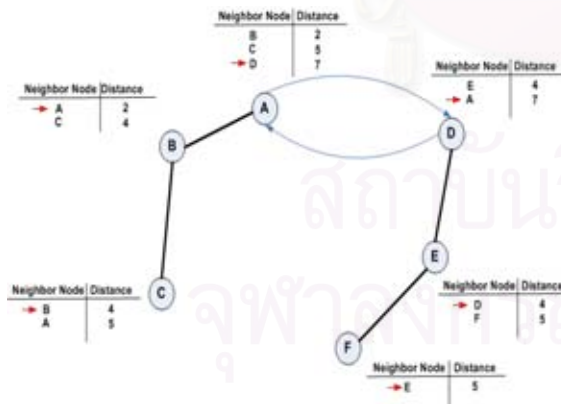


Fig 5. Node reserves other subnetwork which is its nearest

Node	Nearest Node	Reserved Node
A	B	D
B	A	A
C	B	B
D	E	A
E	D	D
F	E	E

Fig 6. reserve table when the network can be connected

In Fig 7, node F has moved closely to node D. The distance table of node D will be changed. Thus, node D shall reserve its newly nearest node and flood RNN packets through the network. When all nodes receive RNN packets from node D, the network becomes as shown in Fig 8 and then the process is repeated until the network can be re-connected.

Every node will remember the distance of its reserved in the first period and use maximum value among all nodes for appropriate transmission power in the next period. The process of transmission power adjustment will be discussed in the simulation section.

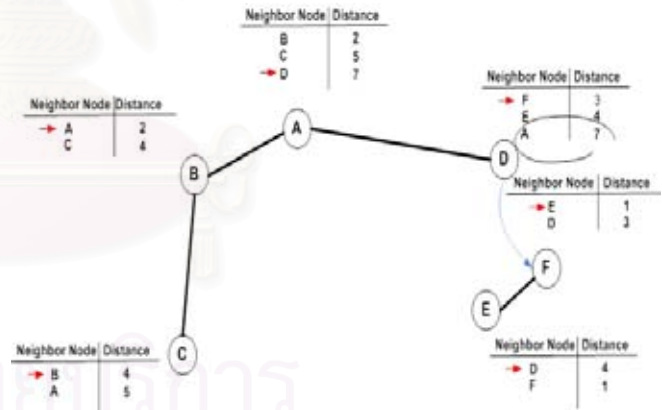
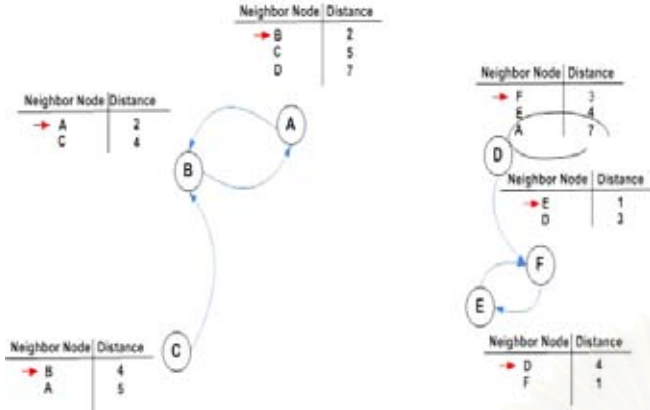


Fig 7. When the network has been changed, node that the distance table changed to be higher than its reserve will new reserve





**Fig 8.** The other node reserve its nearest node when the network have been changed

**B. Analytical**

We shall prove that this algorithm cannot create loops in the network. Thus, this algorithm can provide minimum spanning tree and battery life of all nodes can be saved.

Let  $N = \{1, \dots, n\}$  is the set of nodes in the network where  $n$  is number of all nodes.

$M = \{1, \dots, m\}$  is set of nodes which are connected to a loop and  $m > 2$ ,  $M \subset N$ .

First, we assume that this algorithm could possibly create loops. Let  $P = \{1, \dots, p\}$  is set of nodes which are reserved in a loop  $M$ .

If the loop occurs, we can get  $P = M$ .

Let  $D_{i,j}$  be the distance between node  $i$  to node  $j$  where  $i, j \in N$ . Also, we assume that  $D_{i,j} \neq D_{i,k}$  where  $j \neq k$  and  $j, k \in N$

$R_{a,b}$  represents node  $a$  has reserved node  $b$ ,  $a, b \in N$ .

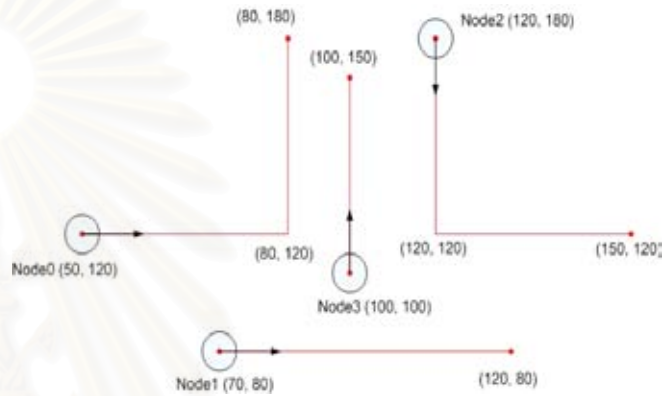
We will suppose  $R_{1,2}, R_{2,3}, \dots, R_{m-1,m}, R_{m,1}$  such that it create loops in the network. In other words, it consequently means that  $D_{1,2} > D_{2,3} > \dots > D_{m-1,m} > D_{m,1}$  but node 1 reserves node 2 which we could say  $D_{1,2} < D_{1,k}, k \in N$ . That causes a contradiction of the statements above, therefore this algorithm shall not create loop in the network as  $P \neq M$ .

**V. SIMULATION RESULTS**

**A. Simulation Environment**

The aim of the simulation is to investigate the relationship between transmission power and energy efficiency proposed by our algorithm. This simulation measures the number of overheads defined as the number of times that a node flood link state for topology updates. The consumed energy is, in turn, proportional to  $r^n$ . Therefore, we can reasonably write  $E = \alpha r^n$ . In our test, four nodes have the constant velocity of 10 m/s and the pattern of

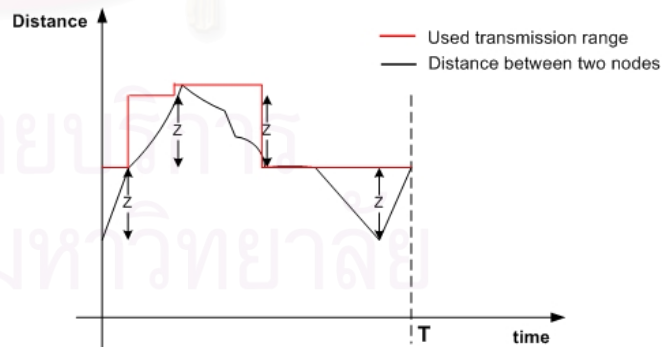
movement as shown in Fig 9. We can get the period of each node as follows; node 0 : 18 s, node 1 : 10 s, node2 : 18 s and node3 : 10 s. Thus, the common period of the network movement equals to 90 s. In the first period all nodes have the coverage transmission range at 100 m. The optimal transmission range found in the first period is appropriately adjusted in later period. Two strategies for energy adjustment are proposed. Firstly, we can adjust power at constant time interval. Secondly, the transmission power is adjusted whenever the transmission energy difference increases or decreases passing the threshold.



**Fig 9.** movement of simulation

We have performed two experiments to test the proposed algorithm. In the first experiment, the network will adjust the transmission power in constant interval. Number of times for adjusting transmission range within one period is defined as  $X$  ( $X = \{1, 2, 3, 5, 6, 9, 10, 15\}$ ).

In the second experiment, the network adjust the transmission power when the difference of transmission range reaches the threshold ( $Z$ ) value as depicted in Fig 10.



**Fig 10.** adjust transmission range by threshold

**B. Results**

Fig. 11 shows the transmission power versus the elapsed time. The result as shown in Fig 12 clearly indicates that the more frequent the transmission power is changed, the more energy can be saved. But this advantage becomes a disadvantage as it requires more

overhead flooding throughout the network in order to update the topology as shown in Fig 13. On the other hand, the probability un which the connectivity of any node pairs changed is high when the transmission power is low. This adjustment is, however, not directly related to the movement behaviors. Hence, the overhead of transmission of  $X = 10$  (10 adjustments in each period) is sometimes more than that of  $X = 9$  (9 adjustments in each period) as shown in Fig 13

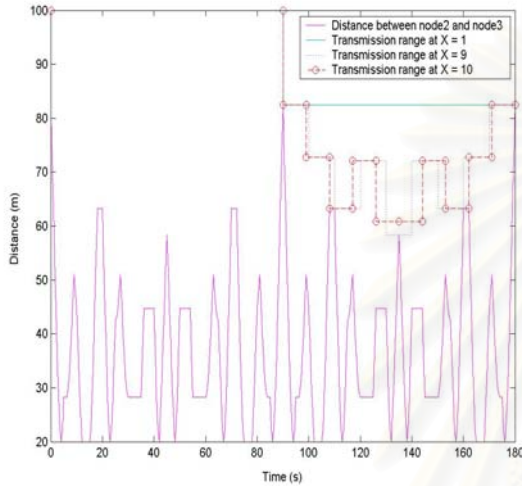


Fig 11. the used transmission power versus the elapsed time

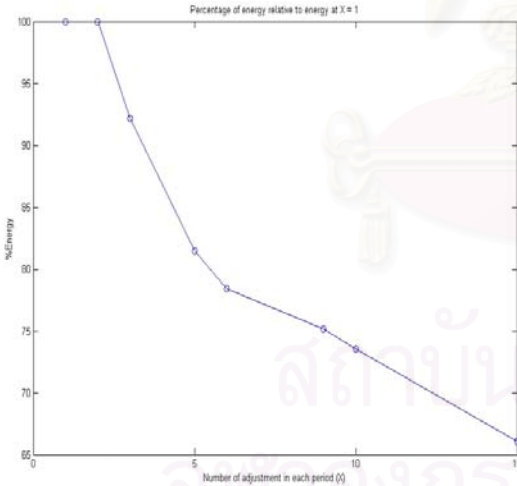


Fig 12. Energy consumption

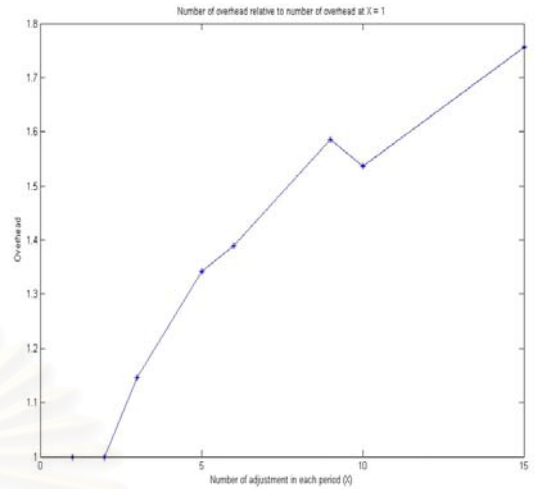


Fig 13. Number of overhead

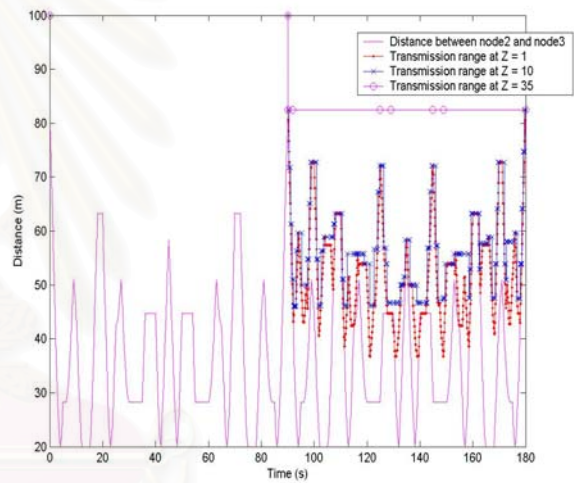


Fig 14. The used transmission power versus the elapsed time by using threshold

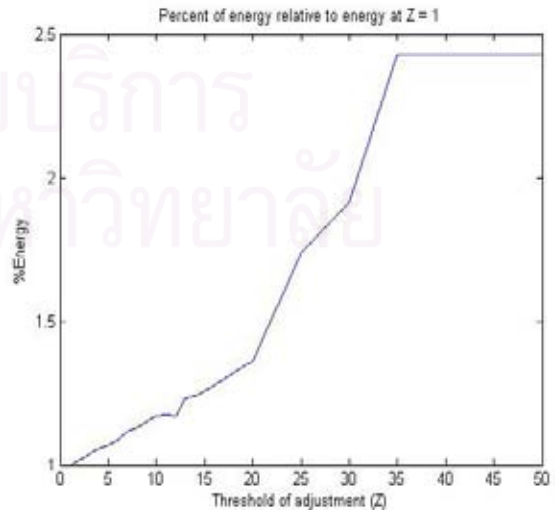
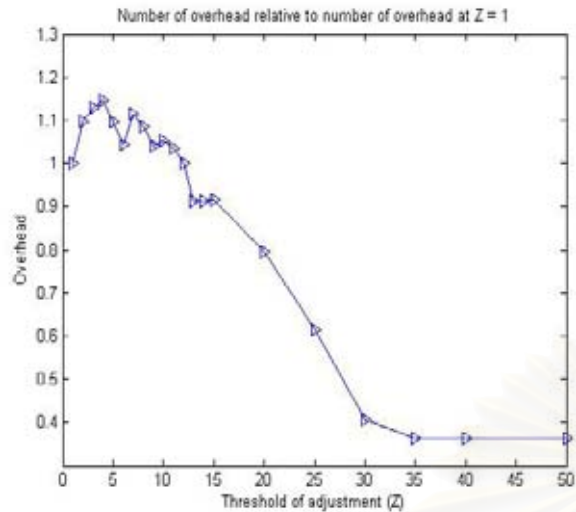


Fig 15. energy consumption by using threshold



**Fig 16.** number of overhead by using threshold

In the second experiment, the transmission range is adjusted according to the threshold value. The result shown in Fig 14 turns out to be as expected that the lower level of threshold yields fine adaptation. Energy consumption as a result of variation in threshold is shown in Fig 15. It is clearly that the energy can be saved when using lower level of threshold, but there are more chances of topology changing whenever the low transmission range is used. Moreover, Fig 16 shows the trend of decreasing number of overhead when the network consumes more energy. However, early state of the graph fluctuates because the setting of threshold is not appropriate with the changing rate of distance between node pairs.

## VI. CONCLUSION

The algorithm in this paper is proposed to optimize the transmission range and extend the battery lifetime under periodic movement environment. In a periodic movement environment, the first period is used as a learning period for the system power adjustment. The transmission range used by each mobile node has to be at minimum as much as possible in condition that the network must remain connected. This can be achieved because all nodes must learn about their neighbor nodes' movement and determine the suitable level of transmission power. The optimal transmission range found in the first period is then appropriately and timely adapted in the next periods. The simulation results show that the overhead could be significantly decreased. However, effective adjustment of transmission range can be achieved by considering the pattern of mobile node movement.

## ACKNOWLEDGMENT

This work was supported in part by the Cooperation Project between Department of Electrical

Engineering and Private Sector for Research and Development, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Thailand.

## REFERENCES

- [1] E. Dutkiewicz, "Impact of transmit range on throughput performance in mobile ad hoc networks," *Communications, 2001. ICC 2001. IEEE International Conference on*, Vol. 9, 11-14 June 2001, pp. 2933 – 2937.
- [2] S. C. Wang, D.S.L. Wei, S. Y. Kuo, "A topology control algorithm for constructing power efficient wireless ad hoc networks," *Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE*, Vol. 3, 1-5 Dec. 2003 pp. 1290 – 1295.
- [3] E. Poon, B. Li, "SmartNode: achieving 802.11 MAC interoperability in power-efficient ad hoc networks with dynamic range adjustments," *Distributed Computing Systems, 2003. Proceedings. 23rd International Conference on*, 2003, pp. 650 – 657.
- [4] M. Gerharz, C. de Waal, P. Martini, P. James, "A cooperative nearest neighbours topology control algorithm for wireless ad hoc networks," *Computer Communications and Networks, 2003. ICCCN 2003. Proceedings. The 12th International Conference on*, 20-22 Oct. 2003, pp. 412 – 417.
- [5] T. Camp, J. Boleng, and V. Davies, "A survey of mobility for ad hoc network research," *Wireless Communication & Mobile Computing (WCMC): Special issue on Mobile Ad Hoc Networking: Research, Trends and Applications*, 2002, pp. 483–502.
- [6] C. Shen, G. Borkar, S. Rajagopalan, and C. Jaikao, "Interrogation-Based Relay Routing for Ad hoc Satellite Networks," *IEEE Globecom 2002*, Taipei, Taiwan, November 17–21 2002.
- [7] P. Santi, D. M. Blough, Feodor Vainstein, "A probabilistic analysis for the range assignment problem in ad hoc networks," *Proceedings of the 2001 ACM International Symposium on Mobile ad hoc networking & computing (Mobihoc) 2001*, Long Beach, CA, USA.
- [8] P. Santi, D. M. Blough, "An evaluation of connectivity in mobile wireless ad hoc networks," *Proceedings of the International Conference on Dependable Systems and Networks*, 2002, pp. 89-98.
- [9] P. Santi, D. M. Blough, "The critical transmitting range for connectivity in sparse wireless ad hoc networks," *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, Vol. 2, Issue: 1, Jan.-March 2003, pp.25 – 39.
- [10] Q. Dai, J. Wu, "Computation of minimal uniform transmission power in ad hoc wireless networks," *Distributed Computing Systems Workshops, 2003. Proceedings. 23rd International Conference on*, 2003 pp. 680 – 684.
- [11] R. Wattenhofer, L. Li, P. Bahl, Y.-M. Wang, "Distributed topology control for power efficient operation in multihop wireless ad hoc networks," *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, vol. 3, 22-26 April 2001, pp. 1388 – 1397.
- [12] C. F. Chiasserini, I. Chlamtac, P. Monti, and A. Nucci, "Energy-Efficient Design of Wireless Ad Hoc Networks," *Proceeding of Networking 2002*, May 2002, pp.376-386.
- [13] S. J. Park, R. Sivakumar, "Load-sensitive transmission power control in wireless ad-hoc networks," *Global Telecommunications Conference, 2002. GLOBECOM '02. IEEE*, Vol. 1, 17-21 Nov. 2002, pp. 42 – 46.
- [14] J. Liu, B. Li, "MobileGrid: capacity-aware topology control in mobile ad hoc networks," *Computer Communications and Networks, 2002. Proceedings. Eleventh International Conference on*, 14-16 Oct. 2002, pp. 570 – 574.
- [15] G. Srivastava, P. Boustead, J. F. Chicharo, "A comparison of topology control algorithms for ad-hoc networks," *Australian Telecommunications, Networks and Applications Conference (ATNAC)*, 8-10 Dec. 2003.

## Power-Efficient Topology Control in Static Ad-Hoc Network based on Distributed Spanning Tree Algorithm

*P. Kulsirimongkol and C. Saivichit*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University, Phayathai, Pathumwan, Bangkok, 10330, Thailand  
Phone 0-2218-6907 Fax 0-2218-6912, E-mail: chaiyachet.s@chula.ac.th

### Abstract

The work presented in this paper is concerned with transmission range adjustment of nodes in Ad Hoc Networks. Each node performs distributed spanning tree algorithm for adjusting its appropriate transmission range. Three forms of the topology are investigated for transmission power adjustment based on proposed method. The simulation results show that the network which is low connectivity can achieve the energy savings.

**Keywords:** topology control, distributed spanning tree algorithm

### 1. Introduction

Ad Hoc network is a network in which every node in this network has no infrastructure could be freely moved. If any pair of nodes moves into within the transmission range of each other, they will create connections or links which allow them to communicate directly. Otherwise they will need other nodes (intermediate node) to forward data for them in case they are not within each other's transmission range. Intuitively, two important performance indicators are affected by the transmission range of mobile node. The first one that is affected by the transmission range is the network throughput. The average number of hops can be reduced if nodes transmit with high transmission power. However, high transmission range value increases the congestion in the MAC layer. The work in [1] showed the factors that influence appropriate selection of transmission range. The work in [2] investigated medium-sized networks (e.g. 20 nodes) that all nodes use the transmission power of which all nodes are within range of each other. Data throughput can then be maximized. The second affected performance factor is the energy which can be saved by using low transmission range value. With these reason, the problem of power-efficient topology control has attracted much interests of many researchers in the areas of mobile computing and networking [3].

The work presented in this paper proposes an algorithm that adjusts the transmission range for specified topology and considers the used energy with throughput of systems. Only the static network is investigated and assumed that each node possesses information of its neighbors' distances by translating the received power of any packet into the distance. Every node in the network adjusts the appropriate transmission power to realize the desired topology based on the proposed distributed spanning tree algorithm. The

increased message for this algorithm is equal to  $O(N^2/2)$  for the worst case scenario and  $O(N \log N)$  for the best case for a network of  $N$  nodes. The distributed spanning tree [4], The total number of messages required for a graph of  $N$  nodes and  $E$  edges is at most  $5N \log 2N + 2E$  that the number of edges in the ad hoc network is equal to  $O(N^2)$ . We show that the spanning tree topology can be used for saving of consumed energy in each node. There are two forms of network topology investigated in this work. The first one is that every node utilizes the maximum transmission range. The other one is that every node adjusts the transmission range until it can have at least  $n$ -connectivity or connect to at least  $n$  neighbors.

The rest of the paper is organized as follows: In Section 2, we review related works on network topology control and the transmission range adjustment algorithm. In Section 3, we present the adjustment methods of the transmission ranges in each node to obtain the desired topology by using the distributed spanning tree algorithm. The analysis of the message required by the algorithm and the energy equation are shown in Section 4. In Section 5 show the results. We conclude our paper in Section 6.

## 2. Related Work

### 2.1 Topology Control

In this research area, we assume that every node has ability to realize the position of its neighbors sufficiently to form the desired topology [5], [6]. However, the objective and constraints used in those works were different from ours. In [7], they constructed a graph based on Delaunay triangulation. In [8], a position-based distributed algorithm was proposed to achieve minimum energy and guaranteed strong connectivity of the entire stationary network.

### 2.2 The Transmission Range Adjustment Algorithm

In [9], they presented a centralized algorithm for static network and presented a distributed algorithm for mobile network. However, the centralized algorithm is not suitable to the network that nodes have only local information. Additionally, the distributed algorithm is not guaranteed that the whole network would be connected. Another work in [10] proposed a distributed algorithm which each node makes local decision about its transmission power based on direction information. Nevertheless, the algorithm cannot always guarantee  $n$ -connectivity of the network. The work in [11] suggests an algorithm that every node uses the maximum transmission power and determines the optimal transmission range.

When the algorithm is completed, every node should use the same optimal transmission range value. The [12] proposed a distributed control algorithm that nodes adjust the transmission range value to maintain the optimal “Contention Index” (CI) value. The CI is the product of node density and area size of local transmission range. However, adjusting the transmission range to maintain the CI value does not guarantee the network to be connected.

However, the previous research works only dealt with the algorithms for determining the desired topology or the optimal performance of the network. The limited source of energy has never been considered. In this work, we will determine the appropriate topology by considering the consumed energy and throughput in the systems

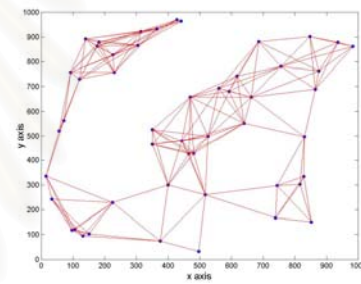
### 3. Transmission Range Adjustment

At the first step of transmission range adjustment, every node broadcasts a beacon packet to detect its neighbor nodes and distance between them. Each node keeps its own neighbor nodes in the “Neighboring” table. After that, each node will use the distributed minimum spanning tree algorithm to connect its neighbor nodes for the spanning tree topology.

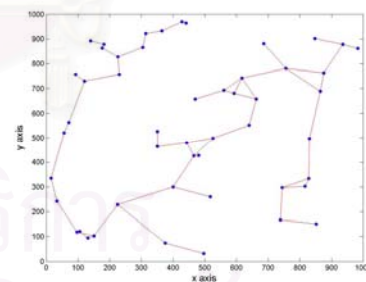
In the distributed minimum spanning tree algorithm, every node has two tables. The first table is called “neighbor subnetwork table”. The neighbor subnetwork table keeps the entire neighbor nodes which can be connected in its subnetwork. The other table is called “Connected Node Table”. The Connected Node Table keeps the connection of each node within its own subnetwork. There are two types of nodes which are “active” nodes and “passive” nodes. Active nodes which want to request connection with other subnet send CS (Construct) packet where Passive nodes only wait for connection request from a node in another subnetwork. At first, every node which is an active node selects its nearest neighbor node and then sends CS packet to that neighbor node to request constructing a link between them. When active nodes finish sending CS packet, the node will become a passive node. The CS packet contains source, destination, neighbor subnetwork (the neighbor nodes of source’s subnetwork) and connected node (the connection in source’s subnetwork). After a node receives a CS packet, if the new requested link which is the link between source and destination of packet matches with its nearest neighbor node, the receiving node will update connection information of its subnetwork information and flood CF (confirm) packet with a “confirm” bit to accept a requested link. Otherwise, node will flood CF packet with a “reject” bit to refuse the requested link. This type of packet contains source, destination, seq (sequence number), confirm bit, neighbor subnetwork (the neighbor nodes of source’s subnetwork) and connected node (the connection in source’s subnetwork). Upon receiving CF packet, if the sequence number in CF packet is newer than the receiving node’s sequence number, that node will check the next step that they have now categorized into two cases. The first case is that any node receives CF packet with a confirm bit and the new link in CF packet matches with its nearest

neighbor node. Node will update connection of its subnetwork and then floods this CF packet to its own neighbor nodes. The other case is that node receives a reject bit in CF packet. The receiving node will discard that CF packet. After that, nodes which are nearest to other subnetworks will become active nodes again. An active node shall send a CS packet to connect with other subnetworks. This process is repeated until the network is a minimum spanning tree.

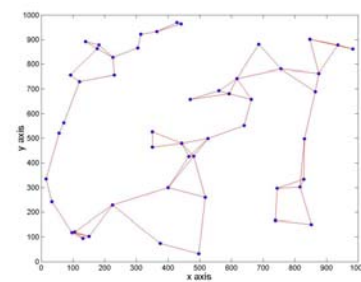
When the network is a spanning tree, each node will adjust its transmission range to be  $n$ -connectivity by comparing the distance of the spanning tree network with the distance of being  $n$ -connectivity network. The chosen transmission value is the maximum of those transmission range values. Nodes use the chosen transmission range value and broadcast beacons to declare connecting status to its desired neighbor nodes. When node receives a beacon packet, the newly chosen transmission range value which is the maximum value between the distance of node’s beacon packet with its current transmission range value will be used.



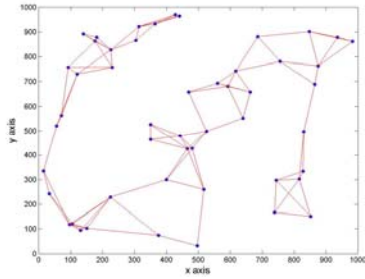
**Fig.1.** Forming topology by using the maximum transmission range value.



**Fig.2.** Forming topology by adjusting the transmission range value to maintain a spanning tree graph.



**Fig.3.** Forming topology by adjusting the transmission range value to maintain a 2-connectivity graph.



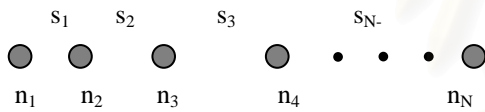
**Fig.4.** Forming topology by adjusting the transmission range value to maintain a 3-connectivity graph.

By using the maximum transmission range value, we got the dense topology, as shown in figure 1. Thus each path composed of a few hops. However, the MAC layer may be deeply affected and energy is more wasted. In figure 2-4, topology is sparse because of adjusting the transmission range value.

**4. Analytical Discussion**

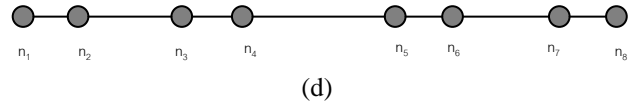
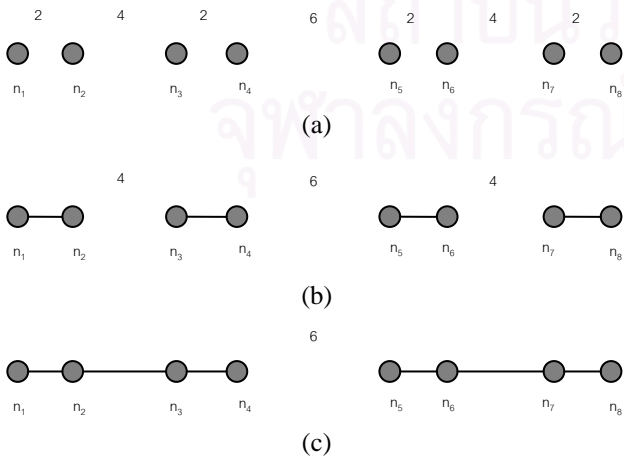
In this part, we shall consider the increasing number of message generated in the proposed distributed minimum spanning tree algorithm and discuss our proposed energy-related modeling.

**4.1 The Complexity of Proposed Distributed Minimum Spanning Tree Algorithm**



**Fig.5.** Worst case scenario

The worst case scenario is shown in figure 5 ( $s_1 < s_2 < s_3 < \dots < s_{N-1}$ ). The spanning tree will be connected by  $N - 1$  times. Each time that nodes connect,  $N$  messages will be flooded. Thus the maximum number of messages generated in this case should be in the order of  $O(N^2)$ .



**Fig.6.** The sequence of connecting in the best case scenario.

Figure 6 shows the sequence of connecting in the best case scenario. The number of connection a spanning tree topology requires is equal to  $O(\log N)$ . Thus the most message number of this case should be equal to  $O(N \log N)$ .

**4.2 Energy Model**

This work has considered “consumed energy” into two parts. The first part is the energy used for sending a packet which is, in turn, proportional to  $r^n$ . Therefore we can reasonably present the energy for sending a packet as in (1).

$$E_{send} = t_{send} \alpha r^2 \tag{1}$$

- $E_{send}$  The used energy for sending a packet (J)
- $t_{send}$  Time of sending packet (sec)
- $\alpha$  Constant value (J/s.m<sup>2</sup>)
- $r$  The used transmission range value for sending a packet (m)

The second part is the energy used when receiving a packet which can be obtained by (2).

$$E_{rec} = t_{rec} \beta \tag{2}$$

- $E_{rec}$  The used energy for sending a packet (J)
- $t_{rec}$  Time of sending packet (sec)
- $\beta$  Constant value (J/s)

**5. Simulation**

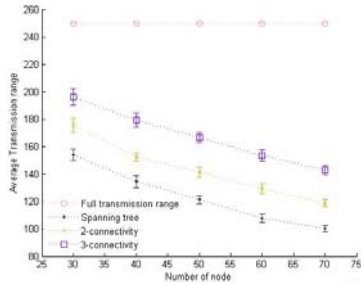
**5.1 Simulation Environment**

We varied number of nodes in the test network between 30 and 70. Each node is randomly placed over 1000m\*1000 m. For the traffic model, we consider constant bit rate (CBR) data source; each sends packets at a fixed rate of 2 packet/sec. The data packet size is 512 bytes and the initial energy of each node is  $5 * 10^5$  J. For the MAC layer, the IEEE 802.11 DCF is used.

At the initial time of simulation, every node in the network adjusts the appropriate transmission power to achieve the  $n$ -minimum spanning tree topology ( $n$  is the connectivity of each node). Each node uses this appropriate transmission power to “connect” the entire network. The simulation will be terminated whenever a node has depleted its energy. The simulation will be presented in the next part.

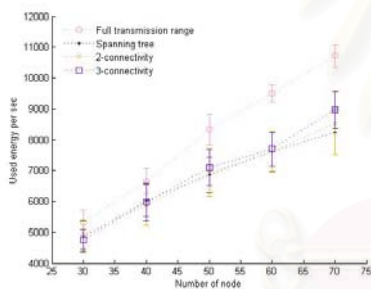
## 5.2 Simulation Result

Figure 7 shows the average transmission range value of the network. It clearly shows that the average transmission range value of the minimum spanning tree is lower than other. Additionally, the average transmission range can be reduced when the number of node is increased. This is because of increasing density of network.

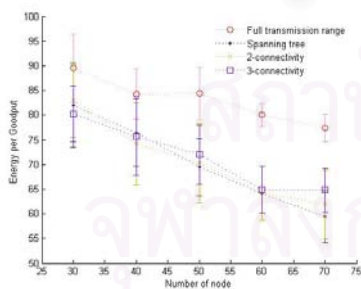


**Fig.7.** Average transmission range versus Number of node

Thus, the network which uses transmission range adjustment requires lower energy than those with full transmission range as shown in Figure 8 and 9 (Note that goodput is the successfully delivered packets). The three scenarios which deployed the transmission range adjustment techniques do not show different results. However, we believe that if simulation is run for longer times, the minimum spanning tree topology can use the lowest energy.

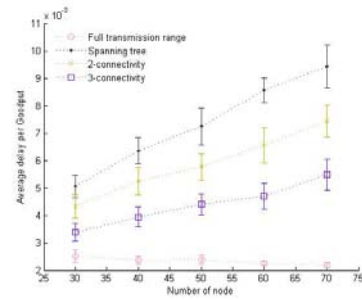


**Fig.8.** Used energy per sec versus number of node.



**Fig.9.** Used energy per goodput versus number of node.

On the other hand, Figure 10 shows the disadvantage of using the transmission range adjustment. Average delay and number of hop will increase when the connectivity of node is reduced



**Fig.10.** Average delay per goodput versus number of node.

## 6. Conclusions

This paper, we presented the transmission range adjustment techniques by using the distributed spanning tree algorithm. We tested four forms of the topology via simulation. The results show that the networks which use lower connectivity can achieve more energy saving than the networks which use full transmission range. This subsequently leads to a good “goodput” of the system.

## References

- [1] M. Krunz, A. Muqattash, L. Sung-Ju, “Transmission power control in wireless ad hoc networks: challenges, solutions and open issues,” *IEEE Network* Vol. 18, Issue 5, Sept.-Oct. 2004 pp. 8 – 14.
- [2] E. Dutkiewicz, “Impact of transmit range on throughput performance in mobile ad hoc networks,” *IEEE International Conference on Communications, 2001. ICC 2001.* Vol. 9 , 11-14 June 2001, pp. 2933 – 2937.
- [3] G. Srivastava, P. Boustead, J. F. Chicharo, “A comparison of topology control algorithms for ad-hoc networks,” *Australian Telecommunications, Networks and Applications Conference (ATNAC)*, 8-10 Dec. 2003.
- [4] R.G. Gallager, P.A. Humblet, P.M. Spira, “ A distributed algorithm for minimum weight spanning trees,” *ACM Transactions on Programming Languages and Systems (TOPLAS)* 5 (1983) pp. 66–77.
- [5] X.Y. Li, Y. Wang, W.Z. Song, “Applications of k-local MST for topology control and broadcasting in wireless ad hoc networks,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* Vol. 15, Issue 12, Dec. 2004 pp. 1057 – 1069.
- [6] X.Y. Li, G. Calinescu, P.J. Wan, Y. Wang, “Localized Delaunay triangulation with application in ad hoc wireless networks,” *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems* Vol 14, Issue 10, Oct. 2003 pp.1035 - 1047
- [7] L. Hu, “Topology control for multihop packet radio networks,” *IEEE Transactions on Communications* Vol. 41, Issue 10, Oct. 1993 pp. 1474 - 1481
- [8] V. Rodoplu, T.H. Meng, “Minimum energy mobile wireless networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* Vol 17, Issue 8, Aug. 1999 pp. 1333 – 1344.
- [9] R. Ramanathan, R. Rosales-Hain, “Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment,” *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE* Vol 2, 26-30 March 2000 pp. 404 - 413
- [10] R. Wattenhofer, L. Li, P. Bahl, Y.-M. Wang, “ Distributed topology control for power efficient operation in multihop wireless ad hoc networks,” *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, vol. 3 , 22-26 April 2001, pp. 1388 – 1397.
- [11] S. Narayanaswamy, V. Kawadia, R. S. Sreenivas, P. R. Kumar, “Power control in ad-hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol,” in *European Wireless Conference, 2002..*
- [12] J. Liu, B. Li, “MobileGrid: capacity-aware topology control in mobile ad hoc networks,” *Computer Communications and Networks, 2002. Proceedings. Eleventh International Conference on* , 14-16 Oct. 2002, pp. 570 – 574.

# TOPOLOGY CONTROL BASED ON ENERGY-EFFICIENT CONCEPT OF MOBILE AD HOC NETWORKS FOR MULTIMEDIA COMMUNICATION

*Pakorn Kulsirimongkol and Chaiyachet Saivichit*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering  
Chulalongkorn University, Phayathai, Pathumwan, Bangkok, 10330, Thailand  
Phone 0-2218-6907 Fax 0-2218-6912, E-mail: [chaiyachet.s@chula.ac.th](mailto:chaiyachet.s@chula.ac.th)

## ABSTRACT

An algorithm for Transmission Range Adjustment for nodes in Ad Hoc Networks is proposed. Each node executes the distributed spanning tree (SPT) algorithm to select an appropriate transmission range to achieve the preferred  $n$ -connectivity. It could be seen from simulation results that, with lower connectivity, more delay and jitter are witnessed. Nevertheless, more energy saving could be appreciated than those without transmission range control.

## 1. INTRODUCTION

In an Ad Hoc networking, every node could possibly move freely and they require no infrastructure for enabling communication. With recent multimedia applications, data transfer among Ad Hoc nodes requires networks to be “alive” as long as the data transfer period may essentially require. This is to ensure that such communication session would be meaningful. There are two important performance indicators affected by the signal transmission range of mobile nodes. The first one is the network “Throughput” as the average number of transmission hops can be reduced if nodes transmit with high transmission power. However, high power usage could increase congestion in the MAC layer. An appropriate selection of transmission power is based on several factors presented in [1]. The second factor is the energy saved by using low signal transmission range value. With this reason, the problem of energy-efficient topology control has attracted interests of many researchers from the areas of mobile computing and networking.

The algorithm developed by authors shall adjust the transmission range of nodes to form a specific topology and consider the energy consumption along side the throughput of the system. Every node adjusts the transmission power to realize the desired topology based on the proposed distributed spanning tree (SPT) algorithm. In the worst case scenario, the amount of

message generated by this algorithm equals to  $O(N^2/2)$  and equals to  $O(N \log N)$  for the best case for a network with  $N$  nodes. The distributed spanning tree [2], The total number of messages required for a graph of  $N$  nodes and  $E$  edges is at the maximum of  $5N * \log 2N + 2E$  where the maximum number of edges in the ad hoc network is  $O(N^2)$ . We can show that the spanning tree topology can achieve energy consumption saving in each node. Two scenarios of network topology were investigated in this work: maximum transmission power and  $n$ -connected network topology.

The rest of the paper is organized as follows: In Section 2, a literature review on network topology control and the transmission range adjustment algorithm is presented. In Section 3, we present the proposed distributed spanning tree algorithm to adjust the transmission ranges of each node to obtain the desired topology. The analysis of the message required by the algorithm and the energy equation are shown in Section 4. The results are shown in Section 5 and conclude our discussion in Section 6.

## 2. RELATED WORK

The work in [3] proposed a distributed algorithm for each node to make local decision on its suitable transmission power based on direction information. Nevertheless, the algorithm will not always guarantee  $n$ -connectivity of the network. Another work in [4] developed a centralized algorithm for static network and presented a distributed algorithm for dynamic network. However, the centralized algorithm is not suitable to the network whose nodes have only local information. Additionally, the distributed version was not guaranteed the network to be connected. The work in [5] suggested an algorithm that every node also utilizes the maximum transmission power and determines the optimal transmission range. At the end of computation process, all nodes should finally use the same value of optimal transmission range. The authors of work presented in [6] proposed the localized algorithm for constructing power



efficient topology. This algorithm can reduce the transmission power by replacing path of each critical link.

However, the previous research works only deal with the algorithms for determining the desired topology or the optimal performance of the network. The limited source of energy has never been considered. In this work, we will determine the appropriate topology by considering the consumed energy and throughput in the systems.

### 3. TRANSMISSION RANGE ADJUSTMENT

Firstly, every node starts broadcasting a beacon packet to determine neighboring nodes and distance between them. The information obtained will be kept in the “Neighboring” table. Then, each node will use the distributed minimum spanning tree algorithm to connect its neighbor nodes for the spanning tree topology.

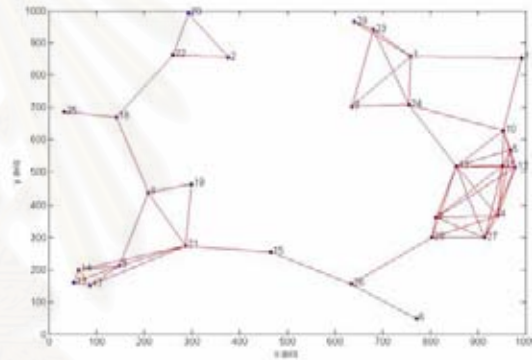
In the algorithm, every node shall create two tables. The first table is called “Neighbor Subnetwork Table”. This table keeps the entire neighbor node which can be connected in its subnetwork. The other table is called “Connected Node Table”. This table keeps the connection of each node within its own subnetwork. Nodes are classified into two types: “active” nodes and “passive” nodes. An active will send *CL* (Construct Link) packet to request connection whereas passive nodes only wait for the connection request from a node in another subnetwork. Firstly, every active node selects its nearest neighbor node and then sends *CL* packet to that neighbor node to request constructing a link between them. When active nodes finish sending *CL* packet, the node becomes a passive node. The contents of a *CL* packet contains source, destination, neighbor subnetwork (the neighbor node of source’s subnetwork) and connected node (the connection in source’s subnetwork).

After a node receives a *CL* packet, if the newly requested link matches with its nearest neighbor node, the receiving node will update connection information of its subnetwork information and flood *CF* (Confirm) packet with a confirm bit to accept a requested link. Otherwise, node will flood *CF* packet with a reject bit to refuse the requested link. This type of packet contains source, destination, seq, confirm bit, neighbor subnetwork (the neighbor node of source’s subnetwork) and connected node (the connection in source’s subnetwork).

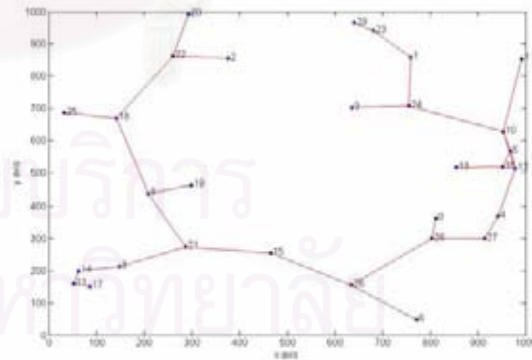
Upon receiving *CF* packet, if the sequence number in *CF* packet is newer than the receiving node’s sequence number, that node will check the next step that they have now categorized into two cases. The first case is that any node receives *CF* packet with a confirm bit and the new link in *CF* packet matches with its nearest neighbor node. Node will update connection of its subnetwork and then floods this *CF* packet to its own neighbor nodes. The

other case is that node receives a reject bit in *CF* packet. The receiving node will discard that *CF* packet. After that, nodes those are nearest to other subnetworks will become an active node again. Active node shall send a *CL* packet to connect other subnets. This process is repeated until the network is a minimum spanning tree.

When the network is a spanning tree, each node will adjust its transmission range to be  $n$ -connectivity by comparing the distance of the spanning tree network with the distance of being  $n$ -connectivity network. The chosen transmission value is the maximum of those transmission range values. Nodes use the chosen transmission range value and broadcast beacons to declare connecting status to its desired neighbor nodes. When node receives a beacon packet, the new chosen transmission range value which is the maximum value from the distance of node’s beacon packet with its current transmission range value will be used.



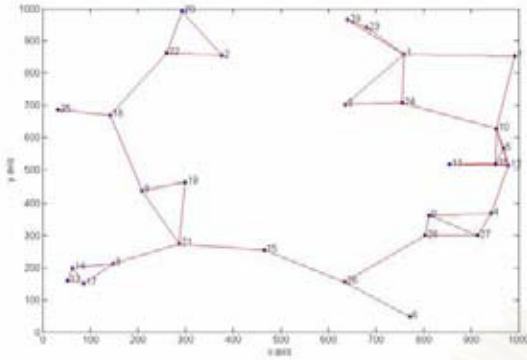
**Fig.1.** Topology forming by maximum transmission power.



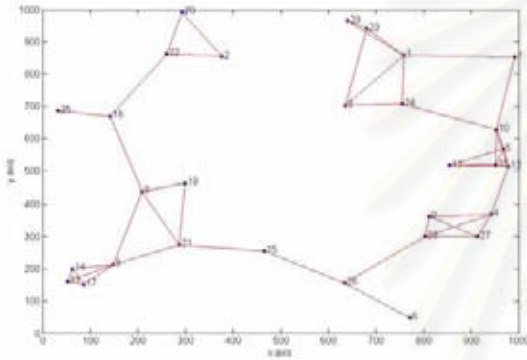
**Fig.2.** Topology forming by adjusting the transmission power to maintain a spanning tree graph.

By using the maximum transmission power, we could obtain a dense topology, as shown in Figure 1. Thus, each path composes of a few hops. However, the MAC layer may be severely affected and more energy is consumed. In Figure 2, 3 and 4, topology becomes sparse as the

transmission power has been adjusted.



**Fig.3.** Topology forming by adjusting the transmission power to maintain a 2-connected graph.



**Fig.4.** Topology forming by adjusting the transmission power to maintain a 3-connected graph.

#### 4. ENERGY MODEL ANALYSIS

This paper categorizes the energy into two parts. The first part is the energy consumed when a packet is sent which is, in turn, proportional to  $r^n$ . Therefore, we can reasonably write the energy of sending a packet as follow by (1) (Note we use  $n = 2$  in this work).

$$E_{send} = t_{send} \alpha r^2 \quad (1)$$

$E_{send}$	The energy consumption for sending a packet (J)
$t_{send}$	Time of sending packet (sec)
$\alpha$	Constant value (J/s.m <sup>2</sup> )
$r$	The used transmission range value for sending a packet (m)

The second part is the energy of receiving a packet which can be calculated by (2).

$$E_{rec} = t_{rec} \beta \quad (2)$$

$E_{rec}$	The energy consumption for sending a packet (J)
$t_{rec}$	Time of sending packet (sec)
$\beta$	Constant value (J/s)

## 5. SIMULATION

### 5.1. Simulation Environment

In simulation, we tested four type of network (full transmission range, spanning tree, 2-connected and 3-connected). There are three flows of packet in each network. The first flow is transmitted from node 17 to node 16. The second flow is transmitted from node 20 to node 29. The last is transmitted from node 24 to node 25. The data packet size is 512 bytes. Arrival rate of packet and simulation time, they are equal to 4 packet/s and 1000s, respectively. For MAC layer, the IEEE 802.11 DCF is used.

At the beginning of the simulation, every node in the network adjusts the appropriate transmission power to achieve the  $n$ -minimum spanning tree topology ( $n$  is the connectivity of each node). Each node uses this appropriate transmission power for connecting the network. The simulation will be terminated whenever the energy of that node is depleted. Simulation result will be presented in the next section.

We generated three pairs of origin-destination node pairs as 1) from node 17 to 16, 2) from node 20 to 29 and 3) from node 24 to 25 with the average arrival rate of 4 packets/second. The experiment time was 1000 seconds. Then, the ‘‘jitter’’ and ‘‘consumed energy’’ were measured. Average jitter could be obtained from (3) as:

$$J_{ave}(i) = w * J(i) + (1-w) * J_{ave}(i-1) \quad (3)$$

where

$w$	: weighted value between 0 and 1
$J_{ave}(i)$	: average jitter up to packet $i$
$J(i)$	: jitter of packet $i$

### 5.2. Simulation Results

In Figure 5, network with low connectivity takes longer time to accomplish packet delivery. This is due to longer path length as shown in Table 1. Figure 6 and Table 1 show jitter value in each test scenario. With low traffic scenario tested, jitter value appears to be higher in case of low connectivity due to paths with higher hop count. This is because, according to IEEE 802.11, nodes need to randomly select backoff value for transmitting data at each hop. This could result in, for a longer path, a possible higher difference in delay for each packet.

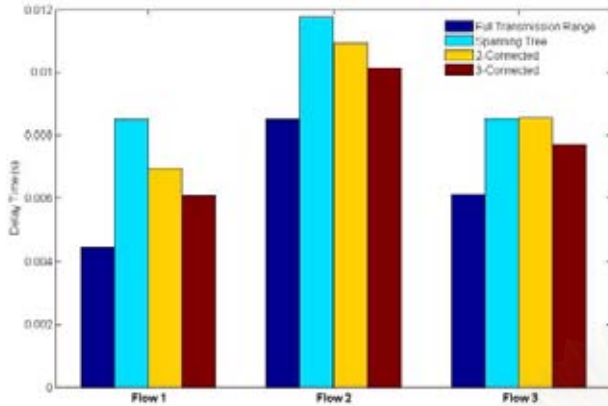


Fig 5. Average delay time (s)

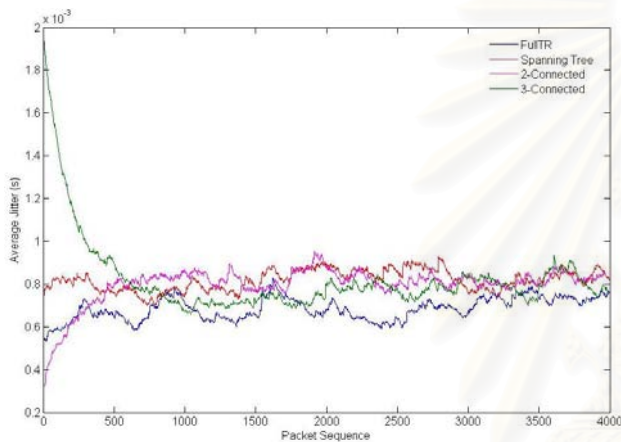


Fig 6. Average jitter of flow 3 vs Packet sequence

Table 1. Average jitter (s) and hop number

Jitter (s), Hop number	Flow 1	Flow 2	Flow 3
FullTR	5.99* 10 <sup>-4</sup> , 6	7.82* 10 <sup>-4</sup> , 11	6.94* 10 <sup>-4</sup> , 8
SPT	8.11* 10 <sup>-4</sup> , 11	9.58* 10 <sup>-4</sup> , 15	8.23* 10 <sup>-4</sup> , 11
2-Connected	8.06* 10 <sup>-4</sup> , 9	9.46* 10 <sup>-4</sup> , 14	8.24* 10 <sup>-4</sup> , 11
3-Connected	6.86* 10 <sup>-4</sup> , 8	8.96* 10 <sup>-4</sup> , 13	7.61* 10 <sup>-4</sup> , 10

Table 2. Energy consumption

	Total Energy Consumption	Number of Node	Ave Energy Consumption
FullTR	2.53*10 <sup>6</sup>	17	1.49*10 <sup>5</sup>
SPT	2.03*10 <sup>6</sup>	22	9.23*10 <sup>4</sup>
2-Connected	2.09*10 <sup>6</sup>	20	1.04*10 <sup>5</sup>
3-Connected	2.09*10 <sup>6</sup>	18	1.16*10 <sup>5</sup>

Table 2 shows the energy consumption results from simulation. The network without transmission range adjustment will consume more energy than the network which is capable of signal transmission power adjustment as the energy consumed is proportional to  $r^2$ . The distance seems to have more effect to the energy consumption than the hop count of paths.

## 6. CONCLUSION

In this paper, we presented a methodology for transmission range adjustment to achieve energy saving by using the distributed spanning tree algorithm. The issue of energy saving is an important issue for mobile multimedia communication where prolonged data transfer is essential. Nodes were randomly placed in the simulation area and used this algorithm to form the preferred topology. We tested four forms of the topology via simulation. The results showed that the networks with lower connectivity have more delay time and jitter in the case of low traffic. However, they can achieve more energy saving than those which use full transmission range.

## 7. REFERENCES

- [1] M. Krunz, A. Muqattash, L. Sung-Ju, "Transmission power control in wireless ad hoc networks: challenges, solutions and open issues," *Network, IEEE* Vol. 18, Issue 5, Sept.-Oct. 2004 pp. 8 – 14.
- [2] R.G. Gallager, P.A. Humblet, P.M. Spira, "A distributed algorithm for minimum weight spanning trees," *ACM Transactions on Programming Languages and Systems (TOPLAS)* 5 (1983) pp. 66–77.
- [3] R. Wattenhofer, L. Li, P. Bahl, Y.-M. Wang, "Distributed topology control for power efficient operation in multihop wireless ad hoc networks," *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, vol. 3, 22-26 April 2001, pp. 1388 – 1397.
- [4] R. Ramanathan, R. Rosales-Hain, "Topology control of multihop wireless networks using transmit power adjustment," *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE* Vol 2, 26-30 March 2000 pp. 404 – 413
- [5] S. Narayanaswamy, V. Kawadia, R. S. Sreenivas, P. R. Kumar, "Power control in ad-hoc networks: Theory, architecture, algorithm and implementation of the COMPOW protocol," in presented in *European Wireless Conference*, 2002. (<http://black.csl.uiuc.edu/~kawadia/papers/compow.pdf>).
- [6] S. C. Wang, D.S.L. Wei, S. Y. Kuo, "A topology control algorithm for constructing power efficient wireless ad hoc networks," *Global Telecommunications Conference*, 2003. GLOBECOM '03. IEEE, Vol. 3, 1-5 Dec. 2003 pp. 1290 – 1295.

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ปกรณ์ กุลศิริมงคล เกิดวันที่ 5 พฤศจิกายน พ.ศ. 2523 ที่จังหวัดสมุทรปราการ เข้ารับการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ณ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2541 และได้สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ในปีการศึกษา 2544 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2545



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย