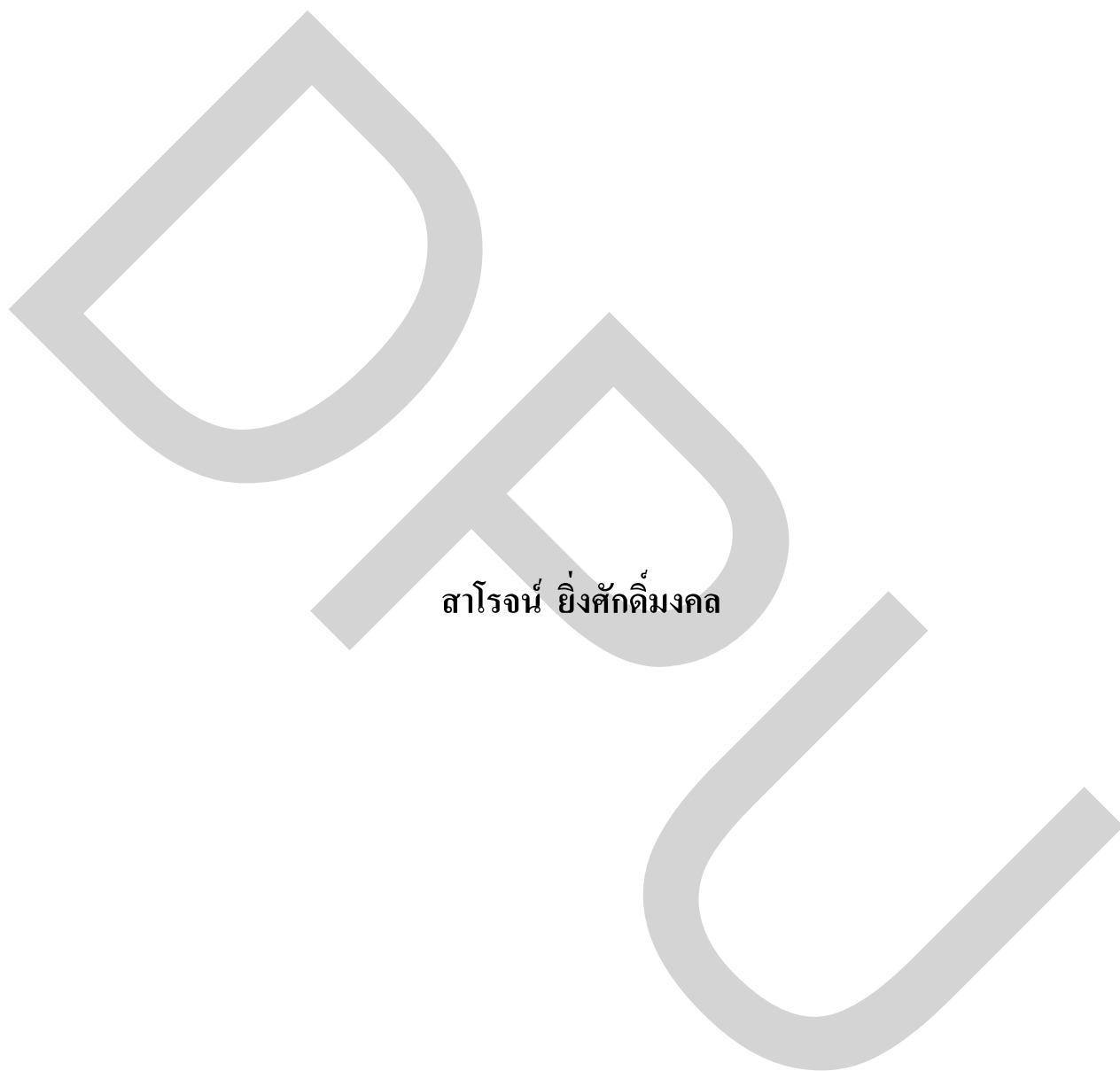


ความจระบบการใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตบนโครงข่ายไร้สาย  
แบบเมฆประเภทกริด



สโรจน์ ยิ่งศักดิ์มงคล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์

พ.ศ. 2555

# **Capacity of VoIP system over Grid-typed Wireless Mesh Networks**



**Saroj Yingsakmongkhon**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements**

**for the Degree of Master of Engineering**

**Department of Computer and Telecommunication Engineering**

**Graduate School, Dhurakij Pundit University**

**2012**

## กิตติกรรมประกาศ

การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายฝ่ายเป็นอย่างดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ชัยพร เขมะภักตะพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ข้อคิดเห็น คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย อาจารย์ ดร.ชนัญ จารุวิทย์โกวิท อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม คอยให้คำแนะนำให้คำปรึกษา ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหาต่างๆ และ อาจารย์ ดร.ประศาสน์ จันทราทิพย์ ที่กรุณาได้รับเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์บุญยวีร์ จามจรีกุล ที่กรุณาได้รับเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้คำชี้แนะ แก้ไขข้อบกพร่องของ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ส่วนหนึ่งของความสำเร็จในครั้งนี้ก็มาจากเพื่อนๆ ที่คอยแนะนำ และเป็นกำลังใจ รวมถึง คุณพ่อและคุณแม่ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจให้ตลอดระยะเวลาที่จัดทำวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้

ท้ายสุดนี้ประโยชน์และความดีของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกๆ ท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือและเสริมสร้างกำลังใจ ใจให้การจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ด้วยดี

ศาโรจน์ ยิ่งศักดิ์มิ่งคล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ฅ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญตาราง .....	ซ
สารบัญรูป .....	ฌ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	2
1.3 สมมติฐานของการวิจัย .....	3
1.4 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	3
2. ทฤษฎี และผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 สถาปัตยกรรมโครงข่ายไร้สายแบบเมช .....	4
2.2 โพรโทคอลการหาเส้นทางในโครงข่ายไร้สายแบบเมช .....	13
2.3 Voice over Internet Protocol (VoIP).....	16
2.4 E-Model .....	19
2.5 แบบจำลองนาคากามิ .....	20
2.6 OMNET++ .....	23
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
3. ระเบียบวิธีวิจัย .....	26
3.1 แนวทางการวิจัยและพัฒนา .....	26
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย .....	27
3.3 แผนการดำเนินงาน .....	27
3.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน .....	29

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4. ผลการศึกษา.....	33
4.1 ผลการวิจัย.....	33
4.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	39
5. สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	51
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	51
5.2 ข้อจำกัดของระบบ.....	55
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	55
บรรณานุกรม.....	56
ภาคผนวก.....	60
ประวัติผู้เขียน.....	73

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตาราง R-FACTOR, QUALITY RATINGS AND MOS.....	19
2.2 ตารางการแปลงค่าจาก R-factor เป็น MOS .....	19
2.3 ตารางการ pathloss exponent (Alpha) ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ.....	22
3.1 ตารางแผนการดำเนินงาน .....	28
3.2 ตารางค่าพารามิเตอร์ของระบบ.....	32
4.1 ตารางแสดงค่า Loss และ End to end delay ที่มีผลทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 ในแต่ละ hop ที่ระยะห่าง 100 เมตรระหว่าง AP.....	40
4.2 ตารางแสดงค่าปัจจัยหลักที่มีผลทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 ในแต่ละ hop ที่ระยะห่าง 100 เมตรระหว่าง AP.....	42
4.3 ตารางแสดงค่า Loss และ End to end delay ที่มีผลทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 ในแต่ละ hop ที่ระยะห่าง 200 เมตรระหว่าง AP.....	43
4.4 ตารางแสดงค่าปัจจัยหลักที่มีผลทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 ในแต่ละ hop ที่ระยะห่าง 200 เมตรระหว่าง AP.....	45
4.5 ตารางแสดงจำนวนสายที่มากที่สุดของ VoIP ในแต่ละ hop ของแต่ละสภาพแวดล้อม Alpha จนค่าของ MOS ต่ำกว่า 3.5 ที่ระยะห่าง 100 เมตร และ 200 เมตรระหว่าง AP.....	46
5.1 ตารางแสดงสรุปผลการวิจัยที่ระยะห่างระหว่าง AP ที่ 100 เมตร .....	51
5.2 ตารางแสดงสรุปผลการวิจัยที่ระยะห่างระหว่าง AP ที่ 200 เมตร .....	52
5.3 ตารางแสดงสรุปผลการวิจัยเมื่อระยะห่างระหว่าง AP เพิ่มขึ้นจาก 100 เมตร เป็น 200 เมตร .....	53

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 Infrastructure/Backbone WMNs .....	6
2.2 Hybrid WMNs.....	7
2.3 การหาเส้นทางในโครงข่ายของ AODV.....	15
2.4 การทำงานในระบบ VoIP.....	17
3.1 WMNs ประเภท Grid metrics 6 * 6.....	30
4.1 จำนวนสายที่มากที่สุดของ VoIP ในแต่ละ hop ของสภาพแวดล้อม Alpha = 2 จนค่าของ MOS ต่ำกว่า 3.5 ที่ระยะห่าง 100 เมตรระหว่าง AP.....	34
4.2 จำนวนสายที่มากที่สุดของ VoIP ในแต่ละ hop ของสภาพแวดล้อม Alpha = 2.4 จนค่าของ MOS ต่ำกว่า 3.5 ที่ระยะห่าง 100 เมตรระหว่าง AP.....	34
4.3 จำนวนสายที่มากที่สุดของ VoIP ในแต่ละ hop ของสภาพแวดล้อม Alpha = 2.8 จนค่าของ MOS ต่ำกว่า 3.5 ที่ระยะห่าง 100 เมตรระหว่าง AP.....	35
4.4 จำนวนสายที่มากที่สุดของ VoIP ในแต่ละ hop ของสภาพแวดล้อม Alpha = 2 จนค่าของ MOS ต่ำกว่า 3.5 ที่ระยะห่าง 200 เมตรระหว่าง AP.....	35
4.5 จำนวนสายที่มากที่สุดของ VoIP ในแต่ละ hop ของสภาพแวดล้อม Alpha = 2.4 จนค่าของ MOS ต่ำกว่า 3.5 ที่ระยะห่าง 200 เมตรระหว่าง AP.....	36
4.6 จำนวนสายที่มากที่สุดของ VoIP ในแต่ละ hop ของสภาพแวดล้อม Alpha = 2.8 จนค่าของ MOS ต่ำกว่า 3.5 ที่ระยะห่าง 200 เมตรระหว่าง AP.....	36

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ความจระบบการใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตบนโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภทกริด
ชื่อผู้เขียน	สาโรจน์ ยิงค์คิมงคล
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.ชัยพร เหมะภาคะพันธ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ ดร.ธัญ จารุวิทย์โกวิท
สาขาวิชา	วิศวกรรมคอมพิวเตอร์และโทรคมนาคม
ปีการศึกษา	2554

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของการให้บริการในการใช้งาน VoIP และหาปริมาณการใช้งาน VoIP ที่มากที่สุดภายใต้สภาพแวดล้อมเขตที่โล่ง เขตกึ่งชุมชน และเขตชุมชน โดยคุณภาพการให้บริการอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (ค่า MOS ไม่ต่ำกว่า 3.50) งานวิจัยนี้จำลองการใช้งาน VoIP ประเภทเดียวและ VoIP ร่วมกับข้อมูลประเภท FTP ที่ 20 และ 40% ของขนาดช่องสัญญาณ 11 Mbps ใช้มาตรฐาน CODEC G.729 ที่ระยะห่างระหว่างจุดเข้าถึง (APs) 100 และ 200 เมตร กำลังส่ง 100 มิลลิวัตต์ และแบบจำลองนาคามีในคอมพิวเตอร์โมเดลของความจระบบการใช้งาน VoIP บนโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภทกริดแบบ multi-hop เพื่อให้ผู้ให้บริการสามารถประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนโครงข่ายไร้สายแบบเมช ก่อนการติดตั้งเพื่อใช้งานจริง

ผลการวิจัยพบว่าควรจะมีการใช้งาน VoIP ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่ระยะห่างระหว่าง AP 100 เมตร โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อคุณภาพของการให้บริการในแต่ละสภาพแวดล้อมในงานวิจัยนี้มีอยู่ 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 คือเมื่อมีการใช้งานโครงข่ายไร้สายจำนวน 1 และ 2 hop จะมีการสูญเสียแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลเป็นปัจจัยหลัก กรณีที่ 2 คือเมื่อมีการใช้งานโครงข่ายไร้สายจำนวน 3, 4 และ 5 hop จะมีความล่าช้าทางเวลาเป็นปัจจัยหลัก กรณีที่โครงข่ายมีการใช้งาน VoIP ในพื้นที่โล่งพบว่าเมื่อมีการใช้งาน VoIP อย่างเดียวและเมื่อมีการส่งข้อมูลประเภท FTP 20% ร่วมด้วยสามารถใช้งานได้ถึง 5 hops แต่เมื่อ FTP มีปริมาณ 40% จะสามารถใช้งานได้ไม่เกิน 4 hops สำหรับพื้นที่กึ่งชุมชนพบว่าเมื่อมีการใช้งาน VoIP อย่างเดียวและมีการส่งข้อมูลประเภท FTP 20% สามารถใช้งานได้ไม่เกิน 2 hops เมื่อ FTP มีปริมาณ 40% จะสามารถใช้งาน VoIP ได้ไม่เกิน 1 hops สุดท้ายพบว่าพื้นที่ชุมชนไม่สามารถใช้งาน VoIP บนโครงข่ายได้



Thesis Title	Capacity of VoIP system over Grid-typed Wireless Mesh Networks
Author	Saraj Yingsakmongkhon
Thesis Advisor	Chiyaporn Khemapatapan, Ph.D
Co-Thesis Advisor	Tanun Jaruvitayakovit, Ph.D
Department	Computer and Telecommunication Engineering
Academic Year	2011

### ABSTRACT

This thesis studied the factors that effect to Quality of Service (QoS) of VoIP service. This research also summarizes the maximum number of VoIP calls with acceptable QoS (MOS is greater than 3.50) under rural, sub-urban and urban environment. This research simulates pure VoIP and VoIP with background data traffic (FTP type) 20 and 40 percents of channel capacity 11 Mbps, distance between APs are 100 and 200 meters, G.729 voice CODEC, power transmission is 100 mW and using Nakagami model in the computer model of capacity of VoIP system over grid-typed wireless mesh networks with multi-hop. So, a service provider can evaluate the cost-effectiveness of this wireless mesh network before the practical installation.

The results show that the effective distance between APs for deploying VoIP in wireless mesh networks is about 100 meters. The main factors that affect to QoS could be summarized into two cases. Firstly, in the case of 1 and 2 hops, the main factor is the packet loss. Secondly, in the case of 3, 4 and 5 hops, the main factor is end to end delay. Moreover, serving VoIP over the network in rural area without background data traffic and with 20% of FTP-typed background traffic can support up to 5 hops. However, it will be dropped to be 4 hops when FTP-typed background is about 40%. Serving VoIP over the network in sub-urban area without background data traffic and with 20% of background traffic can support up to 2 hops. However, it will be dropped to be 1 hop when FTP-typed background is about 40%. Finally the system cannot be used for serving VoIP traffic over the network in an urban environment area.

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

โครงข่ายไร้สายแบบเมชหรือ Wireless Mesh Networks (WMNs) เป็นเทคโนโลยีในโครงข่ายไร้สายสมัยใหม่ มีความได้เปรียบมากกว่าโครงข่ายไร้สายแบบอื่น ๆ ได้แก่ WMNs สามารถปรับตั้งค่าด้วยตัวเองได้ (Self-configuration), ดูแลและตัดสินใจเองได้ (Self-Organizing), แก้ไขหรือรักษาตัวเองได้ (Self-healing), มีความแข็งแรง (robustness) และมีความน่าเชื่อถือ (Reliability) และมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนต่ำ<sup>1,2</sup> โดย WMNs นั้นมีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและเป็นหนึ่งในเทคโนโลยีที่มีหลักประกันมากที่สุดให้กับ Wireless Local Area Networks (WLANs) เพื่อให้สามารถขยายการครอบคลุมการใช้งาน wireless ในที่สาธารณะ WMNs ยังคงเป็นหัวข้อที่มีการให้ความสนใจมากในปัจจุบันนี้

ในปัจจุบันบริการโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ต (VoIP) มีปริมาณการใช้งานมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้กราฟฟิคในโครงข่ายเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย และการให้บริการทางด้านโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตเป็นงานที่มีความท้าทายที่จะนำไปปรับใช้ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชเนื่องจากโครงข่ายไร้สายแบบปกติเมื่อจำนวนโหนด (เครื่องลูกข่าย VoIP) ในโครงข่ายเพิ่มมากขึ้นจะมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายลดลงได้<sup>3</sup> เมื่อมีการส่งแพ็กเก็ตก็จะอาจทำให้คุณภาพของการให้บริการหรือ Quality of Service (QoS) ลดลง งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทำงานในสภาพแวดล้อมจริง เช่น ใช้กำลังส่งที่เป็นค่าเริ่มต้นในตัวโปรแกรมจำลองระบบไม่ตรงกับค่าความเป็นจริง<sup>3,4</sup> เช่น 30 mW. หรือ 50 mW. หรือทำการจำลอง

---

<sup>1</sup> I.F. Akyildiz and X. Wang. (2005, September). "A Survey on Wireless Mesh Networks". **IEEE Communications Magazine**. Volume 43, Number 9. pp S23 – S30.

<sup>2</sup> E. Hossain and K.K. Leung. (2008). **Wireless Mesh Networks: Architectures and Protocols**, Spring Street. New York; USA.

<sup>3</sup> P. Dely. (2007, June). **Adaptive Aggregation of Voice over IP in Wireless Mesh Networks**. Computer Science. Sweden: University of Karlstad.

<sup>4</sup> R. Gantenbein (2010, June). **VIRTUALMESH: AN EMULATION FRAMEWORK FOR WIRELESS MESH NETWORKS IN OMNET++**. Computer Science. Switzerland: University of Bern.

ระบบที่เป็น VoIP โดยไม่มีข้อมูลชนิดอื่นด้วยซึ่งไม่สอดคล้องกับความเป็นจริงในปัจจุบัน<sup>1, 2</sup> และขนาดของบัพเฟอร์ที่เป็นค่าเริ่มต้นในตัวโปรแกรมจำลองระบบคือ 14 หรือ 100 แพ็คเก็ต<sup>1, 2, 3, 4</sup> ซึ่งไม่สอดคล้องกับขนาดของบัพเฟอร์ในตัว Access Point ที่ใช้ในปัจจุบันและในทางปฏิบัติทำให้ผู้ใช้บริการโครงข่ายไร้สายไม่สามารถทำนายถึงประสิทธิภาพการใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตกับโครงข่ายไร้สายแบบเมชจึงอาจจะเป็นเหตุผลหลักที่ทำให้ยังมีการชะลอการลงทุนโครงข่ายไร้สายแบบเมช

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดในงานวิจัยนี้เพื่อเสนอการจำลองและวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการใช้งาน VoIP ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภท Grid metric โดยใช้ตัวแปรต่าง ๆ ที่สอดคล้องกับการใช้งานจริงในประเทศไทยเพื่อศึกษาผลของ multi-hop ที่มีต่อประสิทธิภาพการใช้งาน และมีการจำลอง background data traffic โดยใช้โปรแกรม OMNET++ จำลองการทำงานเพื่อหาปริมาณการใช้งาน VoIP ที่มากที่สุดที่สามารถเข้ามาใช้บริการโดยมี QoS อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ทำให้ผู้ใช้บริการโครงข่ายไร้สายสามารถประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนของการใช้งาน VoIP ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภท Grid metric แบบ multi-hop โดยมีการจัดการวางระยะห่างของตัว AP ที่เหมาะสมในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อจำลองสถานการณ์การหาเส้นทางในโครงข่ายไร้สายแบบเมชด้วยโพรโทคอลการหาเส้นทางแบบ Adhoc On-demand Distance Vector Routing (AODV)
2. เพื่อจำลองการใช้งาน Voice over IP (VoIP) ร่วมกับ background data traffic ผ่านโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภท Grid metric โดยมีการศึกษาผลกระทบของจำนวน Hop ที่มีผลต่อคุณภาพการให้บริการ VoIP
3. เพื่อศึกษาคุณภาพของบริการ VoIP โดยใช้ค่า E-model ในการวัดคุณภาพของ QoS

<sup>1</sup> P. Rabciej, W. Sendor & L. Prytek. (2009, May). **Simulating Wireless Mesh Networks**. Computer Science and Electronics. Poland: University of Science and Technology AGH Distributed Network Environments.

<sup>2</sup> V.Borges, M. Curado, & E. Monteiro. (2010, September). "A Cross-layer Routing Scheme for Scalable Triple Play Service in Wireless Mesh Networks". **ICCCN 2010**. p.1-6.

<sup>3</sup> P. Dely. (2007, June). **Adaptive Aggregation of Voice over IP in Wireless Mesh Networks**. Computer Science. Sweden: University of Karlstad.

<sup>4</sup> R. Gantenbein (2010, June). **VIRTUALMESH: AN EMULATION FRAMEWORK FOR WIRELESS MESH NETWORKS IN OMNET++**. Computer Science. Switzerland: University of Bern.

### 1.3 สมมติฐานของการวิจัย

1. ทำการจำลองระบบ ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภท Grid metric
2. ใช้ทราฟฟิกที่เป็น VoIP ประเภทเดียวและทราฟฟิก VoIP ร่วมกับ background data traffic

### 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการจำลองสถานการณ์และวิเคราะห์ประสิทธิภาพการใช้งาน VoIP ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภท Grid metric โดยใช้โปรแกรม OMNET++ เวอร์ชัน 4.1 โดยมีสถานะแวดล้อมจำลองที่กำหนดไว้ในสมมติฐานการวิจัย

1. ระบบที่ศึกษาใช้วิธีการค้นหาเส้นทางแบบ AODV ภายในโครงข่ายไร้สายแบบเมช
2. ทราฟฟิกที่จำลองในโครงข่ายที่จะศึกษา จะมีทั้งกรณีที่เป็น VoIP ประเภทเดียว และกรณีที่มีทั้ง VoIP ร่วมกับ background data traffic ซึ่งมีการใช้งานภายในโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภท Grid metric

3. งานวิจัยนี้จะศึกษาถึงการวัดค่าคุณภาพการให้บริการของ VoIP ที่ใช้คือ MOS (Mean Opinion Score) ตามมาตรฐาน E-model ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อคุณภาพการให้บริการของ VoIP ในโครงข่ายไร้สายเมชประเภท Grid metric

4. ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่จำเป็นของระบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ค่าที่เป็นค่ามาตรฐานที่ถูกกำหนดให้ใช้งานตามข้อบังคับของประเทศไทย

5. วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะหาจำนวนการใช้งาน VoIP พร้อม ๆ กันที่มากที่สุด ในขณะที่คุณภาพการให้บริการยังอยู่ในระดับดี เพื่อเป็นข้อมูลในการวางแผนเพื่อใช้งานโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภทกริดในประเทศไทย

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ผลจำลองการใช้งาน VoIP ประเภทเดียว และการใช้งาน VoIP ร่วมกับ background data traffic ผ่านโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภท Grid metric
2. ได้ทราบถึงคุณภาพของบริการ VoIP โดยใช้ค่า E-model ในการวัดคุณภาพของ QoS
3. ทราบข้อจำกัดต่าง ๆ ของการใช้งาน VoIP ผ่านโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภทกริด ในสภาพแวดล้อมและตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้งานในประเทศไทย ทำให้ผู้ให้บริการสามารถวางแผนเพื่อให้บริการจริงได้ในอนาคต

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่นำมาใช้ในงานวิจัยซึ่งประกอบด้วย ทฤษฎีสถาปัตยกรรมของโครงข่ายไร้สายแบบเมช, โพรโตคอลการหาเส้นทางในโครงข่ายไร้สายแบบเมช, Voice over IP (VoIP), E-Model, แบบจำลองนาคากามิ, โปรแกรม OMNET++ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 สถาปัตยกรรมโครงข่ายไร้สายแบบเมช

WMNs จะประกอบด้วยสองประเภทตามโหนดคือ Mesh routers และ Mesh clients<sup>1,2</sup> ประเภทที่หนึ่งคือ Mesh routers หรือเรียกว่า Gateway เป็น Mesh router ที่มี Bandwidth สูงและต่อกันสายแลนเพื่อเชื่อมต่ออินเทอร์เน็ตและมีความสามารถในการค้นหาเส้นทางใน gateway/bridge function ซึ่งมีอยู่ใน wireless router ปกติทั่วไปแต่ Mesh routers จะเพิ่มเติมในส่วนของ advanced routing function เพื่อสนับสนุนโครงข่ายแบบเมชผ่านการติดต่อสื่อสารหลายโหนดที่เชื่อมต่อครอบคลุมถึงกันให้สามารถติดต่อสื่อสารกันได้โดยกำลังการรับส่งข้อมูลต่ำกว่ามาก wireless router แบบปกติ เพื่อเพิ่มเติมเพิ่มความยืดหยุ่นของโครงข่ายแบบเมช Mesh routers เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ได้กับการ์ดเชื่อมต่อแบบ ไร้สายหลายชนิดบนพื้นฐานที่เหมือนกันหรือเทคโนโลยีไร้สายที่ต่างกัน ประเภทที่สองคือ Mesh clients โหนดลูกข่ายของ Mesh routers ซึ่งมีความสามารถของ Mobile node ทำให้มีการสัญจรได้ดี มีข้อจำกัดคือต้องใช้แบตเตอรี่ซึ่งทำให้มีพลังงานให้ใช้งานอย่างจำกัด แต่ก็สามารถลดจำนวนฟังก์ชันการทำงานของสัญญาณวิทยุได้เช่น ใช้การ์ด ไร้สายเพียงการ์ดเดียว ลดอัตราขยายของสายอากาศและลดการคำนวณที่ซับซ้อน

ในส่วนที่เพิ่มขึ้นมาในโครงข่ายแบบเมชระหว่าง Mesh routers และ Mesh clients คือ gateway/bridge functionalities ใน Mesh routers สามารถรวมให้ WMNs ใช้งานได้กับโครงข่ายที่แตกต่างกันออกไปได้ ตามปกติอุปกรณ์ของโหนดในโครงข่ายไร้สายจะมีการ์ดอินเตอร์เฟสที่สามารถเชื่อมต่อได้โดยตรงกับ WMNs โดยผ่าน Mesh routers ผู้ใช้งานที่ไม่มี NICs สามารถเข้า

<sup>1</sup> I.F. Akyildiz and X. Wang. (2005, September). "A Survey on Wireless Mesh Networks". *IEEE Communications Magazine*. Volume 43, Number 9. pp S23 – S30.

<sup>2</sup> Hossain and K.K. Leung. (2008). *Wireless Mesh Networks: Architectures and Protocols*, Spring Street. New York; USA.

มายัง WMNs โดยการเชื่อมต่อผ่านทาง Mesh routers เช่น Ethernet ดังนั้น WMNs จะช่วยให้ผู้ใช้สามารถเข้าใช้งานได้ทุกที่ ทุกเวลา

WMNs ได้นำความสามารถและข้อดีของโครงข่าย ad-hoc มาปรับใช้คือประหยัดด้านการลงทุน ง่ายต่อการบำรุงรักษา, มีความแข็งแรง, มีความน่าเชื่อถือ, การให้บริการที่ครอบคลุม เป็นต้น มีแนวคิดว่าจะนำ WMNs มาปรับใช้กับแอปพลิเคชันในปัจจุบันซึ่งการตลาดทางด้านโครงข่ายบรอดแบนด์ โคลเซิลเน็ตเวิร์ค และโครงข่ายระดับเอนเตอร์ไพร์ดกำลังเติบโตอย่างรวดเร็ว ในปัจจุบันมีหลายบริษัทเตรียมความพร้อมและศักยภาพของเทคโนโลยีนี้และเตรียมเสนอผลิตภัณฑ์ทางด้านโครงข่ายไร้สายแบบเมฆออกมาขายทางการตลาด

### 2.1.1 สถาปัตยกรรมด้านโครงข่าย

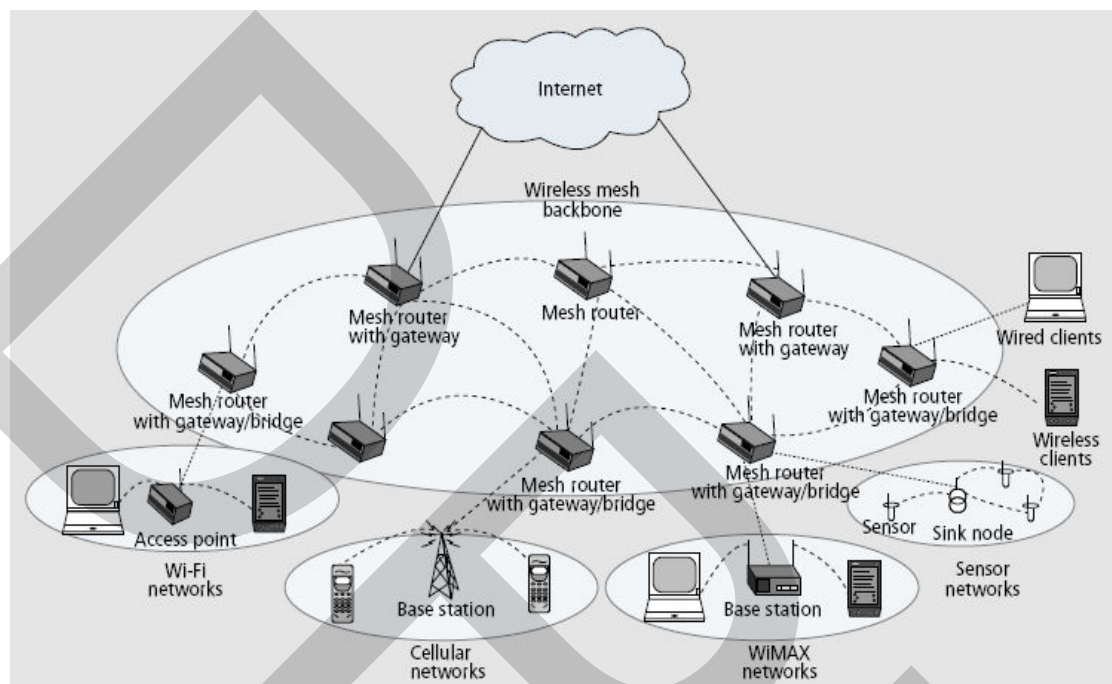
สถาปัตยกรรมของโครงข่ายไร้สายแบบเมฆ สามารถแบ่งได้ 3 ประเภทคือ

#### 1) โครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายไร้สายแบบเมฆ

ในสถาปัตยกรรมของโครงข่ายไร้สายแบบเมฆประเภท Infrastructure/Backbone นี้ Mesh routers จะมีรูปแบบโครงสร้างพื้นฐานสำหรับผู้ใช้งาน ที่ซึ่งเส้นปะและเส้นทึบแสดงการเชื่อมต่อแบบไร้สายและการเชื่อมต่อแบบมีสายตามลำดับ WMN infrastructure/backbone สามารถสร้างแบบการใช้งานที่หลากหลายในเทคโนโลยีสัญญาณวิทยุถูกเพิ่มเข้าไปใช้ในมาตรฐานเทคโนโลยี IEEE 802.11

รูปแบบการใช้งานใน mesh router คือ สามารถปรับตั้งค่าด้วยตัวเองได้ (Self-configuration), ดูแลและตัดสินใจเองได้ (Self-Organizing), แก้ไขหรือรักษาตัวเองได้ (Self-healing) และ Mesh routers มีรูปแบบฟังก์ชันการใช้งาน Gateway คือ mesh routers สามารถเชื่อมต่อไปยังอินเทอร์เน็ตได้ วิธีการนี้ยังเรียกว่า infrastructure meshing ทำหน้าที่จัดเตรียม Backbone หรือแกนของการส่งข้อมูลโดยเป็นจุดร่วมในการส่งข้อมูลสำหรับไคลเอนต์และสามารถรวมให้ WMNs ใช้งานได้กับโครงข่ายที่แตกต่างกันออกไปได้โดยผ่านทาง gateway/bridge functionalities ใน Mesh routers ตามเครื่องลูกข่าย (client) ปกติทั่วไป การเชื่อมต่อกันแบบ Ethernet สามารถติดต่อไปยัง Mesh routers ทาง การเชื่อมต่อกันแบบ Ethernet สำหรับเครื่องลูกข่ายปกติทั่วไปที่ใช้เทคโนโลยีสัญญาณวิทยุเหมือนกันกับ Mesh routers ไคลเอนต์จะสามารถเชื่อมต่อและติดต่อสื่อสารกันโดยตรงกับ Mesh routers ได้ ถ้าไคลเอนต์มีการใช้เทคโนโลยีสัญญาณวิทยุที่แตกต่างกันกับ Mesh routers เครื่องลูกข่ายจะต้องเชื่อมต่อและติดต่อสื่อสารกันผ่านทางเสากระจาย

สัญญาณหรือ Base station และเชื่อมการติดต่อจาก Ethernet ไปยัง Mesh routers ดังแสดงในรูปที่ 2.1<sup>1</sup>



รูปที่ 2.1 แสดง Infrastructure/Backbone WMNs

## 2) เครื่องลูกข่ายในโครงข่ายไร้สายแบบเมช

ในสถาปัตยกรรมของโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภทเครื่องลูกข่ายนี้ Client-meshing จะทำหน้าที่จัดเตรียมโครงข่ายแบบโหนดต่อโหนดหรือ peer-to-peer ระหว่างอุปกรณ์ของไคลเอนต์ในสถาปัตยกรรมของโครงข่ายไร้สายแบบเมชแบบนี้ โหนดของเครื่องลูกข่ายจะประกอบด้วยโครงข่ายปัจจุบันที่ประกอบด้วยโพรโทคอลการค้นหาเส้นทางและฟังก์ชันการตั้งค่า ตลอดจนทำหน้าที่จัดเตรียมแอปพลิเคชันของผู้ใช้งาน ไปยังผู้ใช้งานทั่วไป ด้วยเหตุนี้ Mesh routers จึงไม่มีความจำเป็นหรือความต้องการตามรูปแบบของโครงข่าย

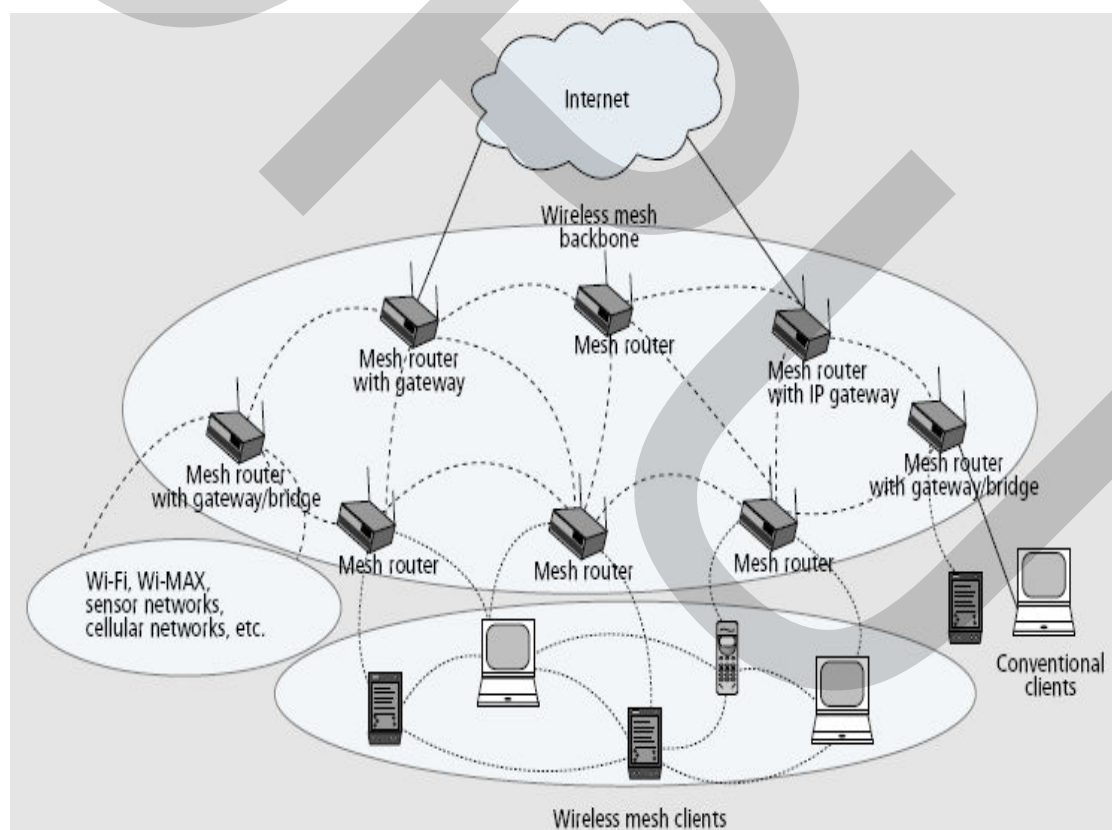
เครื่องลูกข่ายในโครงข่ายไร้สายแบบเมชเป็นรูปแบบหนึ่งที่ใช้อุปกรณ์ที่มีสัญญาณวิทยุ ดังนั้น เครื่องลูกข่ายในโครงข่ายไร้สายแบบเมชจึงใช้รูปแบบการเชื่อมต่อแบบโครงข่าย ad hoc ใดๆก็ตามตามความต้องการของอุปกรณ์ของผู้ใช้งานมีการเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้าง

<sup>1</sup> I.F. Akyildiz and X. Wang. (2005, September). "A Survey on Wireless Mesh Networks". **IEEE Communications Magazine**, Volume 43, Number 9. pp S23 – S30.

พื้นฐานแบบ Infrastructure meshing ตั้งแต่เครื่องลูกข่ายในโครงข่ายไร้สายแบบเมชโดยผู้ใช้งาน จะต้องสามารถทำงานได้ตามรูปแบบฟังก์ชันการใช้งานคือมีโพรโทคอลการค้นหาข้อมูลที่ดีและ เครื่องลูกข่ายในโครงข่ายไร้สายแบบเมช

### 3) โครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภทผสม

สถาปัตยกรรมของโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภทผสมคือการรวมกันของประเภท Infrastructure และ client meshing ดังแสดงในรูปที่ 2.2<sup>1</sup> โดยโคลเอนต์ในโครงข่ายไร้สายแบบ เมชสามารถเข้ามาใช้งานในโครงข่ายโดยผ่าน Mesh routers ซึ่งดีเท่ากับวิธีการ meshing กัน โดยตรงกับโคลเอนต์ในโครงข่ายไร้สาย ขณะที่ระบบโครงสร้างพื้นฐานทำหน้าที่จัดเตรียมการเชื่อมต่อไปยังโครงข่ายอื่น ๆ โดยทางอินเทอร์เน็ต ไวไฟ ไวแมกซ์ ระบบโครงข่ายมือถือและโครงข่ายเซ็นเซอร์ โดยใช้ความสามารถในการค้นหาเส้นทางที่ดี รวดเร็วของโคลเอนต์ในการจัดเตรียมการเพิ่ม ความสามารถในการเชื่อมต่อและครอบคลุมด้านในโครงข่ายไร้สายแบบเมช



รูปที่ 2.2 แสดง Hybrid WMNs

<sup>1</sup> I.F. Akyildiz and X. Wang. (2005, September). "A Survey on Wireless Mesh Networks". **IEEE Communications Magazine**. Volume 43, Number 9. pp S23 – S30.



ลักษณะพิเศษของโครงข่ายไร้สายแบบเมช สามารถสรุปได้ดังข้อความด้านล่างที่ซึ่งสถาปัตยกรรมของโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภทผสมถูกพิจารณาเพื่อนำมาใช้กับโครงข่ายไร้สายแบบเมช ซึ่งมีประโยชน์กับโครงข่ายไร้สายแบบเมชคือ

1) โครงข่ายไร้สายแบบเมชสนับสนุนการทำงานในโครงข่าย ad hoc และมีความสามารถคือปรับตั้งค่าด้วยตัวเองได้ คู่มือและตัดสินใจเองได้ แก้ไขหรือรักษาตัวเองได้ มีความแข็งแกร่งและมีความน่าเชื่อถือ

2) โครงข่ายไร้สายแบบเมชเป็นโครงข่ายไร้สายแบบ multi-hop แต่โครงสร้างพื้นฐานหรือ infrastructure หรือ backbone ทางโครงข่ายไร้สายจะถูกจัดเตรียมโดย mesh router

3) Mesh router มีการสัญจรน้อยมากและลดภาระการค้นหาเส้นทางและการตั้งค่าให้น้อยลงได้ ที่ซึ่งลดความสำคัญและภาระของเครื่องลูกข่ายในโครงข่ายไร้สายแบบเมชและโหนดอื่น ๆ

4) การสัญจรของโหนดคือสนับสนุนได้ง่ายผ่านทางโครงสร้างพื้นฐานของโครงข่ายไร้สายแบบเมช

5) Mesh routers สามารถรวมได้กับโครงข่ายที่แตกต่างกันออกไปได้ รวมทั้งการเชื่อมต่อแบบมีสายและการเชื่อมต่อแบบไร้สาย ดังนั้นโครงข่ายหลาย ๆ ประเภทจึงสามารถเข้ามาใช้งานในโครงข่ายไร้สายแบบเมชได้

6) การสูญเสียพลังงานคือจะสูญเสียพลังงานนั้นจะแตกต่างกันใน mesh router และ Mesh clients

7) โครงข่ายไร้สายแบบเมชไม่สามารถทำงานได้ด้วยตัวคนเดียวและต้องมีการเข้ากันได้ของโครงข่ายและต้องมีการเชื่อมต่อระหว่างโครงข่ายไร้สายอื่นๆ

ดังนั้น โครงข่ายไร้สายแบบเมชได้เปลี่ยนความสามารถของโครงข่ายแบบ ad-hoc โดยการแทนที่ด้วยแบบอื่นที่ง่ายของโครงข่ายแบบ ad-hoc โดยการเพิ่มอัลกอริทึมแบบใหม่และออกแบบหลักการที่จะสามารถนำไปใช้งานได้ ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชจริง

### 2.1.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในภาพรวมของระบบ<sup>1</sup>

จุดสำคัญที่มีผลต่อปัจจัยในการออกแบบมีผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายไร้สายแบบเมชสามารถสรุปได้ดังนี้

1) Radio Techniques หรือเทคนิคของการใช้สัญญาณวิทยุโดยมีงานวิจัยได้เสนอให้มีการเพิ่มความจุและให้มีความยืดหยุ่น คล่องตัว ในระบบโครงข่ายไร้สายเมื่อไม่นานมานี้ เช่นตัวอย่าง

<sup>1</sup> I.F. Akyildiz and X. Wang. (2005, September). "A Survey on Wireless Mesh Networks". **IEEE Communications Magazine**, Volume 43, Number 9. pp S23 – S30.

คือการรวม directional, ระบบสายอากาศฉลาด (smart antennas), Multiple Input Multiple Output (MIMO) และ multi-radio/multi-channel systems เข้าด้วยกัน

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของสัญญาณวิทยุในโครงข่ายไร้สายและความคุ้มค่า โดยโปรโตคอลชั้นที่สูงกว่าได้ มากกว่าเทคโนโลยีสัญญาณวิทยุขั้นสูง เช่นการแก้ไขค่าที่ปรับตั้งค่าไปแล้วได้ พวก ความถี่ที่เร็ว Cognitive radio และ software radios ที่ถูกใช้ในการติดต่อสื่อสารในโครงข่ายไร้สาย ถึงแม้เทคโนโลยีของสัญญาณวิทยุ ยังคงอยู่ในช่วงเริ่มต้นแต่ก็ได้หวังว่าในอนาคตนั้นจะมีรูปแบบพื้นฐานสำหรับโครงข่ายไร้สายเนื่องจากความสามารถควบคุมแบบพลวัต สิ่งนี้คือเทคโนโลยีสัญญาณวิทยุที่ต้องการให้เกิดการออกแบบโปรโตคอลชั้นที่สูงกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นโปรโตคอลการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางหรือ MAC และโปรโตคอลการค้นหาเส้นทางหรือ routing

2) ความสามารถในการขยายระบบ (Scalability) คือ จุดสำคัญของความต้องการในระบบโครงข่ายไร้สายแบบเมช ปรมาจากการสนับสนุนวิธีการ ซึ่งประสิทธิภาพของโครงข่ายลดลงมาจากการเพิ่มขึ้นของขนาดของโครงข่าย ตัวอย่างเช่น routing protocol โปรโตคอลการหาเส้นทางจะไม่สามารถหาความน่าเชื่อถือของเส้นทางการค้นหาได้ โปรโตคอลการส่งข้อมูล (transport protocol) จะมีการหลุดของการเชื่อมต่อได้ โปรโตคอลการควบคุมการเข้าถึงข้อมูล และ (MAC protocol) ความสามารถของ throughput จะลดลง โดยต้องแน่ใจว่าความสามารถในการขยายระบบในโครงข่ายไร้สายแบบเมช ทุกโปรโตคอลตั้งแต่ MAC layer ชั้นการควบคุมการเข้าถึงตัวกลางจนถึงชั้นแอปพลิเคชันประยุกต์ (application layer) จำเป็นต่อการขยายระบบ

3) การเชื่อมต่อแบบเมช (Mesh Connectivity) คือ มีความได้เปรียบและข้อดีมากกว่าในโครงข่ายไร้สายแบบเมชแบบเดิม ทำให้มีความน่าเชื่อถือในการเชื่อมต่อแบบเมชโดยโครงข่ายสามารถ ปรับตั้งค่าด้วยตัวเองได้ ดูแลและตัดสินใจเองได้ แก้ไขหรือรักษาตัวเองได้ และ การควบคุมอัลกอริทึมรูปแบบการเชื่อมต่อของโครงข่ายที่จำเป็น ในรูปแบบการเชื่อมต่อของโครงข่าย จะทราบถึง MAC และ routing protocol โดยสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของโครงข่ายไร้สายแบบเมชได้

4) ความปลอดภัยในโครงข่าย (Security) รูปแบบความปลอดภัยในงานวิจัยที่เสนอมจะมีจำนวนมากสำหรับโครงข่ายไร้สาย แต่ยังไม่สามารถนำมาปรับใช้ได้กับโครงข่ายไร้สายแบบเมช ตัวอย่างเช่น ไม่มีศูนย์กลางในการให้ความน่าเชื่อถือในการให้สิทธิ์ในการกระจาย กุญแจสาธารณะในโครงข่ายไร้สายแบบเมชได้เนื่องจากระบบโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมในการกระจายข้อมูล แต่รูปแบบความปลอดภัยยังคงมีอยู่ในโครงข่ายแบบ ad hoc สามารถนำมาใช้ในโครงข่ายไร้สายแบบเมช อย่างไรก็ตามนั้นรูปแบบความปลอดภัยสำหรับโครงข่ายแบบ ad hoc ยังไม่เพียงพอต่อการ

นำไปใช้จริง นอกจากนั้นความแตกต่างทางโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมในโครงข่ายระหว่างโครงข่ายไร้สายแบบเมชและโครงข่ายแบบ ad hoc ยังคงมีอยู่ทำให้รูปแบบสำหรับโครงข่ายแบบ ad hoc ไม่มีประสิทธิภาพในโครงข่ายไร้สายแบบเมช

5) ความสะดวกในการใช้งาน โดยที่โพรโทคอลต้องถูกออกแบบให้สามารถเข้าใช้งานโครงข่ายได้อัตโนมัติด้วยความสะดวกเท่าที่จะเป็นไปได้ ในส่วนที่เพิ่มขึ้นมาคือเครื่องมือในการจัดการโครงข่ายต้องถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการบำรุงรักษาเมื่อมีการเปิดใช้งานโครงข่ายต้องมีระบบมอนิเตอร์ที่มีประสิทธิภาพและการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชในส่วนของเครื่องมือต้องใช้งานได้อย่างอัตโนมัติในโพรโทคอลโครงข่าย สามารถทำงานใช้งานได้อย่างรวดเร็วโครงข่ายไร้สายแบบเมช

6) ความเข้ากันได้และการเชื่อมโยงระหว่างโครงข่าย ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชความต้องการขั้นพื้นฐานของการสนับสนุนการเข้าใช้งานโครงข่ายทั้งสามแบบคือ Infrastructure, Client และ Hybrid WMNs โครงข่ายไร้สายแบบเมชจำเป็นต้องลดความเข้ากันได้ของโหนดโคลเอนต์ในโครงข่าย โดยที่ mesh router ต้องปรับใช้ร่วมกับโครงข่ายไร้สายอื่น ๆ ได้

### 2.1.3 มาตรฐานการทำงานของระบบโครงข่าย

มาตรฐานการทำงานของระบบโครงข่ายไร้สายแบบเมชซึ่งก็คือมาตรฐาน IEEE 802.11s ซึ่งคือมาตรฐานที่แยกย่อยมาจาก IEEE 802.11 ซึ่งเป็นมาตรฐานของโครงข่ายไร้สาย มาตรฐาน IEEE 802.11 ถูกกำหนดให้ใช้ในการทำงานชั้น physical, MAC และ Logical link เลขอร์สำหรับโครงข่ายไร้สาย โดยมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ภายในเครือข่ายโครงข่ายไร้สายไว้ 2 แบบคือ แบบที่ 1 คือ แบบโครงสร้างพื้นฐาน โดยทั่วไปแล้วอุปกรณ์ในเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN จะเชื่อมต่อกันในแบบโครงสร้างพื้นฐานซึ่งเป็นแบบที่อนุญาตให้อุปกรณ์ภายในโครงข่ายไร้สายสามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายอื่นได้ ในแบบโครงสร้างพื้นฐานนี้จะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ 2 ประเภทได้แก่ Client Station สถานีลูกข่าย ซึ่งก็คืออุปกรณ์คอมพิวเตอร์หรือโทรศัพท์มือถือและ Access Point สถานีแม่ข่าย ซึ่งทำหน้าที่ต่อเชื่อมสถานีลูกข่ายเข้ากับโครงข่ายอื่น หรือสถานีลูกข่ายจะสามารถรับส่งข้อมูลโดยตรงกับสถานีแม่ข่ายที่ให้บริการกับสถานีลูกข่ายนั้นอยู่เท่านั้น ส่วนสถานีแม่ข่ายจะทำหน้าที่ส่งต่อข้อมูลที่ได้รับจากสถานีลูกข่ายไปยังจุดหมายปลายทางหรือส่งต่อข้อมูลที่ได้รับจากโครงข่ายอื่นมายังสถานีผู้ใช้ ในสถานีแม่ข่ายนั้นจะมีโหมดการใช้งานแบบ Basic Service Set (BSS Mode) หมายถึงบริเวณของเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN ที่มีสถานีแม่ข่าย 1 สถานี ซึ่งสถานีลูกข่ายภายในขอบเขตของ BSS นี้ทุกสถานีจะต้องสื่อสารข้อมูลผ่านสถานีแม่ข่ายดังกล่าวเท่านั้น แบบที่ 2 คือแบบโหนดต่อโหนด เป็นโครงข่ายที่ไม่มีสถานีแม่ข่ายและไม่มีการเชื่อมต่อกับโครงข่ายอื่น ๆ โดยที่วิธีการเชื่อมต่อแบบ

โหนดต่อโหนด จะเรียกว่า Independent Basic Service Set (IBSS) mode ซึ่งสถานีลูกข่ายที่หนึ่งสามารถติดต่อสื่อสารข้อมูลกับสถานีลูกข่ายอื่น ๆ ในเขต IBSS เดียวกันได้โดยตรงโดยไม่ต้องผ่านสถานีแม่ข่าย แต่สถานีลูกข่ายจะไม่สามารถรับส่งข้อมูลกับโครงข่ายอื่น ๆ ได้

ที่ชั้น MAC เลขอร์นั้น IEEE 802.11 คือการจัดสรรการเข้าใช้ช่องสัญญาณซึ่งแต่ละสถานีใน BSS หรือ IBSS จะต้องแบ่งกันใช้ช่องสัญญาณที่ถูกกำหนดมาสำหรับใช้งานร่วมกันอย่างเป็นธรรมชาติ โดยใช้งานทั้งแบบ carrier sensing และ virtual carrier sensing และ random backoff หรือเรียกว่า CSMA (Carrier Sense Multiple Access)

มาตรฐาน IEEE 802.11 คือแบบ CSMA/CA with Acknowledgement (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance with Acknowledgement) เมื่อสถานีลูกข่ายหนึ่งต้องการเข้าใช้ช่องสัญญาณ สถานีลูกข่ายจะต้องตรวจสอบช่องสัญญาณก่อนว่ามีสถานีลูกข่ายอื่นทำการรับส่งสัญญาณ ข้อมูลอยู่หรือไม่และรอจนกว่าช่องสัญญาณจะว่าง และการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการชนกันของสัญญาณและทำการตรวจสอบว่าเกิดการชนของสัญญาณหรือไม่ โดยสถานีลูกข่ายผู้ส่งสัญญาณข้อมูลจะต้องรอรับ Acknowledgement จากสถานีที่ส่งข้อมูลไปให้ หากไม่ได้รับ Acknowledgement กลับมาภายในเวลาที่กำหนดจะถือว่าเกิดการชนของสัญญาณขึ้นและต้องทำการส่งข้อมูลเดิมซ้ำอีก สำหรับการหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดการชนกันของสัญญาณนั้นมาตรฐาน IEEE 802.11 ได้ใช้วิธีที่เรียกว่า Virtual Carrier Sense เพื่อแก้ไขปัญหาที่แต่ละสถานีใน BSS หรือ IBSS อาจไม่ได้ยินสัญญาณจากสถานีอื่น มีการทำงานดังนี้ เมื่อสถานีลูกข่ายที่ต้องการจะส่งแพ็กเก็ตเกิดข้อมูลได้รับสิทธิในการเข้าใช้ช่องสัญญาณแล้วจะทำการส่งแพ็กเก็ตขึ้นๆ ที่เรียกว่า Request To Send (RTS) เพื่อเป็นการจองช่องสัญญาณ ก่อนที่จะส่งแพ็กเก็ตข้อมูลจริง ซึ่งแพ็กเก็ต RTS ประกอบไปด้วย Duration ID ระยะเวลาที่คาดว่าใช้ช่องสัญญาณจนแล้วเสร็จ รวมถึง Address ของสถานีผู้ส่งและผู้รับ เมื่อสถานีผู้รับได้ยินสัญญาณ RTS ก็จะตอบรับกลับมาด้วยการส่งสัญญาณ Clear To Send (CTS) ซึ่งจะบอกข้อมูลระยะเวลาที่คาดว่าสถานีที่กำลังจะทำการส่งข้อมูลนั้นจะใช้ช่องสัญญาณจนเสร็จ หลักการก็คือทุก ๆ สถานีใน BSS หรือ IBSS ควรจะได้ยินสัญญาณ RTS หรือไม่ก็ CTS อย่างใดอย่างหนึ่งหรือทั้งสองอย่าง เมื่อได้รับ RTS หรือ CTS ทุกๆสถานีจะทราบถึงว่าช่วงเวลาที่จะระบุไว้ใน Duration ID ซึ่งช่องสัญญาณจะถูกใช้และทุกสถานีที่ยังไม่ได้รับสิทธิในการเข้าใช้ช่องสัญญาณจะตั้งค่า Network Allocation Vector (NAV) ให้เท่ากับ Duration ID ซึ่งแสดงถึงช่วงเวลาที่ยังไม่สามารถเข้าใช้ช่องสัญญาณได้ ทุก ๆ สถานีจะใช้วิธี Virtual Carrier Sense ดังกล่าวกับการฟังสัญญาณในช่องสัญญาณในการตรวจสอบว่าช่องสัญญาณว่างอยู่หรือไม่

มาตรฐาน IEEE 802.11s<sup>1</sup> เป็นมาตรฐานการทำงานของระบบโครงข่ายไร้สายแบบเมช นั้นยังเป็นมาตรฐานที่เป็นโครงร่างอยู่ซึ่งนั้นเป็นส่วนที่ขยายออกมาจาก IEEE 802.11 โดยเพิ่มความสามารถ frame forwarding การส่งต่อเฟรมในรูปแบบการเชื่อมต่อแบบ multi-hop การส่งต่อข้อมูลใน multi-hop ต้องการรูปแบบของแอดเดรสที่ตรงกัน การตรวจจับการซ้ำซ้อนกัน เป็นต้น

Addressing และ forwarding ตามลำดับในมาตรฐาน IEEE 802.11s นั้น mesh stations สถานีแบบเมชเป็นแอดเดรสที่ถูกใช้แบบไม่ซ้ำกัน 48 บิต ของ MAC address ถ้าสถานีแบบเมชมีการเชื่อมต่อทางกายภาพหลาย ๆ การเชื่อมต่อ เมื่อทั้งสถานีและทุก ๆ การเชื่อมต่อคือแอดเดรส สมมติว่าสถานีคือแอดเดรสของการเชื่อมต่อครั้งแรก ข้อมูลข่าวสารขั้นต่ำที่จำเป็นต้องส่งสำเร็จในเฟรมของ multi-hop รวม 4 แอดเดรส โดยสองเฟรมแรกคือต้นทางและปลายทางต้นฉบับและสองเฟรมต่อมาคือผู้ส่งและผู้รับปัจจุบัน สิ่งนี้เรียกว่ารูปแบบหมายเลข 4 address ไปยังองค์ประกอบการส่งต่อข้อมูล, จุดเริ่มต้นและสิ้นสุดที่จุดด้านนอกของโครงข่ายแบบเมช, หนึ่งหรือสองที่เพิ่มขึ้นมาของแอดเดรสที่ต้องการสิ่งนี้เรียกว่ารูปแบบหมายเลข 6 address และการเปรียบเทียบกับมาตรฐาน 802.11 ในส่วนของหัวของเฟรม แอดเดรสจะถูกแทนที่เฉพาะ 6 ถึง 24 octets ของ Mesh Control header การควบคุมแบบเมชที่ส่วนของหัวของเฟรมที่ซึ่งถูกเพิ่มเข้าไปยังทุก ๆ เฟรมทางขวาของ multi-hop ก่อน 802.11 header

นอกเหนือจากที่ขยายในส่วนของควบคุมแบบเมชที่ส่วนของหัวของเฟรมประกอบไปด้วย Flag 8 บิต, Time To Live (TTL) 8 บิต ไปจำกัดผลกระทบของ path loops และอีก 4 octet คือ Mesh sequence numbers จำนวนลำดับของเมชเพื่อแก้ความซ้ำซ้อนที่เกิดขึ้นในโครงข่ายโดยที่จำนวนลำดับของเมชใช้ในการบอรรถเวลาเฟรมเพียงอย่างเดียวเท่านั้น และต้องไม่ซ้ำกันในแอดเดรสผู้ส่งแรก ในทุก ๆ สถานีแบบเมชมีการจำค่าได้สูงสุดของจำนวนลำดับสำหรับให้ทุก ๆ ผู้ส่งแรก รู้จักและลบทิ้งทุก ๆ เฟรมที่เกี่ยวข้องกับ smaller sequence number จำนวนลำดับที่เล็กกว่าจากผู้ส่งแรกที่ซึ่งมีการซ้ำซ้อนเกิดขึ้น

Peering management ในโพรโทคอลการจัดการการเชื่อมต่อที่ใช้ในการเปิด บำรุงรักษา และปิดการเชื่อมต่อกับสถานีแบบเมชเพื่อนบ้านเพื่อเลือกที่จะเปิดการเชื่อมต่อใหม่และปิดการเชื่อมต่อเมื่อตรวจเจอการเสียของการเชื่อมต่อ โดยสถานีแบบเมชจะไม่อนุญาตให้มีการส่งเฟรมนอกเหนือจากนี้คือใช้การจัดการการเชื่อมต่อไปยังสถานีแบบเมชเพื่อนบ้านจนกระทั่งการเชื่อมต่อไปยังเพื่อนบ้านจะถูกสร้างสำเร็จ

<sup>1</sup> K. Andreev and P. Boyko. (2007, August). IEEE 802.11s Mesh Networking NS-3 Model. Retrieved February 2011, from <http://www.nsnam.org/workshops/wns3-2010/dot11s.pdf>.

ทุก ๆ สถานีแบบเมชจะมีระยะเวลาในการส่งเฟรมที่ใช้ในการจัดการโหนดที่เชื่อมต่ออยู่เรียกว่า beacons frames ถึงแม้ว่า beacons frames จะถูกส่งในระยะเวลาที่ถี่มาก (เพราะต้องการการประหยัดพลังงาน) ถ้าสองเบคอนจากสองสถานีเพื่อนบ้านเกิดการชนกัน โดยสามารถจะชนกันได้เสมอ ดังนั้นจึงมีวิธีที่ใช้ในการหลีกเลี่ยงการชนกันของเบคอน โดยที่ลิงค์ที่ทำการเชื่อมต่อเริ่มเปิดการแฮนด์เช็ก เมื่อสถานีแบบเมชรับเบคอนจากสถานีแบบเมชที่ไม่รู้จักที่อยู่ก่อนหน้าและตัดสินใจในการเปิดการเชื่อมต่อกัน การจัดการเปิดการเชื่อมต่อแบบ one-hop เฟรมจะต้องประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์แบบเมชที่ส่งไปยังสถานีที่เชื่อมต่อด้วยอย่างมีศักยภาพ สถานีแบบเมชจะมีกระบวนการในการรับค่าพารามิเตอร์ ถ้าอีกฝั่งหนึ่งยอมรับค่าพารามิเตอร์และจะส่ง Peering Confirm การตกลงที่จะเชื่อมต่อด้วยเป็นการตอบสนองการเปิดการเชื่อมต่อ การเชื่อมต่อถูกสร้างขึ้นข้างเดียวโดยที่อีกฝั่งหนึ่งต้องทำการตกลงที่จะเชื่อมต่อกับมาด้วยถึงจะสามารถทำการรับส่งเฟรมกันได้ โดยวิธีนี้ต้องการการรันตีการสร้างการเชื่อมต่อทั้งสองฝั่ง เช่นการการเปิดการเชื่อมต่อแบบ open handshake

## 2.2 โพรโทคอลการหาเส้นทางในโครงข่ายไร้สายแบบเมช

โครงข่ายไร้สายแบบ adhoc นั้นมีโพรโทคอลการหาเส้นทางหลายแบบและแบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่ประเภทแรก Proactive เป็นการเก็บข้อมูลเส้นทางการส่งทั้งหมดไว้ในตารางข้อมูล ซึ่งมีการปรับปรุงตารางข้อมูลตามช่วงเวลาที่กำหนด ทำให้สามารถส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางได้ทันทีเมื่อต้องการ โดยพยายามที่จะรักษาและอัปเดตข้อมูลเส้นทางในทุกโหนด มีโพรโทคอลการหาเส้นทางเช่น Optimized Link State Routing (OLSR) และ Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) ประเภทที่สองคือ Reactive เป็นการค้นหาเส้นทางการรับส่งข้อมูลไปยังโหนดปลายทางต่อเมื่อมีความต้องการจะส่งข้อมูล ซึ่งใช้การแลกเปลี่ยนแพ็คเก็ตร้องขอเส้นทางกับแพ็คเก็ตตอบรับเส้นทาง โดยส่งแพ็คเก็ตร้องขอเส้นทางให้กระจายครอบคลุมทั้งโครงข่าย โดยไม่ใช่ตารางเส้นทาง จะสร้างเส้นทางแบบทันทีทันใด เมื่อถูกร้องขอจากต้นทางไปปลายทาง มีโพรโทคอลการหาเส้นทางเช่น AODV และ Dynamic Source Routing (DSR) และได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับในโครงข่ายไร้สายแบบเมช

Adhoc On-demand Distance Vector Routing (AODV)<sup>1</sup> เป็นโพรโทคอลการหาเส้นทางในโครงข่ายไร้สายแบบ hop by hop ถูกพัฒนามาสำหรับ wireless adhoc networks โดย AODV ได้ปรับปรุงมาจาก DSDV เนื่องจากมีหลักการทำงานคล้ายกัน ในมาตรฐาน IEEE 802.11s นั้นแนะนำ

<sup>1</sup> A. Ubaid & A. Ksentini. (2008, June). **Deployment of VoIP in the IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks.** Computer Science. France: University of Rennes.

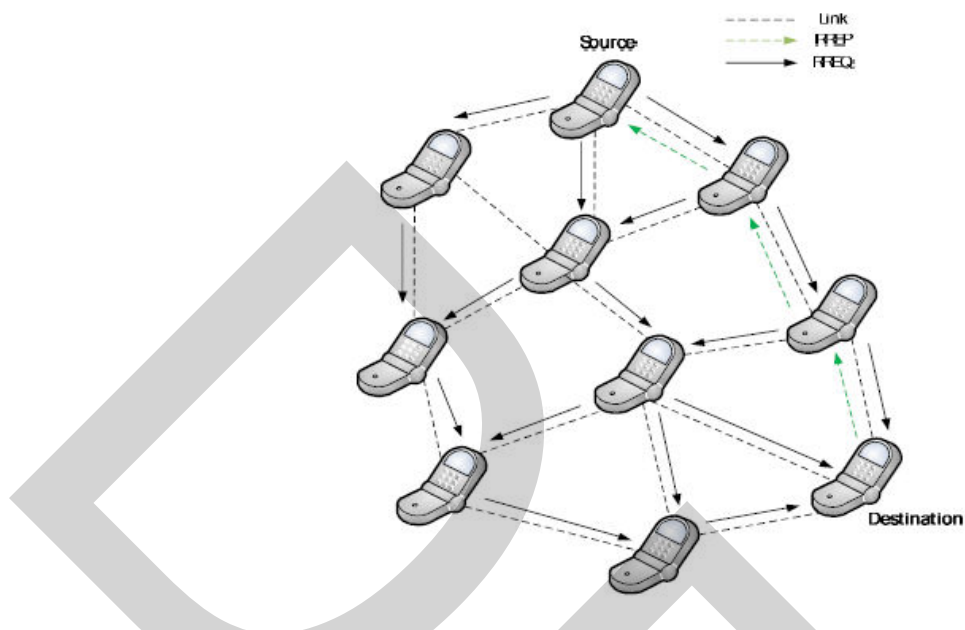
ให้ใช้โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางชนิดนี้โดยที่ AODV จะลดจำนวนครั้งในการที่จะค้นหาเส้นทางลง และ AODV มีการทำงานเป็นแบบรีแอคทีฟคือจะทำการค้นหาเส้นทางเมื่อมีโหนดต้องการที่จะส่งข้อมูลหรือมีการร้องขอใช้เส้นทางนั้นและโหนดต้นทางไม่จำเป็นต้องทำการปรับปรุงข้อมูลเส้นทางไปยังปลายทางที่ยังไม่ใช้งานในขณะนั้นและในขณะการสื่อสารดำเนินอยู่ โดยเส้นทางยังทำงานได้ AODV ก็จะไม่ทำงานใดๆ นัก ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงโครงข่ายบ่อการทำงานของโพรโทคอลเหล่านี้คือมีการส่งข้อความควบคุม (Control Messages) เป็นช่วงๆเพื่อใช้ในการกำหนดเส้นทางหรือปรับปรุงข้อมูลเส้นทางทำให้ไม่เปลือง Bandwidth ในช่องสัญญาณ ปรับเปลี่ยนเส้นทางได้รวดเร็ว และใช้การประมวลผลและหน่วยความจำน้อยหรือต่ำ

AODV เป็นโพรโทคอลที่เป็นต้นแบบของ routing message ระหว่างโหนดที่เคลื่อนที่ได้ในการส่งข้อมูลผ่านไปยังโหนดข้างเคียงเพื่อไปยังปลายทางโดยที่ต้นทางไม่สามารถติดต่อได้โดยตรง ในระหว่างทางที่ message ถูกส่งผ่านไป AODV ก็จะทำการค้นหาเส้นทาง โดยจะจะไม่เกิดการวนลูบและพยายามหาเส้นทางที่สั้นที่สุดที่จะเป็นไปได้ AODV ยังสามารถควบคุมการเปลี่ยนแปลงของเส้นทางและสามารถสร้างเส้นทางใหม่หากเส้นทางปัจจุบันไม่สามารถใช้งานได้

หลักการการทำงานของ AODV คือเมื่อต้นทางหรือ source ต้องการส่งข้อมูลไปยังปลายทางหรือ destination โดยต้นทางค้นหาเส้นทางไปยังปลายทางโดยการ broadcast ด้วย route request (RREQ) message โดยที่ RREQ จะประกอบไปด้วย address ของต้นทางและปลายทาง, หมายเลขลำดับ sequence number, broadcast identifier และ RREQ จะถูกส่งไปยังโหนดข้างเคียง โหนดที่ได้รับก็จะทำการส่งต่อไปยังโหนดที่ใกล้เคียงต่อไปเรื่อยๆ จนถึงโหนดปลายทางและเมื่อปลายทางได้รับ RREQ message แรกที่มาถึงที่ปลายทาง โหนดปลายทางก็จะทำการส่ง route reply (RREP) message กลับไปยังโหนดต้นทางที่ทำการส่ง RREQ มาให้โดยจะส่งกลับไปบนเส้นทางที่ RREQ message แรกมาถึงเพราะถือว่าใช้เวลาที่น้อยที่สุดในการส่ง RREQ มาจากต้นทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.3<sup>1</sup>

โดยที่ AODV มีอีกโพรโทคอลหนึ่งคือ Hello messages ใช้ในการบำรุงรักษาเส้นทางในระบบโครงข่ายไม่ให้ระบบเสียหายเมื่อมีเส้นทางที่ใช้ส่งข้อมูลหลักเสียหายจะส่ง โหนดข้างเคียงจะส่ง route error (RERR) message ไปยังโหนดทุกตัวที่ active อยู่เพื่อสร้างเส้นทางไปยังปลายทางใหม่ และ Hello messages ยังใช้เป็นการค้นหาโหนดต่อไปหรือ next hop อีกด้วย

<sup>1</sup> A. Ubaid & A. Ksentini. (2008, June). **Deployment of VoIP in the IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks.** Computer Science. France: University of Rennes.



รูปที่ 2.3 แสดงการหาเส้นทางในโครงข่ายของ AODV

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้โพรโทคอลการหาเส้นทางแบบ AODV เพราะว่า AODV จะลดจำนวนครั้งในการที่จะค้นหาเส้นทางลงและ AODV มีการทำงานเป็นแบบรีแอกทีฟคือจะทำการค้นหาเส้นทางเมื่อมีโหนดต้องการที่จะส่งข้อมูลหรือมีการร้องขอใช้เส้นทางนั้นและโหนดต้นทางไม่จำเป็นต้องทำการปรับปรุงข้อมูลเส้นทางไปยังปลายทางที่ยังไม่ใช้งานในขณะนั้นและในขณะการสื่อสารดำเนินอยู่ทำให้ไม่เปลือง Bandwidth ในช่องสัญญาณ ปรับเปลี่ยนเส้นทางได้รวดเร็วและใช้การประมวลผลและหน่วยความจำน้อยหรือต่ำ และ AODV นั้นมีประสิทธิภาพในสถานการณ์ที่มีการเคลื่อนที่สูง (High Mobility) และโครงข่ายที่มีการจราจรหนาแน่น (Network load) ในขณะที่ OLSR นั้นมีประสิทธิภาพในเรื่องอัตราการส่งผ่านข้อมูลได้ดี (Data delivery ratio) และ End to End Delay ที่ต่ำกว่า AODV ในสถานะที่ขนาดของโครงข่ายมีขนาดใหญ่ขึ้น<sup>1</sup> ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือก AODV มาใช้ในงานวิจัยนี้เพราะว่างานวิจัยนี้ทดสอบประสิทธิภาพของโครงข่ายเมื่อมีการใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตที่เพิ่มมากขึ้นตามเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้น

<sup>1</sup> A. Zakrzewska, L. Koszalka and I. Pozniak-Koszalka. (2008, September). "Performance Study of Routing Protocols for Wireless Mesh Networks". *ICSENG 2008*. p.331 - 336.



### 2.3 Voice over IP (VoIP)

Voice over IP (VoIP) หรือการใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตเป็นเทคโนโลยีที่ช่วยให้การสื่อสารด้วยเสียง สามารถทำได้โดยผ่าน โครงข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งเทคโนโลยีนี้ จะทำให้ช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการใช้โทรศัพท์ติดต่อสื่อสาร โดยปลายทาง ต้องมีการเชื่อมต่อเข้าอินเทอร์เน็ต และใช้บริการ VoIP ในโครงข่ายเดียวกัน ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของ VoIP สามตัวคือ Delay, loss, jitter

ปัจจัยแรกคือ Delay<sup>1,2</sup> เป็นเวลาที่ใช้ในกระบวนการของเสียงตั้งแต่เริ่มต้นกระบวนการจนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการของระบบ โดยที่ ITU G.114 จำกัดความว่า end to end delay โดยแนะนำว่าค่าต้องไม่เกินกว่า 150 ms.<sup>3</sup> โดยที่ end to end delay คือผลรวมของ delay คำนวณตั้งแต่ผู้ส่ง เวลาในการส่งผ่านโครงข่ายจะมีความล่าช้าทางเวลาที่เกิดจากการเดินทางของแพ็คเก็ต (transmission delay) จนถึงผู้รับ คือเมื่อแพ็คเก็ตอยู่ในโครงข่ายจะมี delay จากความล่าช้าทางเวลาที่เกิดจากคิวในตัวเราท์เตอร์ (queuing delay), ความล่าช้าทางเวลาที่เกิดจากการส่งแพ็คเก็ต (Serialization delay) โดยจะรวม jitter buffer เข้าไปด้วย

ปัจจัยที่สอง loss<sup>1,2</sup> เกิดจากเมื่อแพ็คเก็ตถูกส่งไปในโครงข่าย แพ็คเก็ตเหล่านั้นสามารถหายหรือเสียหายได้ โดยปกติสาเหตุของการสูญหายคือเกิดการชนกัน (collision) ของแพ็คเก็ตในโครงข่ายและการส่งแพ็คเก็ตที่ผิดพลาด หรือแพ็คเก็ตถูกคัดทิ้งเมื่อระบบมีการจราจรหนาแน่น หรือมีสัญญาณรบกวน (noise) ในท่อส่งสัญญาณ โดยที่ ITU G.113 กำหนดให้ G.729 with voice activity detection มีอัตราการสูญหายของแพ็คเก็ตได้ไม่เกิน (packet loss ratio) 2 เปอร์เซ็นต์ จะมีค่า impairment factor หรือ  $I_c$  ให้ E-model เป็น 19 ซึ่งทำให้ค่า MOS Score ต่ำกว่า 3.5<sup>4,5</sup>

<sup>1</sup> P. Dely. (2007, June). **Adaptive Aggregation of Voice over IP in Wireless Mesh Networks**. Computer Science. Sweden: University of Karlstad.

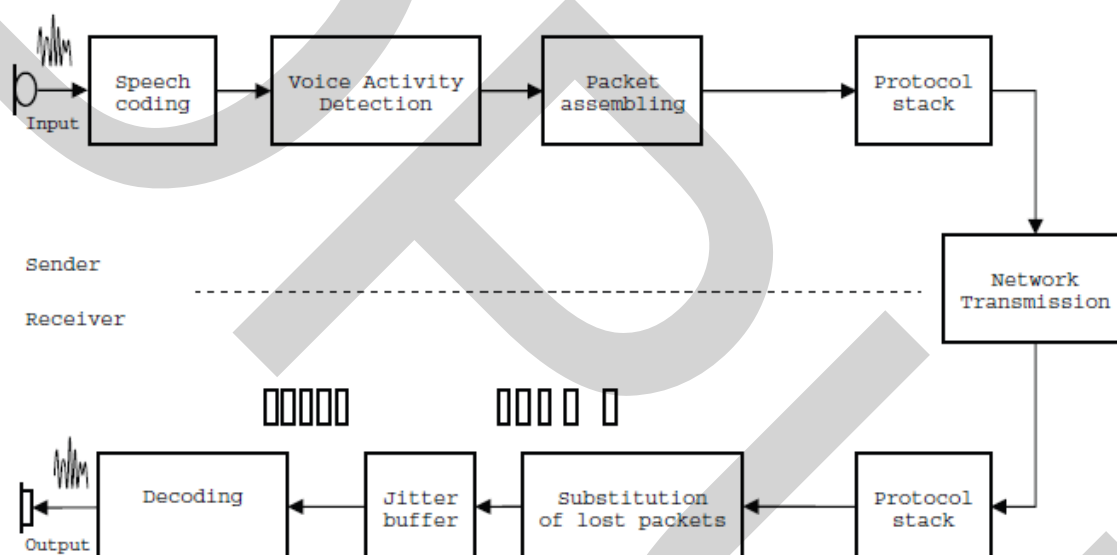
<sup>2</sup> A. Ubaid & A. Ksentini. (2008, June). **Deployment of VoIP in the IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks**. Computer Science. France: University of Rennes.

<sup>3</sup> ITU-T. (2003). ITU-T Recommendation G.114: One-way transmission time International Telecommunication Union: Transmission Systems and Media Digital Systems and Networks. Retrieved March 2011, from <http://www.itu.int/itudoc/itu-t/aap/sg12aap/history/g.114/index.html>.

<sup>4</sup> ITU-T. (2003, March). ITU-T Recommendation G.107: The E-Model a computational model for use in transmission planning. Retrieved March 2011, from <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?id=9730>.

<sup>5</sup> ITU-T. (2001). ITU-T Recommendation G.113: Transmission impairments due to speech processing. Retrieved March 2011, from <http://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?id=9273>.

ปัจจัยที่สาม jitter<sup>1, 2</sup> คือความแปรปรวนของความล่าช้าทางเวลาเกิดจากแพ็คเก็ตที่มาต่อเนื่องกัน โดยที่ความยาวของคิวในระบบมีจำกัดและมีการจราจรหนาแน่นในโครงข่าย jitter คือความแตกต่างของเวลาการมาถึงสำเร็จของแพ็คเก็ตครั้งที่สองที่มากกว่าการมาถึงของแพ็คเก็ตครั้งที่หนึ่ง โดยทุก ๆ แพ็คเก็ตที่ส่งมานั้นจะถูกนำมาเก็บที่ jitter buffer ก่อนที่จะปล่อยไปยังตัวถอดรหัส หรือ (Decoder) ตามรูปที่ 2.4<sup>1</sup> โดยที่ jitter buffer นั้นใช้ในการกักเก็บแพ็คเก็ตที่เข้ามาทำให้สามารถคงที่เวลาของ jitter ได้ ในขณะที่สามารถปรับเปลี่ยน jitter buffer ตาม delay ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเงื่อนไขของโครงข่ายได้ และ jitter buffer ขนาดใหญ่สามารถใช้ทดแทน jitter ขนาดใหญ่ แต่จะทำให้ delay มากขึ้นเช่นกัน



รูปที่ 2.4 แสดงการทำงานในระบบ VoIP

CODEC (COder/DECoder) เป็นองค์ประกอบที่ใช้ในรูปแบบดิจิทัลที่เป็นเสียงและการ convert กลับมาให้อยู่ในรูปแบบ audio stream CODEC เป็นตัวที่ใช้ convert analogue-to-digital-to-analogue เช่น IP Phone, IP PBX, softphone, gateway มี CODECs หลาย ๆ รูปแบบที่ใช้แตกต่างกัน ดังนี้

<sup>1</sup> P. Dely. (2007, June). **Adaptive Aggregation of Voice over IP in Wireless Mesh Networks**. Computer Science. Sweden: University of Karlstad.

<sup>2</sup> A. Ubaid & A. Ksentini. (2008, June). **Deployment of VoIP in the IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks**. Computer Science. France: University of Rennes.

G.711<sup>1</sup> เป็นมาตรฐานพื้นฐานของ IP PBX, IP phones และ ATA vendors, ซึ่งดีเทียบเท่ากับ digital PSTN และ trunks มาตรฐานนี้จะมีอัตราการส่งข้อมูล 64 Kbps ก่อนการ encapsulation และไม่มีบีบอัดข้อมูลหรือ compression

G.723.1<sup>2</sup> เคยถูกใช้เป็นมาตรฐานที่แนะนำให้ใช้งานในการบีบอัดและส่งข้อมูล ถูกส่งในอัตราการส่งข้อมูลที่ 6.3 Kbps. และ 5.3 Kbps. ถึงแม้ว่าช่วยลดปริมาณ bandwidth แต่เสียงที่ได้มีคุณภาพแย่กว่า G.729 ดังนั้นจึงไม่เป็นที่นิยมในการใช้เป็นมาตรฐานในการใช้งาน VoIP

G.729<sup>3</sup> ถูกใช้ใน vendor ส่วนใหญ่และมีการบีบอัดข้อมูลเสียงหรือและมีอัตราการส่งข้อมูลที่ 8 Kbps. ในด้านคุณภาพนั้นมีคุณภาพทางเสียงที่ต่ำกว่าของ G.711 โดยต้องเสียค่า license ให้กับทุก call ที่ active ในมาตรฐาน G.729 นี้ และ Ideal CODEC นี้ถูกใช้สำหรับ WAN หรือโครงข่ายขนาดใหญ่ และใช้ bandwidth ในวงจร circuits ที่ต่ำ เช่น Asterisk, SIP Server, Elastix, VoIP

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ CODEC ประเภท G.729 เพราะในปัจจุบันมีหลาย ๆ vendor หรือ operator ใช้งานมาตรฐานนี้เป็นส่วนใหญ่และมาตรฐาน G.729 นี้มีการบีบอัดข้อมูลทำให้ลดการใช้งานของ bandwidth ในระบบทำให้เหมาะกับโครงข่ายขนาดใหญ่ที่มีการจราจรหนาแน่นในปัจจุบันและอนาคตมากกว่ามาตรฐาน G.711 และ G.723 ส่วนคุณภาพของเสียงนั้นแม้จะมีคุณภาพทางเสียงที่ด้อยกว่า G.711 แต่ G.729 ยังอยู่ในขอบเขตที่ยอมรับได้

---

<sup>1</sup> Wikipedia. (2011, December). ITU-T Recommendation G.711: Pulse code modulation (PCM) of voice frequencies. Retrieved January 2012, from <http://en.wikipedia.org/wiki/G.711>.

<sup>2</sup> Wikipedia. (2011, June). ITU-T Recommendation G.723.1: Dual Rate Speech Coder for Multimedia Communications Transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s. Retrieved January 2012, from <http://en.wikipedia.org/wiki/G.723.1>.

<sup>3</sup> Wikipedia. (2011, October). ITU-T Recommendation G.729: Coding of Speech at 8kbit/s using Conjugate-structure Algebraic-code-excited Linear prediction (CS-ACELP). Retrieved January 2012, <http://en.wikipedia.org/wiki/G.729>.

## 2.4 E-Model

E-Model<sup>1,2,3,4</sup> ใช้ในการวัดคุณภาพของ end-to-end speech quality หรือ VoIP session โดยใช้คะแนนของ Mean opinion score (MOS) ดังแสดงในตารางที่ 2.1<sup>2,3,4</sup> ที่ถูกคำนวณมาจาก R-factor ดังแสดงในตารางที่ 2.2<sup>2,3,4</sup> ซึ่งใช้วัดช่วงคุณภาพของเสียงมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0 - 100

ตารางที่ 2.1 แสดง R-FACTOR, QUALITY RATINGS AND MOS

R-Factor	Quality of voice rating	MOS
$90 < R \leq 100$	Best	4.34 - 4.50
$80 < R \leq 90$	High	4.03 - 4.34
$70 < R \leq 80$	Medium	3.60 - 4.03
$60 < R \leq 70$	Low	3.10 - 3.60
$50 < R \leq 60$	Poor	2.58 - 3.10

ตารางที่ 2.2 แสดงการแปลงค่าจาก R-factor เป็น MOS

R-Factor	MOS
$R < 0$	1
$R > 100$	4.5
$0 < R < 100$	$1 + 0.035R + 7 \cdot 10^{-6}R(R-60)(100-R)$

<sup>1</sup> P. Dely. (2007, June). **Adaptive Aggregation of Voice over IP in Wireless Mesh Networks**. Computer Science. Sweden: University of Karlstad.

<sup>2</sup> ITU-T. (2003, March). ITU-T Recommendation G.107: The E-Model a computational model for use in transmission planning. Retrieved March 2011, from <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?id=9730>.

<sup>3</sup> R. Cole & J.H. Rosenbluth. (2001, April). "Voice over IP performance monitoring". **ACM SIGCOMM Computer Communication Review Homepage archive**. Volume 31, Issue 2. p.9 - 24.

<sup>4</sup> M. Gidlund and J. Ekling. (2008, November). "VoIP and IPTV distribution over wireless mesh networks in indoor environment". **IEEE Transactions on Consumer Electronics**. Volume 54, Number 4. p.1665 - 1671.

การหาค่า Transmission Rating factor หรือ R-factor จาก ITU-T Rec G.107<sup>1</sup> สามารถลดค่าให้เหลือแต่พารามิเตอร์หลักคือ delay และ loss จะได้สมการดังนี้<sup>2,3,4</sup>

$$R = 94.2 - I_d - I_e \quad (1)$$

โดยที่  $I_d$  คือตัวแทนของ end to end delay หรือ one-way delay สามารถหาค่าได้จาก

$$I_d = 0.024d - 0.11(d-177.3)H(d-177.3) \quad (2)$$

เมื่อ  $d$  กำหนดให้เป็น end to end delay = 25 (voice codec delay) + 60 (delay จาก jitter buffer) + delay จาก network (หาค่าได้จากค่าเฉลี่ยของ end to end delay หรือค่าเฉลี่ย Round trip delay / 2) มีหน่วยเป็น milliseconds และ  $H(x)$  เป็น heavyside step function โดยถ้ามีค่าเท่ากับ 0 เมื่อ  $X < 0$  และนอกจากนั้นเท่ากับ 1<sup>2,4</sup>

โดยที่  $I_e$  คือตัวแทนของ loss rate จากค่า codec ของ G.729 สามารถหาค่าได้จาก

$$I_e = 11 + 40 \ln(1+10e) \quad (3)$$

เมื่อ  $e$  กำหนดให้เป็น loss rate คำนวณได้จาก packet loss rate = (total packet lost / total packet send) \* 100 อ้างอิงสมการในบทความอ้างอิง<sup>4,5</sup>

## 2.5 แบบจำลองของนาคากามิ (Nakagami model)

Propagation model เป็นปัญหาพื้นฐานของการศึกษาการออกแบบทางด้านระบบไร้สาย และ Propagation model เป็นปัจจัยหนึ่งซึ่งถูกกำหนดให้ใช้เป็นวิธีการในการประมาณการความเข้มของสัญญาณฝั่งรับ (RSS) ของการส่งข้อมูลในโครงข่ายไร้สาย และยังมีปัจจัยอื่นอีกเช่น ระยะห่างกำลังส่ง เป็นต้น

<sup>1</sup> ITU-T. (2003, March). ITU-T Recommendation G.107: The E-Model a computational model for use in transmission planning. Retrieved March 2011, from <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?id=9730>.

<sup>2</sup> R. Cole & J.H. Rosenbluth. (2001, April). "Voice over IP performance monitoring". **ACM SIGCOMM Computer Communication Review Homepage archive**. Volume 31, Issue 2. p.9 - 24.

<sup>3</sup> M. Gidlund and J. Ekling. (2008, November). "VoIP and IPTV distribution over wireless mesh networks in indoor environment". **IEEE Transactions on Consumer Electronics**. Volume 54, Number 4. p.1665 - 1671.

<sup>4</sup> S. Ganguly et al. (2006, November). "Performance Optimizations for Deploying VoIP Services in Mesh Networks". **IEEE Journal on selected areas in communications**. Volume 24, Number 11. p.2147 - 2158.

<sup>5</sup> D. Singh et al. (2009, May). "Measurement of wireless Network Performance". **IEEE National Conference on Advanced Technologies and Applications**. p.1-4.

Propagation model มีหลายโมเดลเช่น TwoRayGround, Shadowing, Nakagami เป็นต้น โดยที่โมเดลแรกคือ TwoRayGround<sup>1</sup> ถูกออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่ายและดี ถูกใช้เป็นโมเดลที่มีเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเกิดขึ้นภายใต้กฎเกณฑ์ที่แน่นอนและได้มีการกำหนดเวลาที่แน่นอน (deterministic Propagation model) มีข้อเสียคือค่า RSS จะคล้ายหรือเหมือนกันสำหรับค่าความแรงของสัญญาณ (transmission range) ทั้งหมดเช่นถ้า transmission range เท่ากับ 350 เมตร ที่ระยะห่างจากต้นทางไปยังปลายทางคือ 350 เมตร ค่าความเป็นไปได้ที่ปลายทางจะได้รับแพ็คเกจจะเท่ากับ ต้นทางกับปลายทางอยู่ห่างกัน 5 เมตร โมเดลที่สองคือ โมเดล Shadowing<sup>1</sup> นี้ประกอบด้วยสองส่วนคือ path loss model ที่ซึ่งใช้ค่าเดคาค่าเฉลี่ยของกำลังของสัญญาณฝั่งรับที่ระยะห่างจากฝั่งผู้ส่งและอีกส่วนคือ log-normal random variable ที่ซึ่งใช้เป็นโมเดลความน่าจะเป็น (probabilistic) ในการติดต่อสื่อสารระหว่างโหนดขอบที่ระยะสัญญาณวิทยุครอบคลุมถึง และสัญญาณที่มาถึงยังปลายทางจึงมาจากหลายๆเส้นทาง (Multipath propagation effects) โดยมีการแจกแจงความน่าจะเป็นในการคำนวณค่าความแรงของสัญญาณเข้าไปซึ่งเป็นรูปแบบ Gaussian random distribution หรือ log-normal distribution

แบบจำลองของนาคากามิ Nakagami model<sup>2,3,4</sup> ถูกใช้กับสัญญาณที่มาถึงยังปลายทางจึงมาจากหลายๆเส้นทาง (Multipath propagation) และเป็น Stochastic คือ เวลาจะมีผลกระทบมาจากความน่าจะเป็นหรือความแปรปรวนจากการมาของเวลาที่ไมคงที่ซึ่งก็คือการกระจายตัวของ delay จากกลุ่มที่มีการสะท้อนของสัญญาณที่แตกต่างออกไป และเฟสของสัญญาณมีการสะท้อนของสัญญาณแบบสุ่มเวลาทำให้เกิดความแปรปรวนขึ้นแต่ delay มีค่าประมาณว่ามีค่าเท่ากับทุก ๆ คลื่นสัญญาณและถ้าผลลัพธ์ที่เกิดจากการคำนวณ 1 กลุ่ม (m-distribution = 1) จะมีค่าเท่ากับ Rayleigh fading โมเดล โดยค่าเฉลี่ยของ delay นั้นถูกคาดหมายว่าเป็นนัยสำคัญของกลุ่มสัญญาณ ถ้ามีค่า delay มากขึ้นจะทำให้มี interference ในช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้นด้วยทำให้แบบจำลองของนาคากามินั้นมีสภาพแวดล้อมคล้ายกับความเป็นจริงมากกว่าทุกโมเดลที่กล่าวมาข้างต้น อีกทั้งการ

<sup>1</sup> I. Khan & A. Qayyum. (2009, December). "Performance Evaluation of AODV and OLSR in Highly Fading Vehicular Ad hoc Network Environments". **INMIC 2009, IEEE 13th International**. p.1 - 5.

<sup>2</sup> N. Youssef, T. Munakata, and M. Takeda. (1996). "Fade statistics in Nakagami fading environments". **IEEE 4th International Symposium on 1996. Volume 3**. p.1244 - 1247.

<sup>3</sup> S. Ganguly et al. (2006, November). "Performance Optimizations for Deploying VoIP Services in Mesh Networks". **IEEE Journal on selected areas in communications. Volume 24, Number 11**. p.2147 - 2158.

<sup>4</sup> WirelessCommunication.NL. (2009). Nakagami fading. Retrieved April 2011, from <http://wireless.per.nl/reference/chaptr03/ricenaka/nakagami.htm>.

กระจายตัวของพารามิเตอร์มีความยืดหยุ่นกว่าในการอธิบายการจางหาย (fading) ที่สภาพแวดล้อมที่ต่างกันได้ดี โดยแบ่งสภาพแวดล้อมที่ต่างกันได้ตามตารางที่ 2.3<sup>1</sup>

ตารางที่ 2.3 แสดงค่าของ pathloss exponent (Alpha) ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

Environment	Pathloss exponent (Alpha)
Free Space	2
Urban area, LOS	2.7-5
Urban area, no LOS	3-5
Indoor, LOS	1.6-1.8
Indoor, no LOS	4-6

แบบจำลองของนาคากามิเป็นแบบจำลองที่ได้มาจากการทดลองซึ่งสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมทั้งในชนบทและในเขตเมืองและแบบจำลองของนาคากามิยังสามารถอธิบายแบบจำลองอื่นๆ ได้อีกด้วย โดยที่ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability density function: pdf) แสดงได้ดังสมการที่ 4<sup>2</sup>

$$p_m(x) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m x^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} x^2\right) \quad x \geq 0, m \geq 1/2 \quad (4)$$

โดยที่  $m$  คือ ค่าตัวแปรของการเฟดดิ้งแบบนาคากามิ-เอ็ม ซึ่งจะมีค่าระหว่าง  $1/2$  ถึง  $\infty$

$\Gamma(\cdot)$  คือ ฟังก์ชันแกมมา

$\Omega$  คือ โมเมนต์อันดับที่สอง (Second moment) ซึ่งแสดงถึงค่าเฉลี่ยกำลังสองของแอมพลิจูดของ

โดยการจำลองรับของวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ตัวแปรสุ่ม (random variables) หรือ independent and identically distributed (i.i.d.) เพื่อใช้อนุมานเชิงสถิติและใช้ลดความซับซ้อนของคณิตศาสตร์พื้นฐานของวิธีการทางสถิติได้หลากหลายเช่นสถิติทางคณิตศาสตร์และทฤษฎีทางสถิติ

<sup>1</sup> E.M. van Eenennaam, (2008, June). **A Survey of Propagation Models used in Vehicular Ad hoc Network (VANET)**

**Research.** Computer Science, Netherlands: University of Twente.

<sup>2</sup> C. Beaulieu. (2001, November). "An Efficient Procedure for Nakagami-m Fading Simulation". **Global Telecommunication Conference 2001, Volume 6.** p.3336-3342.

ซึ่ง i.i.d. ถูกใช้ใน probability distribution ที่เป็น normal distribution และถูกใช้ในแบบจำลองของนาคากามิ

ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้แบบจำลองของนาคากามิที่มีค่า  $m$ -distribution = 1 หรือมีค่าเท่ากับ Rayleigh fading โมเดล เพราะว่าแบบจำลองของนาคากามิเป็นแบบจำลองที่ได้มาจากการทดลองและสอดคล้องกับสภาพแวดล้อมทั้งในชนบทและในเขตเมือง อีกทั้งการกระจายตัวของพารามิเตอร์มีความยืดหยุ่นกว่าในการอธิบายการจางหาย (fading) ที่สภาพแวดล้อมที่ต่างกันได้ดี

## 2.6 OMNET++

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม OMNET++<sup>1</sup> มาใช้ในการจำลองระบบในโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภท Grid metrics โดยที่ OMNET++ เป็นตัวซิมูเลชันที่ใช้ในการจำลองระบบโครงข่ายซึ่งตัว OMNET++ นั้นปัจจุบันเวอร์ชัน 4.1 และเป็นโอเพนซอร์สหรือซอสที่เปิดให้ใช้งานได้ฟรี มีคอมไพเลอร์พื้นฐาน โมดูล และสถาปัตยกรรมโครงสร้างในการซิมูเลชันในทรัพยากรให้ใช้งาน

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการที่ได้ศึกษางานวิจัยทางการใช้งานด้านโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตในงานในโครงข่ายไร้สายแบบเมชนั้น พบว่ามีหลาย ๆ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานด้านโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตในงานในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้คือ

งานวิจัยที่ 1 Simulating Wireless Mesh Networks<sup>2</sup> งานวิจัยนี้จะการจำลองระบบในการใช้งานด้านโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตในงานในโครงข่ายไร้สายแบบเมชใน NS-2 โดยการเพิ่มจำนวนสายการใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่อยู่ในวงแลนเดียวกันโดยจำนวนระยะห่างระหว่างโหนดเพิ่มขึ้นจาก 5 – 100 เมตร และเพิ่มจำนวนสายที่ใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตในโครงข่ายไร้สายแบบเมชและจำนวน hop ที่เพิ่มขึ้นและขนาดความจุของบัฟเฟอร์เป็น 50, 500, 5000 แพ็คเก็ตโดยไม่มี background traffic ทั้งสองวิธีใช้ QoS ในการวัดจำนวนสายที่ใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตในงานในโครงข่ายไร้สายแบบเมชในแต่ละ hop โดยเน้นประเด็นเรื่อง delay ที่จะทำให้ QoS ของ VoIP ที่มีค่า R-Factor ต่ำกว่า 70 โดยที่ค่าของ delay นั้นจะต้องมีค่าไม่เกิน 150 ms. ถึงจะยอมรับได้ตามมาตรฐานของ ITU G.114 โดยสรุปคือเมื่อขนาดของ

<sup>1</sup> The OMNeT++ Community. (2001-2009). User Manual version 4.1. Retrieved July 2010, from <http://www.omnetpp.org>.

<sup>2</sup> P. Rabiej, W. Sendor & L. Prytek. (2009, May). **Simulating Wireless Mesh Networks**.

Computer Science and Electronics. Poland: University of Science and Technology AGH Distributed Network Environments.



ความจุของบัฟเฟอร์น้อยลงจาก 5000 เป็น 500 และ 50 ทำให้มี delay เพิ่มขึ้นตามลำดับที่กล่าวมาจึงทำให้เป็นสาเหตุที่ทำให้ค่า R-Factor ต่ำกว่า 70

งานวิจัยที่ 2 A Cross-layer Routing Scheme for Scalable Triple Play Service in Wireless Mesh Networks<sup>1</sup> งานวิจัยนี้จะการจำลองระบบในการใช้งานด้านโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตงานในโครงข่ายไร้สายแบบเมชใน NS-2 โดยการเพิ่มจำนวนสายที่ใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ต FTP และ video โดยอัตราส่วนที่กำหนดในโครงข่ายไร้สายแบบเมชและจำนวน hop ที่ไม่เกิน 2 hop และใช้ QoS ในการวัดจำนวนสายที่ใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตงานในโครงข่ายไร้สายแบบเมช โดยเน้นประเด็นเรื่อง jitter ที่จะทำให้ QoS ของ VoIP ที่มีค่า R-Factor ต่ำกว่า 70 โดยสรุปผลคือการที่มีกราฟฟิคหลาย ๆ ประเภทมาใช้งานในโครงข่ายไร้สายแบบเมชนั้นเมื่อจำนวนของการใช้งานแต่ละประเภทเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนที่กำหนดในงานวิจัย [20] นั้นมีผลทำให้อัตราการสูญหายของแพ็คเก็ตเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากมีสัญญาณรบกวน (interference) อยู่ในระดับที่สูงและได้แนะนำว่าควรจะใช้โพรโทคอลการหาเส้นทางที่งานวิจัย [20] คิดขึ้นมาเพื่อสนับสนุนการใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตและกราฟฟิคประเภท FTP และ video

งานวิจัยที่ 3 VoIP on wireless meshes: Models, Algorithms and Evaluation networks<sup>2</sup> งานวิจัยนี้จะการจำลองระบบในการใช้งานด้านโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตในโครงข่ายไร้สายแบบเมชใน NS-2 โดยการเพิ่มจำนวนสายที่ใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตงานในโครงข่ายไร้สายแบบเมชและจำนวน hop ที่เพิ่มขึ้นโดยไม่มี background traffic และใช้ QoS ในการวัดจำนวนสายที่ใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตงานในโครงข่ายไร้สายแบบเมชในแต่ละ hop โดยเน้นประเด็นเรื่อง loss rate ที่จะทำให้ QoS ของ VoIP ที่มีค่า R-Factor ต่ำกว่า 70 โดยสรุปผลคือมีการทดลองต่อโครงข่ายเป็นแบบกริด แบบทรีหรือแบบต้นไม้ (Tree) และแบบสุ่ม (random) แต่แบบกริดให้ผลดีที่สุดและได้มีการตรวจสอบในทุก ๆ 5 วินาทีว่าถ้าค่า R-Factor ต่ำกว่า 70 จะมีการสุ่ม drop สายการใช้งาน VoIP เพื่อที่จะทำให้ค่าของ R-Factor ไม่ต่ำกว่า 70 และการมีสัญญาณรบกวน (interference) ที่มากขึ้นตามจำนวนสายที่ใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตงานในโครงข่ายที่เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วยทำให้มีผลให้ค่าของ R-Factor นั้นต่ำกว่า 70

<sup>1</sup> V.Borges, M. Curado, and E. Monteiro. (2010, September). "A Cross-layer Routing Scheme for Scalable Triple Play Service in Wireless Mesh Networks". **ICCCN 2010**. p.1 - 6.

<sup>2</sup> A. Kashyap, (2007, May). "VoIP on wireless meshes: Models, Algorithms and Evaluation networks". **INFOCOM 2007, 26th IEEE International Conference on Computer Communications**. p.2036 - 2044.

งานวิจัยที่ 4 Adaptive Aggregation of Voice over IP in Wireless Mesh Networks<sup>1</sup>  
งานวิจัยนี้จะการจำลองระบบในการใช้งานด้านโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตในโครงข่ายไร้สายแบบ  
เมฆใน NS-2 โดยการนำแพ็คเก็ตมารวมกันเพื่อลด overhead แล้วจึงส่งไปยังปลายทาง มีการทดลอง  
เพิ่มจำนวนสายที่ใช้งาน โทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตงานในโครงข่ายไร้สายแบบเมฆและจำนวน hop  
ที่เพิ่มขึ้นโดยไม่มี background traffic และใช้ QoS ในการวัดจำนวนสายที่ใช้งาน โทรศัพท์ผ่าน  
อินเทอร์เน็ตงานในโครงข่ายไร้สายแบบเมฆในแต่ละ hop โดยสรุปผลคือการนำแพ็คเก็ตมารวมกัน  
เพื่อลด overhead ช่วยทำให้เพิ่มจำนวนสายที่ใช้งาน โทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตได้มากขึ้นและลด  
การจราจรในโครงข่ายได้อีกด้วย

โดยสรุปยังไม่ม้งานวิจัยที่ศึกษาการใช้งานด้านโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตงานใน  
โครงข่ายไร้สายแบบเมฆประเภท Grid metric โดยใช้ตัวแปรต่าง ๆ ที่สอดคล้องกับการใช้งานใน  
ประเทศไทยและจำลองการใช้งานระบบในโปรแกรม OMNET++ ดังนั้นผู้วิจัยจึงเสนอการจำลอง  
เพื่อหาปริมาณการใช้งาน VoIP ที่มากที่สุดที่สามารถเข้ามาใช้บริการโดยมี QoS อยู่ในระดับที่  
ยอมรับได้ ทำให้ผู้ให้บริการ โครงข่ายไร้สายสามารถประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนของการใช้  
งาน VoIP ในโครงข่ายไร้สายแบบเมฆที่เป็น Grid metric แบบ multi-hop ได้

---

<sup>1</sup> P. Dely. (2007, June). **Adaptive Aggregation of Voice over IP in Wireless Mesh Networks**. Computer Science. Sweden:  
University of Karlstad.

## บทที่ 3

### ระเบียบวิธีวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบของโครงงานรวมทั้งอธิบายถึง แนวทางการวิจัย และพัฒนา เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย แผนการดำเนินงาน ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

#### 3.1 แนวทางการวิจัยและพัฒนา

งานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าและศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการใช้งาน VoIP ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชพบว่างานวิจัยที่ผ่านมามีการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทำงานในสภาพแวดล้อมจริงและระยะห่างระหว่าง AP ที่เหมาะสม เช่น

3.1.1 ใช้กำลังส่งที่เป็นค่าเริ่มต้นในตัวโปรแกรมจำลองระบบไม่ตรงกับค่าความเป็นจริงเช่น ใช้กำลังส่งที่เป็นค่าเริ่มต้นในตัวโปรแกรมจำลองระบบไม่ตรงกับค่าความเป็นจริงเช่น 30 mW. หรือ 50 mW.<sup>1,2</sup>

3.1.2 จำลองระบบที่เป็น VoIP โดยไม่มีข้อมูลชนิดอื่นด้วยซึ่งไม่สอดคล้องกับการใช้งานจริงในชีวิตประจำวัน<sup>3,4,5</sup>

3.1.3 ขนาดของบัพเฟอร์ที่เป็นค่าเริ่มต้นในตัวโปรแกรมจำลองระบบคือ 14 แพ็คเก็ต หรือ 100 แพ็คเก็ต<sup>3,4,5</sup> ซึ่งไม่สอดคล้องกับขนาดของบัพเฟอร์ในตัว Access Point ส่วนใหญ่ที่ใช้ในปัจจุบัน

---

<sup>1</sup> P. Dely. (2007, June). **Adaptive Aggregation of Voice over IP in Wireless Mesh Networks**. Computer Science. Sweden: University of Karlstad.

<sup>2</sup> R. Gantenbein. (2010, June). **VIRTUALMESH: AN EMULATION FRAMEWORK FOR WIRELESS MESH NETWORKS IN OMNET++**. Computer Science. University of Bern.

<sup>3</sup> P. Rabiej, W. Sendor & L. Prytek. (2009, May). **Simulating Wireless Mesh Networks**. Computer Science and Electronics. Poland: University of Science and Technology AGH Distributed Network Environments.

<sup>4</sup> V.Borges, M. Curado, and E. Monteiro. (2010, September). "A Cross-layer Routing Scheme for Scalable Triple Play Service in Wireless Mesh Networks". **ICCCN 2010**. p.1 - 6.

<sup>5</sup> A. Kashyap, (2007, May). "VoIP on wireless meshes: Models, Algorithms and Evaluation networks". **INFOCOM 2007, 26th IEEE International Conference on Computer Communications**. p.2036 - 2044.

เพื่อให้ผู้ให้บริการโครงข่ายไร้สายได้ทราบถึงประสิทธิภาพของการใช้งาน VoIP ในโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภท Grid metric แบบ multi-hop โดยใช้ตัวแปรต่าง ๆ ที่สอดคล้องกับการใช้งานจริงในประเทศไทย ที่มีการจำลอง background data traffic เพื่อหาปริมาณการใช้งาน VoIP ที่มากที่สุดที่สามารถเข้ามาใช้บริการโดยมี QoS ไม่ต่ำกว่า 3.50 และผู้ให้บริการสามารถประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนโครงข่ายไร้สายแบบเมช ก่อนการติดตั้งเพื่อใช้งานจริง

### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 เครื่อง Laptop สำหรับการจำลองระบบ จำนวน 1 เครื่อง

3.2.2 โปรแกรม OMNET++ สำหรับการจำลองการทำงาน WMN

### 3.3 แผนการดำเนินงาน

3.3.1 ศึกษา ค้นคว้า และรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องของโครงข่ายไร้สายแบบเมช

ทำการศึกษาทฤษฎีและรูปแบบของ VoIP ผ่านโครงข่ายไร้สายแบบเมชของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.3.2 ศึกษาอุปกรณ์และโปรแกรมที่ใช้ทำการจำลองระบบ

ทำการศึกษาค้นหาและรวบรวมโปรแกรมที่จะทำการจำลองระบบเพื่อที่จะสามารถประยุกต์ใช้ในการจำลองระบบของ VoIP ผ่านโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภท Grid metrics ที่นำเสนอได้อย่างถูกต้อง ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม OMNET++ เวอร์ชัน 4.1 ซึ่งเป็นโอเพนซอสหรือซอสที่เปิดให้ใช้งานได้ฟรี มีคอมโพเน้นพื้นฐานในการซิมูเลชันในทรัพยากรให้ใช้งาน

3.3.3 ศึกษาหลักการของโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่ใช้ VoIP วิ่งผ่านโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภท Grid metrics

ทำการศึกษาทฤษฎีของโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่ใช้ VoIP วิ่งผ่านโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภท Grid metrics เพื่อหาปัจจัยที่ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพและและเป็นไปตามรูปแบบที่ทำการนำเสนอ

3.3.4 ออกแบบและพัฒนาระบบที่ทำการนำเสนอ

ออกแบบระบบโดยใช้โปรแกรมที่ทำการศึกษามาก่อน พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลในการออกแบบ เพื่อที่จะทำการทดสอบปัจจัยที่ทำให้โครงข่ายมีประสิทธิภาพของระบบที่ได้ออกแบบมา



ตารางที่ 3.1 แสดงแผนการดำเนินงาน (ต่อ)

งาน	เดือน	ก.ค.	ก.ย.	พ.ย.	ม.ค.	มี.ค.	พ.ค.	ก.ค.	ก.ย.	พ.ย.	ม.ค.
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		ส.ค.	ต.ค.	ธ.ค.	ก.พ.	เม.ย.	มิ.ย.	ส.ค.	ต.ค.	ธ.ค.	ก.พ.
		53	53	53	54	54	54	54	54	54	55
สร้างจำลองระบบ ที่นำเสนอ											
เปรียบเทียบ วิเคราะห์ผลที่ได้ และสรุป											
รวบรวมข้อมูล ที่ได้ทั้งหมดจัดทำ วิทยานิพนธ์											

### 3.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

#### 3.4.1 แนวคิดการทำงานของโปรแกรม

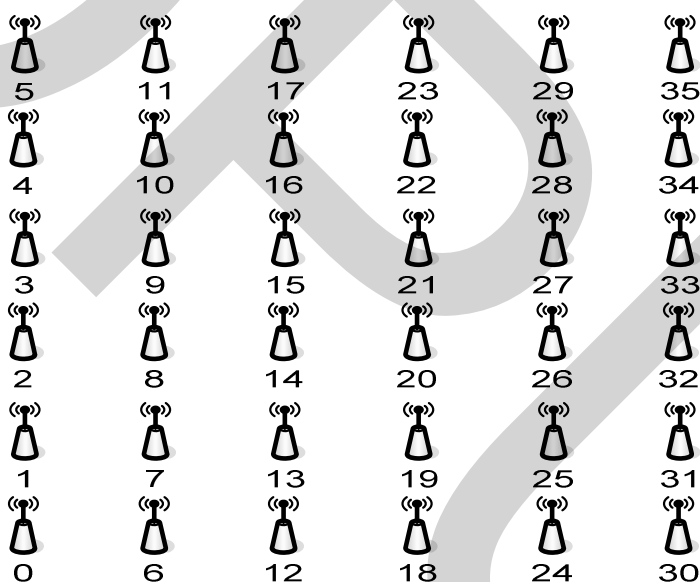
ผู้วิจัยได้ทำการค้นคว้าและศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการใช้งาน VoIP ในโครงข่ายไร้สายแบบเมฆพบว่างานวิจัยที่ผ่านมา มีการกำหนดค่าตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งไม่สอดคล้องกับการทำงานในสภาพแวดล้อมจริงและระยะห่างระหว่าง AP ที่เหมาะสม เช่น

- 1) ใช้กำลังส่งที่เป็นค่าเริ่มต้นในตัวโปรแกรมจำลองระบบให้ถูกต้องตรงตามกฎหมายที่ประเทศไทยได้กำหนดไว้
- 2) จำลองระบบที่เป็น VoIP โดยมีการจำลองระบบโดยใช้งาน VoIP ประเภทเดี่ยวและ VoIP ที่มี Data Background Traffic แบบ FTP
- 3) ใช้ขนาดของบัพเฟอร์ที่ใช้ใน AP รุ่น Linksys WRT54G series ที่มีขนาดบัพเฟอร์ 8 MB ในตัวโปรแกรมจำลองที่ใช้จริงในปัจจุบัน

หลังจากการตรวจสอบความถูกต้องในการจำลองการทำงานของ OMNET++ แล้วค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่จำเป็นได้มีการปรับให้สอดคล้องกับข้อกำหนดการใช้งานในประเทศไทย ระยะห่างระหว่าง AP ที่และสภาพแวดล้อมเหมาะสม

### 3.4.2 โครงสร้างและรูปแบบของงานวิจัย

ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของการให้บริการในการใช้งาน VoIP และหาปริมาณการใช้งาน VoIP ที่มากที่สุดภายใต้สภาพแวดล้อมเขตที่โล่ง เขตกึ่งชุมชน และเขตชุมชน โดยคุณภาพการให้บริการอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (ค่า MOS ไม่ต่ำกว่า 3.50) งานวิจัยนี้จำลองการใช้งาน VoIP ประเภทเดี่ยวและ VoIP ร่วมกับข้อมูลประเภท FTP ที่ 20 และ 40 เเปอร์เซ็นต์ของขนาดช่องสัญญาณ 11 Mbps ใช้มาตรฐาน CODEC G.729 ที่ระยะห่างระหว่างจุดเข้าถึง (APs) 100 และ 200 เมตร กำลังส่ง 100 มิลลิวัตต์ โปรแกรม OMNET++ และแบบจำลองนาคามีในคอมพิวเตอร์โมเดล ของความจระบบการใช้งาน VoIP บนโครงข่ายไร้สายแบบเมฆประเภทกริดเมตริกซ์ 6\*6 แบบ multi-hop ดังรูปที่ 3.1 เพื่อให้ผู้ให้บริการสามารถประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนโครงข่ายไร้สายแบบเมฆ ก่อนการติดตั้งเพื่อใช้งานจริง



รูปที่ 3.1 WMNs ประเภท Grid metrics 6 \* 6

### 3.4.3 รูปแบบการวิจัย

ในรูปแบบการทำงานของวิจัยนั้นผู้วิจัยทำการจำลองการใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตในโครงข่ายไร้สายแบบเมฆที่เป็น Grid metric แบบ 6 \* 6 โดยกำหนดรูปแบบดังนี้

- 1) ระยะห่างระหว่าง AP 2 ระยะทางคือที่ระยะห่าง 100 และ 200 เมตร

2) แบ่งเป็นการส่งแบบ VoIP ประเภทเดียว และการส่ง VoIP ร่วมกับ Background data traffic ประเภท FTP (File Transfer Protocol) 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์ของขนาดช่องสัญญาณ 11 Mbps.

3) เพิ่มจำนวนปริมาณการใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ต ทั้งในกรณีที่เป็นแบบ hop เดียว และแบบ multi-hop จนกระทั่งค่าของ MOS ต่ำกว่า 3.50

4) ใช้ค่า pathloss exponent (Alpha)<sup>1</sup> เป็นตัวที่กำหนดสภาพแวดล้อมคือกำหนดแบบ outdoor free space หรือ rural area ใช้ค่า Alpha = 2, แบบ sub-urban area ใช้ค่า Alpha = 2.4 ตามลำดับ เพราะในปัจจุบันมีพื้นที่ที่เป็นเขตกึ่งชุมชน, แบบ urban area ใช้ค่า Alpha = 2.8 แล้วจึงนำมาผลการทดลองมาวิเคราะห์ผลที่ได้ในบทต่อไป

5) ใช้ Voice encoder คือ G.729 ที่ซึ่งมีอัตราการส่ง 50 แพ็คเก็ตต่อ 1 วินาที และแต่ละแพ็คเก็ตมีขนาด 20 Bytes โดยใช้ UDP traffic ที่เป็นแบบ Constant bit rate (CBR) ที่มีแต่จังหวะ On ตลอดเวลาและมีอัตราการส่งข้อมูลเท่ากับ 8 kbps หรือถ้ารวม overhead ทุกอย่างจะได้ Voice Payload Size 20 bytes + Layer2 Overhead 18 bytes Layer2 Overhead including CRC + IP Header Overhead 20 bytes + UDP Header Overhead 8 bytes + RTP Header Overhead 12 bytes = Total Packet Size 78 bytes แปลงเป็นบิตต่อวินาทีจะเท่ากับ  $78 * 8 * 50 = 31.2$  Kbps โดยที่ค่า R-Factor ที่ยอมรับได้ต้องไม่ต่ำกว่า 70 หรือค่า E-model ที่ยอมรับได้ต้องไม่ต่ำกว่า  $3.50^2$

6) ขนาดความจุของบัพเฟอร์ของ Linksys WRT54G series<sup>3</sup> มีขนาดของหน่วยความจำเท่ากับ 8 MB. และสามารถคำนวณได้ดังนี้ค่า Maximum transfer unit (MTU) เท่ากับ 1500 Bytes จะได้ขนาดความจุของบัพเฟอร์ที่มีหน่วยความจำเท่ากับ 8 MB. (8MB/1500B) เท่ากับ 5333 แพ็คเก็ต ในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้บัพเฟอร์เป็นแบบ First In First Out (FIFO) และกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบ ดังตารางที่ 3.2

<sup>1</sup> E.M. van Eenennaam, (2008, June). **A Survey of Propagation Models used in Vehicular Ad hoc Network (VANET) Research.** Computer Science. Netherlands: University of Twente.

<sup>2</sup> ITU-T. (2001). ITU-T Recommendation G.113: Transmission impairments due to speech processing. Retrieved March 2011, from <http://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?id=9273>.

<sup>3</sup> Wikipedia. (2012, January). Linksys WRT54G series. Retrieved May 2011, from <http://en.wikipedia.org/wiki/WRT54G>.



ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ของระบบ

เวอร์ชันของ OMNET++	4.1
เวลาในการจำลองระบบ	60 วินาที
พื้นที่ในการจำลองระบบ (แบบไม่มีการเคลื่อนที่ของเครื่องลูกข่าย)	600*600 เมตร และ 1200*1200 เมตร
โพรโทคอลค้นหาเส้นทาง	AODV
กำลังส่ง	100 มิลลิวัตต์
ระยะห่างระหว่างโหนด	100 เมตร และ 200 เมตร
มาตรฐาน IEEE 802.11b	11 Mbps.
ความถี่คลื่นวิทยุ	2.4 GHz.
ขนาดความจุของบัฟเฟอร์	5333 แพ็คเก็ต
Propagation model	Nakagami model
Environment	Alpha = 2 คือ Free space area Alpha = 2.4 คือ Sub-Urban area Alpha = 2.8 คือ Urban area
รูปแบบการส่งข้อมูล	UDP 20 Bytes และ TCP 1500 Bytes

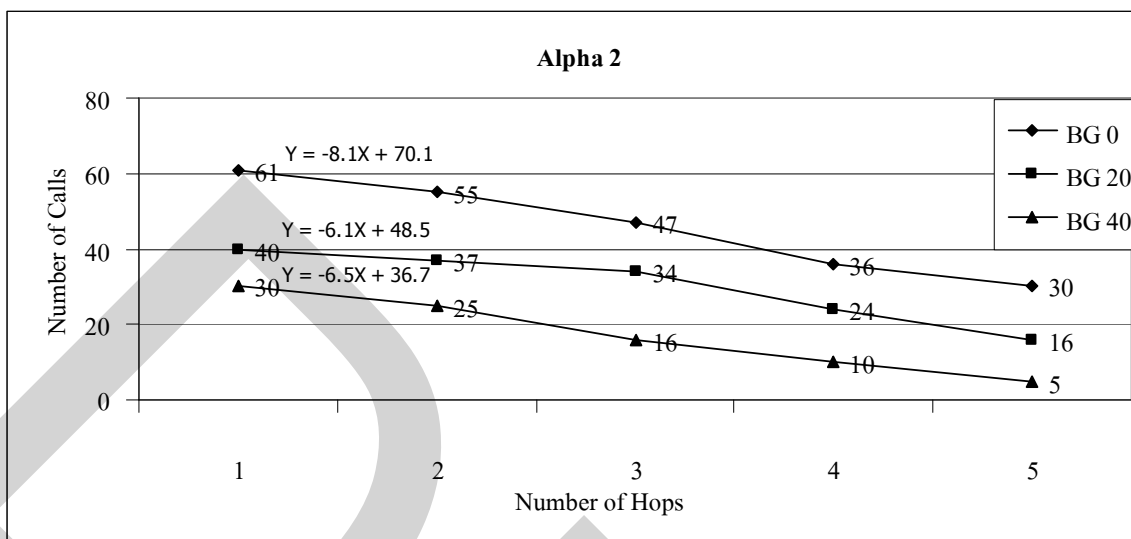
## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

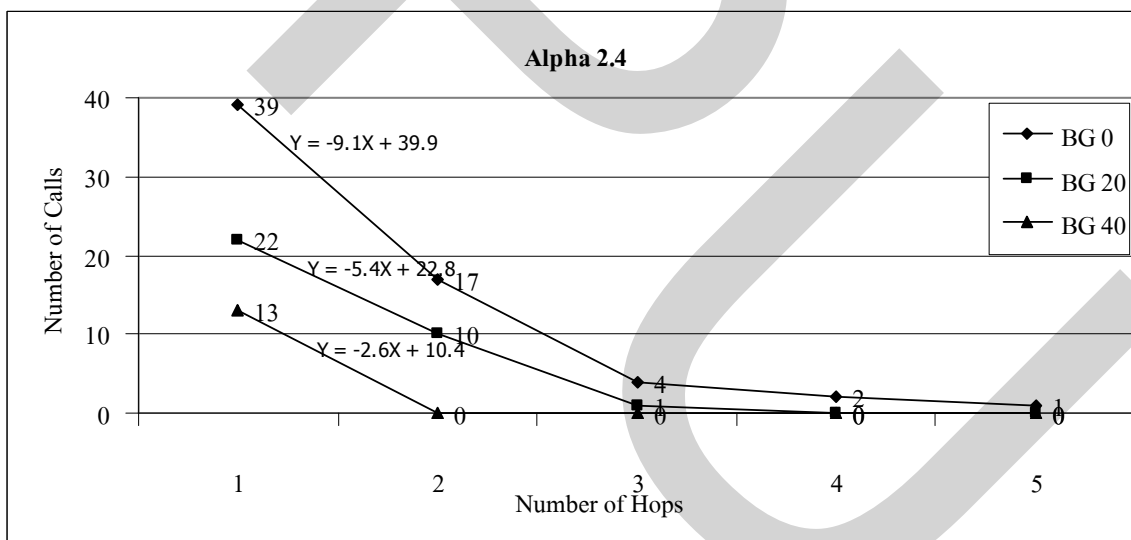
เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงผลการศึกษาวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย

#### 4.1 ผลการวิจัย

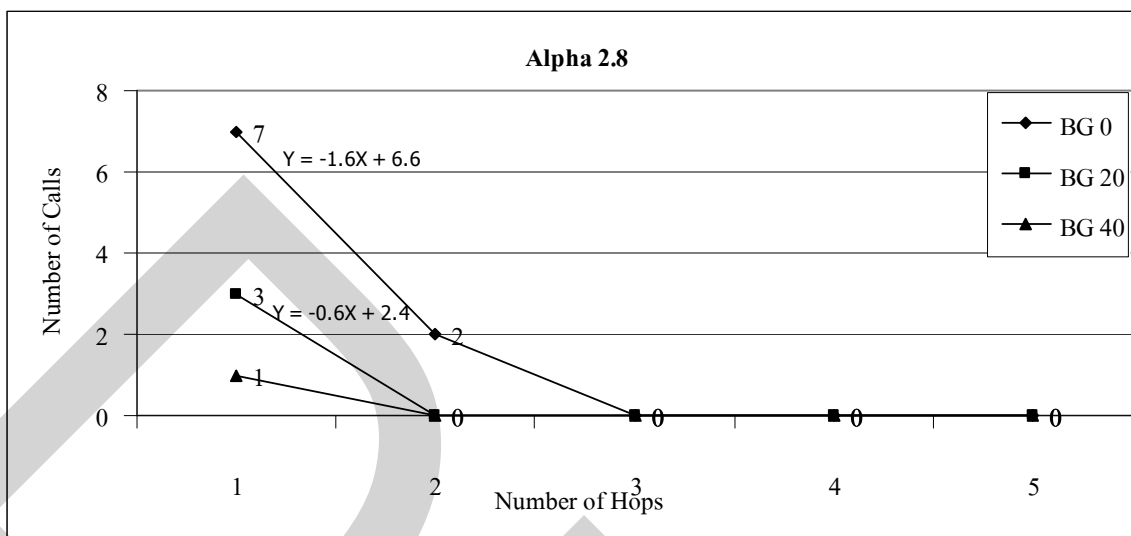
โดยผู้วิจัยทำการจำลองการใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ตในโครงข่ายไร้สายแบบเมชที่เป็น Grid metric แบบ  $6 * 6$  แบบ multi-hop โดยมีระยะห่างระหว่าง AP 2 ระยะทางคือที่ระยะห่าง 100 และ 200 เมตร และแบ่งเป็นการส่งแบบ VoIP ประเภทเดี่ยว และการส่ง VoIP ร่วมกับ Background data traffic ประเภท FTP (File Transfer Protocol) 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์ของขนาดช่องสัญญาณ 11 Mbps. โดยมีการเพิ่มจำนวนปริมาณการใช้งานโทรศัพท์ผ่านอินเทอร์เน็ต ทั้งในกรณีที่เป็นแบบ hop เดี่ยว และแบบ multi-hop โดยคุณภาพการให้บริการอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (ค่า MOS ไม่ต่ำกว่า 3.50) ที่สภาพแวดล้อมแบบ rural area ใช้ค่า Alpha = 2, แบบ sub-urban area ใช้ค่า Alpha = 2.4, แบบ urban area ใช้ค่า Alpha = 2.8 โดยผลจากการจำลองระบบโดยใช้ค่าค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 3.2 ของระบบนั้นจะแบ่งออกเป็นผลการศึกษาวิจัยและการอภิปรายผลการวิจัย ในส่วนของผลการศึกษาวิจัยได้ผลการจำลองระบบดังรูปที่ 4.1 - 4.5



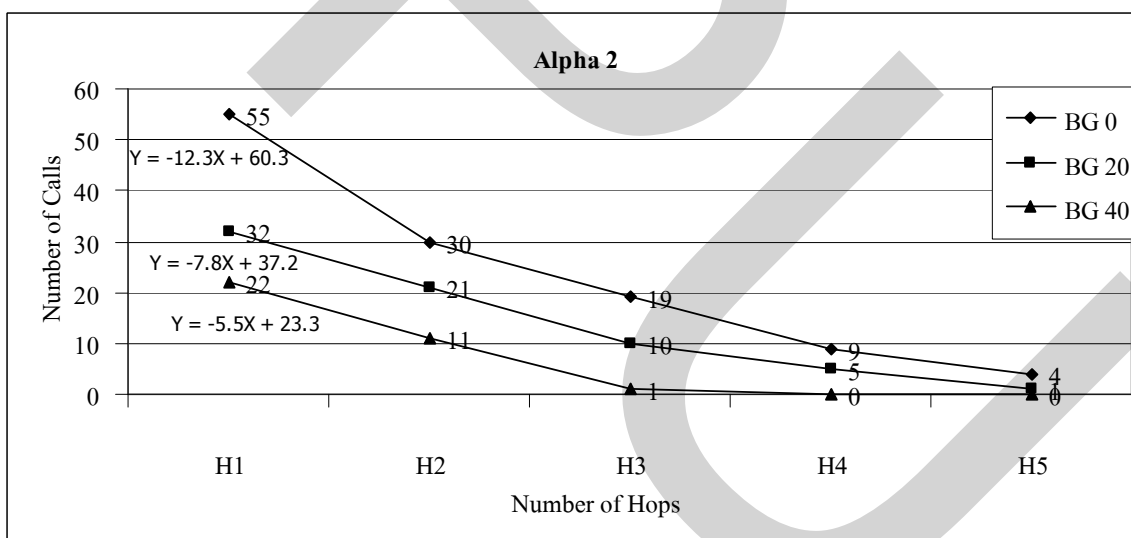
รูปที่ 4.1 จำนวนสายที่มากที่สุดของ VoIP ในแต่ละ hop ของสภาพแวดล้อม Alpha = 2 จนค่าของ MOS ต่ำกว่า 3.5 ที่ระยะห่าง 100 เมตรระหว่าง AP



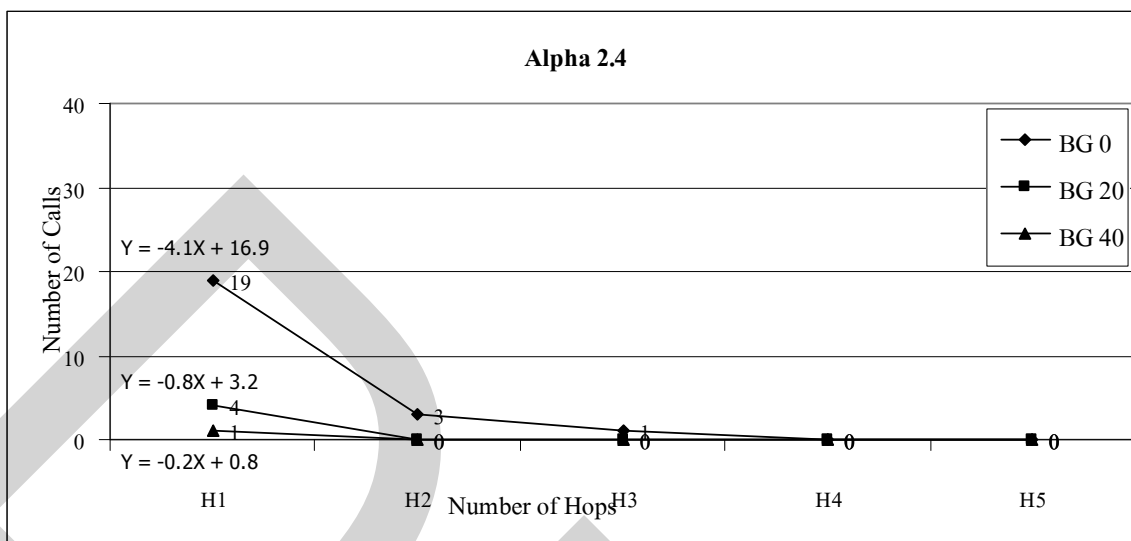
รูปที่ 4.2 จำนวนสายที่มากที่สุดของ VoIP ในแต่ละ hop ของสภาพแวดล้อม Alpha = 2.4 จนค่าของ MOS ต่ำกว่า 3.5 ที่ระยะห่าง 100 เมตรระหว่าง AP



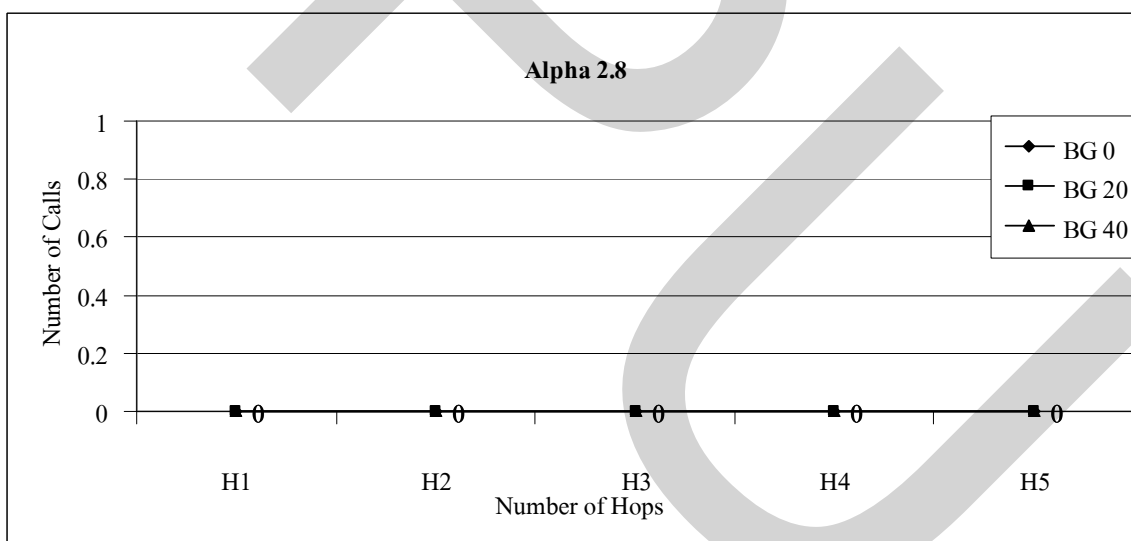
รูปที่ 4.3 จำนวนสายที่มากที่สุดของ VoIP ในแต่ละ hop ของสภาพแวดล้อม Alpha = 2.8 จนค่าของ MOS ต่ำกว่า 3.5 ที่ระยะห่าง 100 เมตรระหว่าง AP



รูปที่ 4.4 จำนวนสายที่มากที่สุดของ VoIP ในแต่ละ hop ของสภาพแวดล้อม Alpha = 2 จนค่าของ MOS ต่ำกว่า 3.5 ที่ระยะห่าง 200 เมตรระหว่าง AP



รูปที่ 4.5 จำนวนสายที่มากที่สุดของ VoIP ในแต่ละ hop ของสภาพแวดล้อม Alpha = 2.4 จนค่าของ MOS ต่ำกว่า 3.5 ที่ระยะห่าง 200 เมตรระหว่าง AP



รูปที่ 4.6 จำนวนสายที่มากที่สุดของ VoIP ในแต่ละ hop ของสภาพแวดล้อม Alpha = 2.8 จนค่าของ MOS ต่ำกว่า 3.5 ที่ระยะห่าง 200 เมตรระหว่าง AP

ผลการศึกษาวิจัยที่ได้จากการนำค่าพารามิเตอร์ของระบบจากตารางที่ 3.2 มาทำการจำลองระบบนั้น ผู้วิจัยจะอธิบายผลการทดลองแบ่งเป็น 2 กรณีคือ

4.1.1 ที่ระยะห่างระหว่าง AP ที่ 100 เมตร โดยจากรูปที่ 4.1 - 4.3 และตารางที่ 4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

1) เขตที่โล่ง

- VoIP ประเภทเดียว เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่ใช้งาน VoIP จะลดลงเฉลี่ยเป็นแบบเชิงเส้น hop ละ 8 สาย โดยสามารถใช้งานได้ 5 hop โดยที่ hop ที่ 5 นั้นสามารถใช้งานได้ 30 สาย

- VoIP+BG 20% เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่ใช้งาน VoIP จะลดลงเฉลี่ยเป็นแบบเชิงเส้น hop ละ 6 สาย โดยสามารถใช้งานได้ 5 hop โดยที่ hop ที่ 5 นั้นสามารถใช้งานได้ 16 สาย

- VoIP+BG 40% เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่ใช้งาน VoIP จะลดลงเฉลี่ยเป็นแบบเชิงเส้น hop ละ 4 สาย โดยสามารถใช้งานได้ 5 hop โดยที่ hop ที่ 5 นั้นสามารถใช้งานได้ 5 สาย

2) เขตที่กึ่งชุมชน

- VoIP ประเภทเดียว เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่ใช้งาน VoIP จะลดลงเฉลี่ยเป็นแบบเชิงเส้น hop ละ 14 สาย โดยสามารถใช้งานได้ 3 hop โดยที่ hop ที่ 3 นั้นสามารถใช้งานได้ 4 สาย

- VoIP+BG 20% เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่ใช้งาน VoIP จะลดลงเฉลี่ยเป็นแบบเชิงเส้น hop ละ 10 สาย โดยสามารถใช้งานได้ 2 hop โดยที่ hop ที่ 2 นั้นสามารถใช้งานได้ 10 สาย

- VoIP+BG 40% เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่ใช้งาน VoIP โดยสามารถใช้งานได้ 1 hop และสามารถใช้งานได้ 13 สาย

3) เขตที่ชุมชน

- VoIP ประเภทเดียว เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่ใช้งาน VoIP จะลดลงเป็นแบบเชิงเส้น hop ละ 5 สาย โดยสามารถใช้งานได้ 2 hop โดยที่ hop ที่ 2 นั้นสามารถใช้งานได้ 2 สาย

- VoIP+BG 20% เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่ใช้งาน VoIP โดยสามารถใช้งานได้ 1 hop และสามารถใช้งานได้ 3 สาย

- VoIP+BG 40% เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่ใช้งาน VoIP โดยสามารถใช้งาน  
ได้ 1 hop และสามารถใช้งานได้ 1 สาย

ที่ระยะห่าง 100 เมตร ระหว่าง AP นั้นเมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่มากที่สุดในการรองรับการใช้งาน VoIP ประเภทเดียวและ VoIP + Background data traffic (BG) ที่เป็น FTP 20 และ 40 เปอร์เซ็นต์ของขนาดช่องสัญญาณจะลดลงในแต่ละกรณีเป็นแบบเชิงเส้น (linear) โดยแต่ละสภาพแวดล้อม (alpha) จาก 2 เป็น 2.4 และ 2.8 นั้นจำนวนสายที่มากที่สุดในการรองรับการใช้งาน VoIP จะลดลงไปที่ละประมาณครึ่งหนึ่งของสภาพแวดล้อมก่อนหน้า

4.1.2 ที่ระยะห่างระหว่าง AP ที่ 200 เมตร โดยจากรูปที่ 4.4 - 4.6 และตารางที่ 4.5 วิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

#### 1) เขตที่โล่ง

- VoIP ประเภทเดียว เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่ใช้งาน VoIP จะลดลงเฉลี่ยเป็นแบบเชิงเส้น hop ละ 10 สาย โดยสามารถใช้งานได้ 5 hop โดยที่ hop ที่ 5 นั้นสามารถใช้งานได้ 4 สาย

- VoIP+BG 20% เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่ใช้งาน VoIP จะลดลงเฉลี่ยเป็นแบบเชิงเส้น hop ละ 10 สาย โดยสามารถใช้งานได้ 4 hop โดยที่ hop ที่ 4 นั้นสามารถใช้งานได้ 5 สาย

- VoIP+BG 40% เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่ใช้งาน VoIP จะลดลงเฉลี่ยเป็นแบบเชิงเส้น hop ละ 10 สาย โดยสามารถใช้งานได้ 2 hop โดยที่ hop ที่ 2 นั้นสามารถใช้งานได้ 11 สาย

#### 2) เขตที่กึ่งชุมชน

- VoIP ประเภทเดียว เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่ใช้งาน VoIP จะลดลงเฉลี่ยเป็นแบบเชิงเส้น hop ละ 15 สาย โดยสามารถใช้งานได้ 2 hop โดยที่ hop ที่ 2 นั้นสามารถใช้งานได้ 3 สาย

- VoIP+BG 20% เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่ใช้งาน VoIP โดยสามารถใช้งานได้ 1 hop และสามารถใช้งานได้ 4 สาย

- VoIP+BG 40% เมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่ใช้งาน VoIP โดยสามารถใช้งานได้ 1 hop และสามารถใช้งานได้ 1 สาย

#### 3) เขตที่ชุมชน

- ไม่สามารถใช้งาน VoIP ได้ทั้งในกรณีที่มีและไม่มี Background traffic

ที่ระยะห่าง 200 เมตร ระหว่าง AP นั้นเมื่อจำนวน hop เพิ่มขึ้นจำนวนสายที่มากที่สุดในการรองรับการใช้งาน VoIP ประเภทเดียวและ VoIP + Background data traffic (BG) ที่เป็น FTP 20 และ 40 เปรอร์เซ็นต์ของขนาดช่องสัญญาณจะลดลงในแต่ละกรณีโดยเป็นแบบเชิงเส้น (linear) ที่สภาพแวดล้อม (alpha) เท่ากับ 2 ส่วนในสภาพแวดล้อม (alpha) เท่ากับ 2.4 สามารถใช้งานในกรณีที่ไม่มี Background data traffic ได้เพียง hop เดียว ในสภาพแวดล้อม (alpha) เท่ากับ 2.8 ไม่สามารถใช้งานได้ทั้งแบบ VoIP ประเภทเดียวและมี Background data traffic

โดยสรุปจากผลการวิจัยนั้นพบว่าระยะทางเพิ่มจาก 100 เมตร เป็น 200 เมตร จากรูปที่ 4.1-4.6 นั้นพบว่าการที่ระยะทางเพิ่มขึ้นทำให้จำนวน hop ที่รองรับจำนวนสายการใช้งาน VoIP ลดลงและจำนวนสายที่ใช้งาน VoIP ลดลงตามจำนวน hop ที่ลดลงในแต่ละสภาพแวดล้อมเช่นกัน

#### 4.2 อภิปรายผลการวิจัย

การอภิปรายผลการทดลองที่ได้จากการจำลองระบบสามารถแยกได้เป็น 2 กรณีคือ 1. ที่ระยะห่างระหว่าง AP ที่ 100 เมตร และ 2. ที่ระยะห่างระหว่าง AP ที่ 200 เมตร ที่สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันและตามจำนวน hop โดยหลักเกณฑ์การพิจารณาคือค่าความแตกต่างที่เพิ่มขึ้นหาค่าได้จาก

$\Delta L$  = ค่าความแตกต่างระหว่าง loss rate หาค่าได้จาก  $A$  = ค่า loss ของจำนวนสายของ VoIP ที่ยังคงสามารถใช้งานได้สูงสุดท้ายก่อนที่ทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 และ  $B$  = ค่า loss ของจำนวนสายของ VoIP ที่ไม่สามารถใช้งานได้จุดแรกที่ทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 จากนั้นนำ  $A$  และ  $B$  มาเข้าสมการ  $\frac{(B - A) \times 100}{B}$  จะได้ค่า  $\Delta L$

$\Delta D$  = ค่าความแตกต่างระหว่าง End to End Delay หาค่าได้จาก  $A$  = ค่า End to End Delay ของจำนวนสายของ VoIP ที่ยังคงสามารถใช้งานได้สูงสุดท้ายก่อนที่ทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 และ  $B$  = ค่า End to End Delay ของจำนวนสายของ VoIP ที่ไม่สามารถใช้งานได้จุดแรกที่ทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 จากนั้นนำ  $A$  และ  $B$  มาเข้าสมการ  $\frac{(B - A) \times 100}{B}$  จะได้ค่า  $\Delta D$

จากนั้นนำค่าความแตกต่างของ  $\Delta L$  และ  $\Delta D$  มาเปรียบเทียบกันว่าปัจจัยใดมีค่าความแตกต่างที่มากกว่ากัน ปัจจัยนั้นจะเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 ซึ่งทำให้คุณภาพของ VoIP ต่ำกว่ามาตรฐาน



ตารางที่ 4.1 แสดงค่า Loss และ End to end delay ที่มีผลทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 ในแต่ละ hop ที่ระยะห่าง 100 เมตรระหว่าง AP

		$\Delta L$					$\Delta D$					Difference				
BG		Alpha = 2					Alpha = 2					Alpha = 2				
		H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4	H5
	0	340.63	595.51	492.28	159.07	229.99	235.54	218.84	578.24	229.35	284.09	105.08	376.67	-85.96	-70.28	-54.11
	20	163.74	55.38	43.96	12.48	6.87	48.28	44.12	90.23	26.93	15.77	115.46	11.25	-46.27	-14.45	-8.9
40	173.78	120.89	1.36	31.82	15.6	46.51	55.76	22.84	71.44	37.69	127.27	65.13	-21.48	-39.62	-22.08	
BG		Alpha = 2.4					Alpha = 2.4					Alpha = 2.4				
		H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4	H5
	0	226.09	377.43	121.37	353.33	144.12	83.01	299.83	236.81	466.7	263.28	143.09	77.6	-115.4	-113.4	-119.2
	20	465.19	118.18	214.08	-	-	199.64	107.95	274.95	-	-	265.55	10.23	-60.86	-	-
40	34.94	-	-	-	-	12.68	-	-	-	-	22.26	-	-	-	-	

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า Loss และ End to end delay ที่มีผลทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 ในแต่ละ hop ที่ระยะห่าง 100 เมตรระหว่าง AP (ต่อ)

BG	$\Delta L$					$\Delta D$					Difference				
	Alpha = 2.8					Alpha = 2.8					Alpha = 2.8				
	H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4	H5
0	18.27	399.05	-	-	-	9.65	363.72	-	-	-	8.61	35.33	-	-	-
20	174.62	-	-	-	-	5.34	-	-	-	-	169.28	-	-	-	-
40	42.16	-	-	-	-	30.11	-	-	-	-	12.05	-	-	-	-
* "-" หมายถึง ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 จึงไม่นำมาพิจารณา															

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าปัจจัยหลักที่มีผลทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 ในแต่ละ hop ที่ระยะห่าง 100 เมตร ระหว่าง AP

BG	Alpha = 2				
	Hop 1	Hop 2	Hop 3	Hop 4	Hop 5
0	Loss	Loss	Delay	Delay	Delay
20	Loss	Loss	Delay	Delay	Delay
40	Loss	Loss	Delay	Delay	Delay
BG	Alpha = 2.4				
	Hop 1	Hop 2	Hop 3	Hop 4	Hop 5
0	Loss	Loss	Delay	Delay	Delay
20	Loss	Loss	Delay	-	-
40	Loss	-	-	-	-
BG	Alpha = 2.8				
	Hop 1	Hop 2	Hop 3	Hop 4	Hop 5
0	Loss	Loss	-	-	-
20	Loss	-	-	-	-
40	Loss	-	-	-	-
* " - " หมายถึง ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 จึงไม่นำมาพิจารณา					

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า Loss และ End to end delay ที่มีผลทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 ในแต่ละ hop ที่ระยะห่าง 200 เมตรระหว่าง AP

BG	$\Delta L$					$\Delta D$					Difference				
	Alpha = 2					Alpha = 2					Alpha = 2				
	H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4	H5
0	837.62	112.57	146.37	180.65	1318.98	127.19	63.86	181.49	228.68	1968.25	710.44	48.72	-35.12	-48.02	-649.26
20	81.67	7.87	20.29	5.07	3.47	32.97	4.92	50.06	15.08	33.16	48.70	2.95	-29.77	-10.01	-29.69
40	42.01	189.51	0.91	-	-	12.04	4.15	12.57	-	-	29.97	185.36	-11.66	-	-
BG	Alpha = 2.4					Alpha = 2.4					Alpha = 2.4				
	H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4	H5
	0	951.27	1060.00	210.71	-	-	159.60	172.86	265.53	-	-	791.67	887.14	-54.81	-
20	296.90	-	-	-	-	133.86	-	-	-	-	163.04	-	-	-	-
40	32.98	-	-	-	-	17.09	-	-	-	-	15.89	-	-	-	-
* "-" หมายถึง ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 จึงไม่นำมาพิจารณา															

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า Loss และ End to end delay ที่มีผลทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 ในแต่ละ hop ที่ระยะห่าง 200 เมตรระหว่าง AP (ต่อ)

BG	$\Delta L$					$\Delta D$					Difference				
	Alpha = 2.8					Alpha = 2.8					Alpha = 2.8				
	H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4	H5
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
* "-" หมายถึง ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 จึงไม่นำมาพิจารณา															

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าปัจจัยหลักที่มีผลทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 ในแต่ละ hop ที่ระยะห่าง 200 เมตร ระหว่าง AP

BG	Alpha = 2				
	Hop 1	Hop 2	Hop 3	Hop 4	Hop 5
0	Loss	Loss	Delay	Delay	Delay
20	Loss	Loss	Delay	Delay	Delay
40	Loss	Loss	Delay	-	-
BG	Alpha = 2.4				
	Hop 1	Hop 2	Hop 3	Hop 4	Hop 5
0	Loss	Loss	Delay	-	-
20	Loss	-	-	-	-
40	Loss	-	-	-	-
BG	Alpha = 2.8				
	Hop 1	Hop 2	Hop 3	Hop 4	Hop 5
0	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-
40	-	-	-	-	-
* " - " หมายถึง ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 จึงไม่นำมาพิจารณา					

ตารางที่ 4.5 แสดงจำนวนสายที่มากที่สุดของ VoIP ในแต่ละ hop ของแต่ละสภาพแวดล้อม Alpha  
 จนค่าของ MOS ต่ำกว่า 3.5 ที่ระยะห่าง 100 เมตร และ 200 เมตรระหว่าง AP

BG	ระยะห่างระหว่าง AP = 100 เมตร					ระยะห่างระหว่าง AP = 200 เมตร				
	Alpha = 2					Alpha = 2				
	H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4	H5
0	61	55	47	36	30	55	30	19	9	4
20	40	37	34	24	16	32	21	10	5	1
40	30	25	16	10	5	22	11	1	0	0
BG	Alpha = 2.4					Alpha = 2.4				
	H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4	H5
	0	39	17	4	2	1	19	3	1	0
20	22	10	1	0	0	4	0	0	0	0
40	13	0	0	0	0	1	0	0	0	0
BG	Alpha = 2.8					Alpha = 2.8				
	H1	H2	H3	H4	H5	H1	H2	H3	H4	H5
	0	7	2	0	0	0	0	0	0	0
20	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
* "0" หมายถึง ค่า MOS ต่ำกว่า 3.5 จึงไม่นำมาพิจารณา										

จากการอภิปรายผลการทดลองพบว่าปัจจัยที่เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.50 แบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

#### 4.2.1 ที่ระยะห่างระหว่าง AP ที่ 100 เมตรคือ จากตารางที่ 4.1 - 4.2

##### 1) เขตที่โล่ง

###### VoIP ประเภทเดียว

- hop ที่ 1 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 105.08%
- hop ที่ 2 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 376.67%
- hop ที่ 3 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 85.96%
- hop ที่ 4 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 70.28%
- hop ที่ 5 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 54.11%

###### VoIP + BG 20%

- hop ที่ 1 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 115.46%
- hop ที่ 2 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 11.25%
- hop ที่ 3 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 46.27%
- hop ที่ 4 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 14.45%
- hop ที่ 5 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 8.90%

###### VoIP + BG 40%

- hop ที่ 1 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 127.27%
- hop ที่ 2 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 65.13%
- hop ที่ 3 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 21.48%
- hop ที่ 4 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 39.62%
- hop ที่ 5 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 22.08%

##### 2) เขตที่กึ่งชุมชน

###### VoIP ประเภทเดียว

- hop ที่ 1 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 143.09%
- hop ที่ 2 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 77.60%
- hop ที่ 3 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 115.44%
- hop ที่ 4 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 113.36%
- hop ที่ 5 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 119.16%



VoIP + BG 20%

- hop ที่ 1 มีค่า Loss มากกว่า delay = 265.55%

- hop ที่ 2 มีค่า Loss มากกว่า delay = 10.23%

- hop ที่ 3 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 60.86%

VoIP + BG 40%

- hop ที่ 1 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 22.26%

3) เขตที่ชุมชน

VoIP ประเภทเดียว

- hop ที่ 1 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 8.61%

- hop ที่ 2 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 35.33%

- VoIP + BG 20%

- hop ที่ 1 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 169.28%

VoIP + BG 40%

- hop ที่ 1 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 12.05%

ที่ระยะห่างระหว่าง AP ที่ 100 เมตรมีปัจจัยหลัก 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 คือที่ 1 และ 2 hop จะมี loss rate เป็นปัจจัยหลัก กรณีที่ 2 คือที่ 3, 4 และ 5 hop จะมี end to end delay เป็นปัจจัยหลักที่ทำให้ MOS ต่ำกว่า 3.50

4.2.2 ที่ระยะห่างระหว่าง AP ที่ 200 เมตรคือ จากตารางที่ 4.3-4.4

1) เขตที่โล่ง

VoIP ประเภทเดียว

- hop ที่ 1 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 710.44%

- hop ที่ 2 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 48.72%

- hop ที่ 3 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 35.12%

- hop ที่ 4 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 48.02%

- hop ที่ 5 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 649.26%

## VoIP + BG 20%

- hop ที่ 1 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 48.70%
- hop ที่ 2 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 2.95%
- hop ที่ 3 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 29.77%
- hop ที่ 4 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 10.01%
- hop ที่ 5 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 29.69%

## VoIP + BG 40%

- hop ที่ 1 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 29.97%
- hop ที่ 2 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 185.36%
- hop ที่ 3 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 11.66%

## 2) เขตที่กึ่งชุมชน

## VoIP ประเภทเดียว

- hop ที่ 1 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 791.67%
- hop ที่ 2 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 887.14%
- hop ที่ 3 มีค่า Loss น้อยกว่า Delay = 54.81%

## VoIP + BG 20%

- hop ที่ 1 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 163.04%

## VoIP + BG 40%

- hop ที่ 1 มีค่า Loss มากกว่า Delay = 15.89%

## 3) เขตที่ชุมชน

- ไม่สามารถใช้งาน VoIP ได้ทั้งในกรณีที่มีและไม่มี Background traffic

ที่ระยะห่างระหว่าง AP ที่ 200 เมตรมีปัจจัยหลัก 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 คือที่ 1 และ 2 hop จะมี loss rate เป็นปัจจัยหลัก กรณีที่ 2 คือที่ 3, 4 และ 5 hop จะมี end to end delay เป็นปัจจัยหลัก

โดยสรุปจากผลการวิจัยนั้นพบว่าระยะทางเพิ่มจาก 100 เมตร เป็น 200 เมตร จากตารางที่ 4.1-4.5 นั้นระยะทางกับสภาพแวดล้อมแปรผันตรงตามกันและเป็นปัจจัยที่มีผลทำให้จำนวนสายที่ใช้งาน VoIP ได้มากที่สุดจะลดลงไปตามสภาพแวดล้อมและ Background data traffic ที่เพิ่มขึ้น โดยทั้งสองอย่างนี้แปรผันตรงกัน และมีปัจจัยหลัก 2 กรณีที่ทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.50 กรณีที่ 1 คือที่ 1 hop และ 2 hop จะมี loss rate เป็นปัจจัยหลัก กรณีที่ 2 คือที่ 3, 4 และ 5 hop จะมี end to end delay เป็นปัจจัยหลัก

จากการอภิปรายข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าโครงข่าย WMNs เหมาะสมที่จะใช้งาน VoIP ในสภาพแวดล้อมที่มีลักษณะเป็นที่โล่งหรือ free space outdoor หรือ  $\alpha=2$  ที่ระยะห่างระหว่าง AP ที่ 100 เมตร ซึ่งจะสามารถรองรับปริมาณการใช้งาน VoIP พร้อมกันได้ถึง 5 hop โดยที่ hop ที่ 5 จะมีการใช้งานดังนี้ pure voip = 30 สาย, VoIP+BG 20% = 16 สาย, VoIP+BG 40% = 5 สาย โดยเมื่อมีความหนาแน่นของสิ่งกีดขวางในสภาพแวดล้อมเพิ่มขึ้น ปริมาณการใช้งาน VoIP ที่ระบบสามารถรองรับได้จะมีค่าต่ำลงแบบมีนัยสำคัญ นั่นคือสำหรับโครงข่าย WMNs ที่มีการติดตั้งในเขตชุมชนนั้น ผู้ให้บริการ VoIP อาจจะต้องลดระยะทางลงจาก 100 เมตรถ้าต้องการที่รองรับปริมาณการใช้งาน VoIP เพิ่มมาก

## บทที่ 5

### บทสรุป และข้อเสนอแนะ

ในบทนี้จะเป็นการอภิปรายเพื่อสรุปผลที่ได้จากการทดสอบงานวิจัย รวมทั้งข้อจำกัดของระบบที่พบจากการจำลองโครงข่ายของระบบ และข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางในการพัฒนางานวิจัยต่อไปเพื่อแก้ข้อบกพร่องของระบบให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้จำลองการใช้งาน VoIP ใน WMNs โดยมีการหาปริมาณการใช้งาน VoIP ทั้งแบบที่มีและไม่มี Background traffic ในสภาพแวดล้อมแบบ rural, sub-urban และ urban area โดย VoIP ที่ระบบรองรับได้จะพิจารณาในกรณีที่มีค่า MOS ไม่ต่ำกว่า 3.50 เพื่อเป็นข้อมูลให้กับผู้ให้บริการโครงข่ายไร้สายแบบเมฆประเภทกริดแบบ multi-hop พิจารณาในการออกแบบระบบก่อนที่จะใช้งานจริงจากการจำลองระบบพบดังนี้

##### 5.1.1 ระยะห่างระหว่าง AP ที่ 100 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงสรุปผลการวิจัยที่ระยะห่างระหว่าง AP ที่ 100 เมตร

สภาพแวดล้อม	สรุปผลงานวิจัย
เขตที่โล่ง	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP ประเภทเดี่ยวและในกรณีที่มี data background traffic 20% สามารถใช้งานได้ถึง 5 hop ส่วนที่ data background traffic 40 % สามารถใช้งานได้ถึง 4 hop
เขตที่กึ่งชุมชน	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP ประเภทเดี่ยวสามารถใช้งานได้ถึง 3 hop
	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP และ data background traffic 20% สามารถใช้งานได้ถึง 2 hop
	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP และ data background traffic 40% สามารถใช้งานได้ถึง 1 hop

ตารางที่ 5.1 แสดงสรุปผลการวิจัยที่ระยะห่างระหว่าง AP ที่ 100 เมตร (ต่อ)

สภาพแวดล้อม	สรุปผลงานวิจัย
เขตที่ชุมชน	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP ประเภทเดียวสามารถใช้งานได้ถึง 1 hop ในกรณีที่ไม่มี data background traffic
	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP และ data background traffic 20% และ 40% แทบจะไม่สามารถใช้งาน VoIP ได้เลย

### 5.1.2 ระยะห่างระหว่าง AP ที่ 200 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 แสดงสรุปผลการวิจัยที่ระยะห่างระหว่าง AP ที่ 200 เมตร

สภาพแวดล้อม	สรุปผลงานวิจัย
เขตที่โล่ง	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP ประเภทเดียว สามารถใช้งานได้ถึง 5 hop
	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP และ data background traffic 20% สามารถใช้งานได้ 4 hop
	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP และ data background traffic 40% สามารถใช้งานได้ 2 hop
เขตที่กึ่งชุมชน	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP ประเภทเดียว สามารถใช้งานได้ถึง 2 hop
	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP และ data background traffic 20% สามารถใช้งานได้ 1 hop
เขตที่ชุมชน	- ไม่สามารถใช้งาน VoIP ได้ทั้งในกรณีที่มีและไม่มี data background traffic

ดังนั้นสรุปผลการวิจัยที่ได้จากการจำลองระบบพบว่าเมื่อระยะห่างระหว่าง AP เพิ่มขึ้น จาก 100 เมตร เป็น 200 เมตร ดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงสรุปผลการวิจัยเมื่อระยะห่างระหว่าง AP เพิ่มขึ้นจาก 100 เมตร เป็น 200 เมตร

สภาพแวดล้อม	สรุปผลงานวิจัย
เขตที่โล่ง	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP ประเภทเดียว คือ 5 hop เท่าเดิมแต่จำนวน call ลดลงไป 6 call
	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP และ data background traffic 20% จากเดิม 5 hop เหลือ 4 hop ลดลงไป 1 hop
	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP และ data background traffic 40% จากเดิม 4 hop เหลือ 2 hop ลดลงไป 2 hop
เขตที่กึ่งชุมชน	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP ประเภทเดียว จากเดิม 3 hop เหลือ 2 hop ลดลงไป 1 hop
	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP และ data background traffic 20% จากเดิม 2 hop เหลือ 1 hop ลดลงไป 1 hop
	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP และ data background traffic 40% จากเดิม 1 hop จนไม่สามารถรองรับการใช้งานได้
เขตที่ชุมชน	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP ประเภทเดียว จากเดิม 1 hop จนไม่สามารถรองรับการใช้งานได้
	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP และ data background traffic 20% ไม่สามารถใช้งาน VoIP ได้
	- ระยะห่างระหว่างผู้ใช้งาน VoIP และ data background traffic 40% ไม่สามารถใช้งาน VoIP ได้

จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลักที่ทำให้ค่า MOS ต่ำกว่า 3.50 ของแต่ละสภาพแวดล้อมในงานวิจัยนี้มี 2 กรณีคือ กรณีที่ 1 คือเมื่อมีการใช้งานโครงข่ายไร้สายจำนวน 1 และ 2 hop จะมีการสูญเสียแพ็กเก็ตข้อมูลเป็นปัจจัยหลัก กรณีที่ 2 คือเมื่อมีการใช้งานโครงข่ายไร้สายจำนวน 3, 4 และ 5 hop จะมีความล่าช้าทางเวลาเป็นปัจจัยหลัก

ผู้วิจัยแนะนำให้ผู้ใช้บริการ โครงข่ายไร้สายที่จะประเมินความคุ้มค่าของการลงทุนใน โครงข่ายไร้สายแบบเมชก่อนการติดตั้งเพื่อใช้งานจริงโดยควรลงทุนระยะห่างระหว่าง AP ที่ 100 เมตร ที่สภาพแวดล้อมที่มีลักษณะเป็นเขตที่โล่งกรณีที่เลวร้ายนั่นคือมี VoIP + Background data traffic 40% สามารถใช้งานได้ถึง 4 hop โดยยังคงมีปริมาณการใช้งาน VoIP ได้จำนวน 10 สาย ส่วน สภาพแวดล้อมที่มีลักษณะแบบกึ่งชุมชนและแบบชุมชนนั้นควรจะมีการลดระยะห่างระหว่าง AP ลงมาจึงจะสามารถเพิ่มจำนวนปริมาณสายในการใช้งาน VoIP และจำนวน Hop ที่เพิ่มขึ้น โดยถึงแม้ สภาพแวดล้อมที่มีลักษณะเป็นที่โล่งจะสามารถใช้งาน VoIP ได้ปริมาณเยอะแต่การใช้งานจริง ๆ แล้วผู้ใช้บริการ โครงข่ายควรจะไปติดตั้งในอาคารที่เป็นที่กว้างและโล่งเช่นศูนย์ประชุมต่าง ๆ หรืองานแสดงการแข่งเช่นงานพืชสวนโลกหรือ BOI Fair เพื่อแบ่งเบาภาระของ Base Station หรือ สถานี แม่ข่ายของผู้ให้บริการ โทรศัพท์มือถือเพื่อลดการเกิด congestion ในกรณีที่มีผู้ใช้งานเป็น จำนวนมาก

สรุปผลตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) สามารถจำลองสถานการณ์การค้นหาเส้นทางในโครงข่ายไร้สายแบบเมชด้วย โพรโทคอลการค้นหาเส้นทางแบบ Adhoc On-demand Distance Vector Routing (AODV) ได้

2) สามารถจำลองการใช้งาน Voice over IP (VoIP) ร่วมกับ background data traffic ผ่านโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภท Grid metric โดยมีการศึกษาผลกระทบของจำนวน Hop ที่มี ผลต่อคุณภาพการให้บริการ VoIP ได้

3) ได้ทำการศึกษาคุณภาพของบริการ VoIP โดยใช้ค่า E-model ในการวัดคุณภาพของ การให้บริการหรือ (QoS)

สรุปผลตามขอบเขตของงานวิจัย ตามขอบเขตของระบบ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) สามารถทำการจำลองระบบที่ศึกษาใช้วิธีการค้นหาเส้นทางแบบ AODV ภายใน โครงข่ายไร้สายแบบเมชได้

2) สามารถทำกราฟฟิคที่จำลองในโครงข่ายที่จะศึกษาจะมีทั้งกรณีที่เป็น VoIP ประเภท เดียว และกรณีที่มีทั้ง VoIP ร่วมกับ background data traffic ซึ่งมีการใช้งานภายในโครงข่ายไร้สาย แบบเมชประเภท Grid metric ได้

3) ได้ทำการศึกษาถึงการวัดค่าคุณภาพการให้บริการของ VoIP ที่ใช้คือ MOS (Mean Opinion Score) ตามมาตรฐาน E-model ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อคุณภาพการให้บริการของ VoIP ในโครงข่ายไร้สายเมชประเภท Grid metric

4) สามารถนำค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่จำเป็นของระบบในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้โดยใช้ค่าที่เป็น ค่ามาตรฐานที่ถูกกำหนดให้ใช้งานตามข้อบังคับของประเทศไทยได้

5) สามารถทำการจำลองระบบในวิทยานิพนธ์นี้โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะหาจำนวนการใช้งาน VoIP พร้อม ๆ กันที่มากที่สุด ในขณะที่คุณภาพการให้บริการยังอยู่ในระดับดี เพื่อเป็นข้อมูลในการวางแผนเพื่อใช้งานโครงข่ายไร้สายแบบเมชประเภทกริดในประเทศไทยได้

## 5.2 ข้อจำกัดและแนวทางแก้ไขของงานวิจัย

โปรแกรม OMNET++ ปัจจุบัน version 4.1 ที่เป็น stable version และเป็นโปรแกรม GUI แบบโอเพนซอส ซึ่งต้องใช้เวลาในการศึกษามากอีกทั้งตัวโปรแกรมยังไม่สมบูรณ์ในบางโมดูลของงานวิจัย และในการคอมไพล์บางครั้งยังมีบั๊กในตัวโปรแกรม OMNET++ ดังนั้นจึงทำการแก้ไข GUI และโมดูลที่จะครอบคลุมงานวิจัยของผู้วิจัย และทำการแก้ไขโดยเพิ่ม RAM และ update java ให้โปรแกรม OMNET++ และเพื่อให้ผลการทดสอบถูกต้องผู้วิจัยจึงต้องใช้เวลาในการแก้ไขข้อบกพร่องใน OMNET++ พอสมควร

## 5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนาในอนาคต

เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านตัวโปรแกรม OMNET++ ทำให้การจำลองระบบความจุระบบการใช้งาน VoIP บน WMNs ประเภทกริดขาดความสมบูรณ์ไปบ้างผู้วิจัยจึงจะขอเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาสำหรับผู้สนใจจะนำไปพัฒนาต่อไป ดังนี้

5.3.1 ควรจะทำให้ระบบสามารถทำทดลองโดยติดตั้งระบบจริงควบคู่ไปกับการจำลองระบบเพื่อใช้เปรียบเทียบผลการทดลองว่าสามารถใช้งานได้เหมือนกันหรือไม่

5.3.2 ควรจะทำให้ระบบสามารถทำงานโดยส่งไฟล์ที่เป็นทั้งภาพและเสียงในสภาพแวดล้อมและระยะทางที่ต่างกัน

5.3.3 ควรจะทำให้ระบบสามารถทำงานใช้งาน VoIP โดยมีผู้ใช้ที่ไม่พร้อมกัน





บรรณานุกรม

ภาษาต่างประเทศ

**BOOK**

E. Hossain and K.K. Leung. (2008). **Wireless Mesh Networks: Architectures and Protocols**,  
Spring Street. New York; USA.

**ARTICLES**

- A. Kashyap, (2007, May). “VoIP on wireless meshes: Models, Algorithms and Evaluation networks”. **INFOCOM 2007, 26th IEEE International Conference on Computer Communications**. p.2036 - 2044.
- A. Zakrzewska, L. Koszalka and I. Pozniak-Koszalka. (2008, September). “Performance Study of Routing Protocols for Wireless Mesh Networks”. **ICSENG 2008**. p.331 - 336.
- C. Beaulieu. (2001, November). “An Efficient Procedure for Nakagami-m Fading Simulation”. **Global Telecommunication Conference 2001, Volume 6**. p.3336-3342.
- D. Singh et al. (2009, May). “Measurement of wireless Network Performance”. **IEEE National Conference on Advanced Technologies and Applications**. p.1-4.
- I.F. Akyildiz and X. Wang. (2005, September). “A Survey on Wireless Mesh Networks”. **IEEE Communications Magazine**. **Volume 43, Number 9**. p.S23 - S30.
- I. Khan & A. Qayyum. (2009, December). “Performance Evaluation of AODV and OLSR in Highly Fading Vehicular Ad hoc Network Environments”. **INMIC 2009, IEEE 13th International**. p.1 - 5.
- M. Gidlund and J. Ekling. (2008, November). “VoIP and IPTV distribution over wireless mesh networks in indoor environment”. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**. **Volume 54, Number 4**. p.1665 - 1671.
- N. Youssef, T. Munakata, and M. Takeda. (1996). “Fade statistics in Nakagami fading environments”. **IEEE 4th International Symposium on 1996**. **Volume 3**. p.1244 - 1247.

- R. Cole & J.H. Rosenbluth. (2001, April). "Voice over IP performance monitoring". **ACM SIGCOMM Computer Communication Review Homepage archive. Volume 31, Issue 2.** p.9 - 24.
- S. Ganguly et al. (2006, November). "Performance Optimizations for Deploying VoIP Services in Mesh Networks". **IEEE Journal on selected areas in communications. Volume 24, Number 11.** p.2147 - 2158.
- V.Borges, M. Curado, and E. Monteiro. (2010, September). "A Cross-layer Routing Scheme for Scalable Triple Play Service in Wireless Mesh Networks". **ICCCN 2010.** p.1 - 6.

#### DISSERTATIONS

- A. Ubaid & A. Ksentini. (2008, June). **Deployment of VoIP in the IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks.** Computer Science. France: University of Rennes.
- E.M. van Eenennaam, (2008, June). **A Survey of Propagation Models used in Vehicular Ad hoc Network (VANET) Research.** Computer Science. Netherlands: University of Twente.
- P. Dely. (2007, June). **Adaptive Aggregation of Voice over IP in Wireless Mesh Networks.** Computer Science. Sweden: University of Karlstad.
- P. Rabiej, W. Sendor & L. Prytek. (2009, May). **Simulating Wireless Mesh Networks.** Computer Science and Electronics. Poland: University of Science and Technology AGH Distributed Network Environments.
- R. Gantenbein. (2010, June). **VIRTUALMESH: AN EMULATION FRAMEWORK FOR WIRELESS MESH NETWORKS IN OMNET++.** Computer Science. Switzerland: University of Bern.

## ELECTRONIC SOURCES

- ITU-T. (2003, March). ITU-T Recommendation G.107: The E-Model  
a computational model for use in transmission planning. Retrieved March 2011, from  
**<https://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?id=9730>**.
- ITU-T. (2001). ITU-T Recommendation G.113: Transmission impairments due to speech  
processing. Retrieved March 2011, from **<http://www.itu.int/itu-t/recommendations/rec.aspx?id=9273>**.
- ITU-T. (2003). ITU-T Recommendation G.114: One-way transmission time International  
Telecommunication Union: Transmission Systems and Media Digital Systems and  
Networks. Retrieved March 2011, from **<http://www.itu.int/itudoc/itu-t/aap/sg12aap/history/g.114/index.html>**.
- K. Andreev and P. Boyko. (2007, August). IEEE 802.11s Mesh Networking NS-3 Model.  
Retrieved February 2011, from **<http://www.nsnam.org/workshops/wns3-2010/dot11s.pdf>**.
- The OMNeT++ Community. (2001-2009). User Manual version 4.1. Retrieved July 2010, from  
**<http://www.omnetpp.org>**.
- Wikipedia. (2011, December). ITU-T Recommendation G.711: Pulse code modulation (PCM) of  
voice frequencies. Retrieved January 2012, from  
**<http://en.wikipedia.org/wiki/G.711>**.
- Wikipedia. (2011, June). ITU-T Recommendation G.723.1: Dual Rate Speech Coder for  
Multimedia Communications Transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s.  
Retrieved January 2012, from **<http://en.wikipedia.org/wiki/G.723.1>**.
- Wikipedia. (2011, October). ITU-T Recommendation G.729: Coding of Speech at 8kbit/s using  
Conjugate-structure Algebraic-code-excited Linear prediction (CS-ACELP).  
Retrieved January 2012, **<http://en.wikipedia.org/wiki/G.729>**.
- Wikipedia. (2012, January). Linksys WRT54G series. Retrieved May 2011, from  
**<http://en.wikipedia.org/wiki/WRT54G>**.
- WirelessCommunication.NL. (2009). Nakagami fading. Retrieved April 2011, from  
**<http://wireless.per.nl/reference/chaptr03/ricenaka/nakagami.htm>**.

ด  
ร  
ค  
น  
ว  
ก

ภาคผนวก

## ภาคผนวก

## Source code ของงานวิจัย

**# Default general program**

```

network = inet.examples.adhoc.aodv_mmap.mmap_example
cmdenv-express-mode = true
tkenv-plugin-path = ../../Etc/plugins
rng-class = "cMersenneTwister"
tkenv-default-run=0
description = "Test for WMNs"
**.debug = true
**.module-eventlog-recording = true

```

**# Set simulation time**

```
sim-time-limit = 60s
```

**# Keep log**

```
**.scalar-recording = true
```

**# Set number of APs**

```
*.numHosts = 36
```

**# If distance between APs 100 meters**

```
*.playgroundSizeX = 600 ## X = horizontal play ground size
```

[Distance between APs 100 meters, X = 600]

```
*.playgroundSizeY = 600 ## Y = vertical play ground size
```

[Distance between APs 100 meters, Y = 600]

```
** .host[0].mobility.x = 0
```

```
** .host[0].mobility.y = 0
```

```
** .host[1].mobility.x = 0
** .host[1].mobility.y = 100
** .host[2].mobility.x = 0
** .host[2].mobility.y = 200
** .host[3].mobility.x = 0
** .host[3].mobility.y = 300
** .host[4].mobility.x = 0
** .host[4].mobility.y = 400
** .host[5].mobility.x = 0
** .host[5].mobility.y = 500
** .host[6].mobility.x = 100
** .host[6].mobility.y = 0
** .host[7].mobility.x = 100
** .host[7].mobility.y = 100
** .host[8].mobility.x = 100
** .host[8].mobility.y = 200
** .host[9].mobility.x = 100
** .host[9].mobility.y = 300
** .host[10].mobility.x = 100
** .host[10].mobility.y = 400
** .host[11].mobility.x = 100
** .host[11].mobility.y = 500
** .host[12].mobility.x = 200
** .host[12].mobility.y = 0
** .host[13].mobility.x = 200
** .host[13].mobility.y = 100
** .host[14].mobility.x = 200
** .host[14].mobility.y = 200
** .host[15].mobility.x = 200
** .host[15].mobility.y = 300
** .host[16].mobility.x = 200
```

```
** .host[16].mobility.y = 400
** .host[17].mobility.x = 200
** .host[17].mobility.y = 500
** .host[18].mobility.x = 300
** .host[18].mobility.y = 0
** .host[19].mobility.x = 300
** .host[19].mobility.y = 100
** .host[20].mobility.x = 300
** .host[20].mobility.y = 200
** .host[21].mobility.x = 300
** .host[21].mobility.y = 300
** .host[22].mobility.x = 300
** .host[22].mobility.y = 400
** .host[23].mobility.x = 300
** .host[23].mobility.y = 500
** .host[24].mobility.x = 400
** .host[24].mobility.y = 0
** .host[25].mobility.x = 400
** .host[25].mobility.y = 100
** .host[26].mobility.x = 400
** .host[26].mobility.y = 200
** .host[27].mobility.x = 400
** .host[27].mobility.y = 300
** .host[28].mobility.x = 400
** .host[28].mobility.y = 400
** .host[29].mobility.x = 400
** .host[29].mobility.y = 500
** .host[30].mobility.x = 500
** .host[30].mobility.y = 0
** .host[31].mobility.x = 500
** .host[31].mobility.y = 100
```



```
** .host[32].mobility.x = 500
** .host[32].mobility.y = 200
** .host[33].mobility.x = 500
** .host[33].mobility.y = 300
** .host[34].mobility.x = 500
** .host[34].mobility.y = 400
** .host[35].mobility.x = 500
** .host[35].mobility.y = 500
```

**# If distance between APs 200 meters**

```
* .playgroundSizeX = 1200 ## X = horizontal play ground size
                                [Distance between APs 200 meters, X = 1200]
* .playgroundSizeY = 1200 ## Y = vertical play ground size
                                [Distance between APs 200 meters, Y = 1200]

** .host[0].mobility.x = 0
** .host[0].mobility.y = 0
** .host[1].mobility.x = 0
** .host[1].mobility.y = 200
** .host[2].mobility.x = 0
** .host[2].mobility.y = 400
** .host[3].mobility.x = 0
** .host[3].mobility.y = 600
** .host[4].mobility.x = 0
** .host[4].mobility.y = 800
** .host[5].mobility.x = 0
** .host[5].mobility.y = 1000
** .host[6].mobility.x = 200
** .host[6].mobility.y = 0
** .host[7].mobility.x = 200
** .host[7].mobility.y = 200
```

```
** .host[8].mobility.x = 200
** .host[8].mobility.y = 400
** .host[9].mobility.x = 200
** .host[9].mobility.y = 600
** .host[10].mobility.x = 200
** .host[10].mobility.y = 800
** .host[11].mobility.x = 200
** .host[11].mobility.y = 1000
** .host[12].mobility.x = 400
** .host[12].mobility.y = 0
** .host[13].mobility.x = 400
** .host[13].mobility.y = 200
** .host[14].mobility.x = 400
** .host[14].mobility.y = 400
** .host[15].mobility.x = 400
** .host[15].mobility.y = 600
** .host[16].mobility.x = 400
** .host[16].mobility.y = 800
** .host[17].mobility.x = 400
** .host[17].mobility.y = 1000
** .host[18].mobility.x = 600
** .host[18].mobility.y = 0
** .host[19].mobility.x = 600
** .host[19].mobility.y = 200
** .host[20].mobility.x = 600
** .host[20].mobility.y = 400
** .host[21].mobility.x = 600
** .host[21].mobility.y = 600
** .host[22].mobility.x = 600
** .host[22].mobility.y = 800
** .host[23].mobility.x = 600
```

```
** .host[23].mobility.y = 1000
** .host[24].mobility.x = 800
** .host[24].mobility.y = 0
** .host[25].mobility.x = 800
** .host[25].mobility.y = 200
** .host[26].mobility.x = 800
** .host[26].mobility.y = 400
** .host[27].mobility.x = 800
** .host[27].mobility.y = 600
** .host[28].mobility.x = 800
** .host[28].mobility.y = 800
** .host[29].mobility.x = 800
** .host[29].mobility.y = 1000
** .host[30].mobility.x = 1000
** .host[30].mobility.y = 0
** .host[31].mobility.x = 1000
** .host[31].mobility.y = 200
** .host[32].mobility.x = 1000
** .host[32].mobility.y = 400
** .host[33].mobility.x = 1000
** .host[33].mobility.y = 600
** .host[34].mobility.x = 1000
** .host[34].mobility.y = 800
** .host[35].mobility.x = 1000
** .host[35].mobility.y = 1000
```

#### **# Set UDP apps**

```
** .host[*].numUdpApps= AA ## AA = [Number of VoIP]
** .host[0].udpAppType="UDPBasicBurst"
** .host[1].udpAppType="UDPBasicBurst"
** .host[2].udpAppType="UDPBasicBurst"
```

```
** .host[3].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[4].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[5].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[6].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[7].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[8].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[9].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[10].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[11].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[12].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[13].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[14].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[15].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[16].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[17].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[18].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[19].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[20].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[21].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[22].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[23].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[24].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[25].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[26].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[27].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[28].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[29].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[30].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[31].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[32].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[33].udpAppType="UDPBasicBurst"
```

```
** .host[34].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[35].udpAppType="UDPBasicBurst"  
** .host[0].udpApp[*].destAddresses="host[YY]" ## YY = [Destination hop]  
** .host[1].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[2].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[3].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[4].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[5].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[6].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[7].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[8].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[9].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[10].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[11].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[12].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[13].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[14].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[15].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[16].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[17].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[18].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[19].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[20].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[21].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[22].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[23].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[24].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[25].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[26].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[27].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[28].udpApp[*].destAddresses=""
```

```
** .host[29].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[30].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[31].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[32].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[33].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[34].udpApp[*].destAddresses=""  
** .host[35].udpApp[*].destAddresses=""  
** .udpApp[*].localPort=1234  
** .udpApp[*].destPort=1234  
** .udpApp[*].messageLength= 20B  
** .udpApp[*].messageFreq = 0.02s  
** .udpApp[*].message_freq_jitter=0s  
** .udpApp[*].burstDuration = 0s  
** .udpApp[*].activeBurst=false  
** .udpApp[*].time_off = 0s  
** .udpApp[*].time_begin = 0s  
** .udpApp[*].limitDelay =1000s  
** .udpApp[*].time_end=60s
```

#### **# Set IP settings**

```
** .routingFile=""  
** .ip.procDelay=10us  
** .IPForward=true
```

#### **# Set ARP configuration**

```
** .arp.retryTimeout = 1s  
** .arp.retryCount = 3  
** .arp.cacheTimeout = 120s
```

**# Set TCP Client**

```
** .host[0].numTcpApps=1 ## (on = 1/ off = 0), host [0] = [Source]
** .host[0].tcpAppType = "TCPSessionApp"
** .host[0].tcpApp[0].active = true
** .host[0]*.tcpApp[0].port = 1235
** .host[0]*.tcpApp[0].connectAddress = "host[Destination hop]"
** .host[0]*.tcpApp[0].connectPort = 1235
** .host[0]*.tcpApp[0].tOpen = 0s
** .host[0]*.tcpApp[0].tSend = 0s
** .host[0]*.tcpApp[0].sendBytes = 16500KB ## BG = 20% = 16500KB, BG = 40% = 33000KB
** .host[0]*.tcpApp[0].sendScript = ""
** .host[0]*.tcpApp[0].tClose = 60s
** .host[0].tcpApp[*].active = true
```

**# Set TCP Destination apps.**

```
** .host[YY].numTcpApps =0 ## (on = 1/ off = 0), host [YY] = [Destination hop]
** .host[YY].tcpAppType = "TCPSinkApp"
** .host[YY].tcpApp[0].port = 1235
** .host[YY]*.tcpApp[0].tClose = 60s
```

**# Set TCP settings**

```
** .tcp.mss = 2000
** .tcp.advertisedWindow = 28000
** .tcp.delayedAcksEnabled = false
** .tcp.nagleEnabled = true
** .tcp.limitedTransmitEnabled = false
** .tcp.increasedIWEnabled = false
** .tcp.sackSupport = true
** .tcp.windowScalingSupport = false
** .tcp.timestampSupport = true
** .tcp.tcpAlgorithmClass = "TCPReno"
```

```
**tcp.sendQueueClass = "TCPVirtualDataSendQueue"
**tcp.receiveQueueClass = "TCPVirtualDataRcvQueue"
**tcp.recordStats = true

# Set network interface card settings
**wlan.mgmt.frameCapacity = 5593
**wlan.mac.address = "auto"
**wlan.mac.maxQueueSize = 5593
**wlan.mac.rtsThresholdBytes = 3000B
**wlan.mac.bitrate = 11Mbps
**wlan.mac.basicBitrate = 11Mbps
**wlan.mac.retryLimit = 7
**wlan.mac.cwMinData = 7
**wlan.mac.cwMinBroadcast = 7
**wlan.mac.opMode = 1 ## 802.11b
**wlan.mac.slotTime = 30us

# Set channel physical parameters
*channelcontrol.carrierFrequency = 2.4GHz
*channelcontrol.pMax = 100mW
*channelcontrol.sat = -85dBm
*channelcontrol.alpha = [rural =2, sub-urban = 2.4, urban =2.8]
*channelcontrol.numChannels = 1
**radio.carrierFrequency = 2.4 GHz
**wlan.radio.transmitterPower = 100mW
**wlan.radio.pathLossAlpha = [rural =2, sub-urban = 2.4, urban =2.8]
**wlan.radio.snirThreshold = 4dB
**wlan.radio.bitrate = 11Mbps
**wlan.radio.thermalNoise = -110dBm
**wlan.radio.sensitivity = -85dBm
**wlan.radio.phyOpMode = 2 ## 802.11b
```



```
**wlan.radio.channelModel = 1  
**wlan.radio.berTableFile = "per_table_80211g_Trivellato.dat"  
**broadcastDelay=uniform(0s,0.005s)
```

#### **# Set routing protocol and propagation model**

```
**manetrouting.manetmanager.routingProtocol = "AODV"  
**propagationModel = "NakagamiModel"  
**radio.nak_m = 1  
**channelNumber = 0
```

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล

สาโรจน์ ชัยศักดิ์มงคล

ประวัติการศึกษา

เกียรตินิยมอันดับหนึ่ง วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยรังสิต  
จ.ปทุมธานี ปีการศึกษา 2549

ทุนการศึกษา

ทุนเรียนดีจากมหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิต ปีการศึกษา 2552-2553