รหัสโครงการ SUT7-709-54-12-05

รายงานการวิจัย

การพัฒนาเทคนิคการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์สำหรับขยายการสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงสู่พื้นที่ห่างไกลภายใต้งบประมาณที่จำกัด

(Development of WiMAX network design techniques for expanding high speed broadband wireless communication to remote area under limited budget)

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจาก

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

รหัสโครงการ SUT7-709-54-12-05

รายงานการวิจัย

การพัฒนาเทคนิคการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์สำหรับขยายการสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงสู่พื้นที่ห่างไกลภายใต้งบประมาณที่จำกัด

(Development of WiMAX network design techniques for expanding high speed broadband wireless communication to remote area under limited budget)

คณะผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุติมา พรหมมาก

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มีนาคม 2556

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านที่ได้ช่วยให้งานวิจัยนี้เสร็จลุล่วงด้วยดี ขอบคุณศูนย์คอมพิวเตอร์ และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้อำนวยความสะดวกในการวิจัย ขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีในการให้ทุนสนับสนุนการวิจัย และให้งบประมาณในการนำเสนอผลงานวิจัย ณ การประชุมวิชาการนานาชาติ

ผู้วิจัย

มีนาคม 2556

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์สำหรับขยายการสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงสู่พื้นที่ห่างไกลภายใต้งบประมาณที่จำกัด เทคนิคที่นำเสนอนี้ได้พัฒนาขึ้นในรูปของสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มไบนารี

นวัตกรรมของงานวิจัยนี้ได้แก่การพัฒนาเทคนิคการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ที่ทำให้ได้เครือข่ายที่มีประสิทธิภาพการให้บริการสื่อสารโดยที่มีการจำกัดงบประมาณการติดตั้งเครือข่าย โดยเทคนิคที่นำเสนอมุ่งเน้นการออกแบบเครือข่ายในส่วนของระบบไร้สาย ซึ่งเป็นการกำหนดจำนวนและตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งสถานีฐาน และสถานีรีเลย์ ซึ่งได้ประยุกต์ใช้โครงสร้างของเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานและสถานีรีเลย์แบบหลายช่วงเชื่อมต่อ โดยเครือข่ายที่ได้สามารถเพิ่มคุณภาพการสื่อสารข้อมูลของเครือข่ายไวแมกซ์ในสองประเด็นคือ คุณภาพของอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูล และคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ที่ต้องการให้บริการเครือข่าย จากผลการทดลองและการวิเคราะห์เชิงเลขแสดงให้เห็นว่า เทคนิคที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้สามารถออกแบบโครงสร้างเครือข่ายที่มีประสิทธิภาพการสื่อสารที่ดีกว่าเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีอื่น ทั้งในด้านอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูล และคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ที่ต้องการให้บริการเครือข่าย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Abstract

In this research, we have developed WiMAX network design techniques for expanding high speed broadband wireless communication to remote area under limited budget. We model the proposed network planning problems as a binary integer linear programming.

Our key contribution is that the proposed models can maximize the network quality of services at a given network budget limitation. The proposed method utilizing multi-hop relay stations can maximize the network quality of services in term of the user access data rate guarantee and the radio service coverage to serve potential user traffic demand in the target service area by determining optimal locations to install base stations and relay stations in the multi-hop manner. Numerical experiments were conducted to evaluate and demonstrate the effectiveness of the proposed methods in real network service environments. The results and analysis show that the proposed model can improve the user access data rate and enhance the network service coverage compared with other existing techniques.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ .....ก
บทคัดย่อ .....ข
Abstract .....ค
สารบัญ .....ง
สารบัญภาพ .....ฉ
สารบัญตาราง .....ช
บทที่ 1 บทนำ
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....3
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย 3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....3
บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2.1 เครือข่ายไวแมกซ์สำหรับการสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูง.....5
2.1.1 โครงสร้างของเครือข่ายไวแมกซ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.16j 5
2.1.2 มาตรฐาน IEEE 802.16j.....7
2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 7
2.3 การวางแผนเครือข่ายบรอดแบนด์ไร้สาย 9
2.3.1 พารามิเตอร์ที่พิจารณาในการวางแผนเครือข่าย.....9
2.3.2 การวิเคราะห์พื้นที่ครอบคลุม 9
2.3.3 การวิเคราะห์ความจุของเครือข่าย 11
2.4 แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถี 12
บทที่ 3 เทคนิคการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ภายใต้งบประมาณการสร้างเครือข่ายที่จำกัด
3.1 การนิยามปัญหาสำหรับการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์.....14
3.2 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์.....16

หน้า

3.2.1 การนิยามตัวแปร.....16
3.2.2 สมการเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีสำหรับวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์.....18
3.3 โปรแกรมสำหรับหาคำตอบของสมการเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี.....21
3.3.1 การแปลงสมการเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีเป็นคำสั่งในโปรแกรม.....21
3.3.2 ส่วนประกอบของโปรแกรม.....23
บทที่ 4 การทดลองออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์และการวิเคราะห์ผล
4.1 การทดลองออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ภายใต้การจำกัดงบประมาณลงทุน.....25
4.1.1 พารามิเตอร์และลักษณะพื้นที่ให้บริการที่ใช้ในการทดลอง.....25
4.1.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลกับการออกแบบเครือข่ายแนวทางอื่น...28
4.2 การวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์สำหรับเขตในเมืองนครราชสีมา.....31
4.2.1 ลักษณะพื้นที่เขตในเมืองนครราชสีมาและพารามิเตอร์ที่ใช้ทดลอง.....31
4.2.2 ตัวอย่างโครงสร้างเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบ.....34
4.2.3 การวิเคราะห์คุณภาพการให้บริการเครือข่าย.....35
4.3 สรุปการทดลอง.....37
บทที่ 5 สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....39
บรรณานุกรม 41
ภาคผนวก
บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....43
ประวัติผู้วิจัย.....44

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 สถาปัตยกรรมเครือข่ายระบบไวแมกซ์.....6
รูปที่ 2.2 วิธีขยายขนาดและเพิ่มอัตราเร็วในการให้บริการโดยใช้สถานีรีเลย์.....11
รูปที่ 3.1 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio.....24
รูปที่ 4.1 พื้นที่ให้บริการเครือข่ายไวแมกซ์ที่ใช้ในการทดลอง.....26
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบคุณภาพการให้บริการเครือข่ายกรณีที่ใช้งบประมาณ 800,000US$.....30
รูปที่ 4.3 กราฟฟังก์ชันความหนาแน่นสะสมของค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับที่จุดทดสอบ
สัญญาณ STPs และจุดทดสอบอัตราเร็วบิต DPs กรณีที่ใช้งบประมาณ 800,000US$.....31
รูปที่ 4.4 พื้นที่ให้บริการเครือข่ายไวแมกซ์เขตในเมืองนครราชสีมา.....33
รูปที่ 4.5 ตัวอย่างโครงสร้างเครือข่ายไวแมกซ์ของพื้นที่เขตในเมืองนครราชสีมา.....34
รูปที่ 4.6 กราฟฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับที่จุด
ทดสอบสัญญาณ STPs และจุดทดสอบอัตราเร็วบิต DPs.....37

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับ SUI Model แบ่งตามประเภทสิ่งแวดล้อมและลักษณะของพื้นที่.....13
ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับตัวแปรเซท.....16
ตารางที่ 3.2 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับตัวแปรตัดสินใจ.....17
ตารางที่ 3.3 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่.....18
ตารางที่ 3.4 แสดงการแปลงสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีเป็นคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio.....22
ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่สำหรับใช้ในการทดลอง.....27
ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูเลต อัตราเร็วบิตและระดับสัญญาณขั้นต่ำในการทำงานที่อัตราเร็วบิตต่างๆ.....28
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์และการเปรียบเทียบเชิงเลข.....29
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่สำหรับใช้ในการทดลอง.....33
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์และการเปรียบเทียบเชิงเลข.....36

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

การสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูง (High Speed Broadband Wireless Communications) เป็นระบบที่มีความจำเป็นสำหรับการสื่อสารข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ เพื่อตอบสนองความต้องการในเรื่องความเร็วในการรับส่งข้อมูล และขยายบริเวณครอบคลุมการสื่อสารข้อมูลไปยังพื้นที่ห่างไกล ซึ่งยังขาดแคลนระบบสายสัญญาณโทรคมนาคมพื้นฐานที่มีคุณภาพ ในปัจจุบันนี้การสื่อสารบรอดแบนด์ความเร็วสูงส่วนใหญ่แล้วเป็นการใช้งานผ่านระบบเครือข่ายแบบมีสายได้แก่ ระบบเครือข่ายท้องถิ่น (Ether net LAN) ซึ่งปกติแล้วจะใช้งานที่อัตราเร็วบิต 100 Mbps หรือ ระบบเอดีเอสแอล (ADSL, Asymmetric Digital Subscriber Line) ที่มีอัตราเร็วบิตทางทฤษฎีอยู่ที่ 6 Mbps ซึ่งระบบการสื่อสารดังกล่าวได้ถูกจำกัดอยู่ในบริเวณที่มีความพร้อมด้านโครงสร้างพื้นฐานของสายสัญญาณโทรคมนาคมเท่านั้น ส่วนการสื่อสารบรอดแบนด์ความเร็วสูงแบบไร้สาย ในปัจจุบัน ได้แก่ ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (WLAN, Wireless Local Area Networks) ซึ่งมีอัตราเร็วบิตทางทฤษฎีอยู่ที่ 54 Mbps แต่การใช้งานเครือข่ายประเภทนี้ก็ถูกจำกัดอยู่ในบริเวณไม่กว้างนัก เช่น บริเวณภายในอาคาร สำนักงาน หรือสถานศึกษาที่มีระบบการสื่อสารเครือข่ายพื้นฐานพร้อมเท่านั้น

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันนี้ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่จะได้เข้ามามีบทบาทในการให้บริการสื่อสารข้อมูลที่ครอบคลุมบริเวณได้ทั่วถึงมากขึ้น แต่ความเร็วในการสื่อสารข้อมูลก็ถูกจำกัดอยู่เพียง 384 Kbps สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุค 2.75G ซึ่งยังมีความเร็วไม่มากพอที่จะรองรับการประยุกต์ใช้งานการสื่อสารข้อมูลได้เหมือนกับการสื่อสารผ่านระบบเครือข่ายท้องถิ่นแบบมีสาย และแบบไร้สายดังกล่าวข้างต้น ส่วนเทคโนโลยีระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุค 3G ซึ่งตามทฤษฎีสามารถให้บริการที่อัตราเร็วบิตสูงสุดได้ถึง 14.4 Mbps สำหรับผู้ใช้ที่อยู่กับที่ หรืออยู่ภายในอาคาร แต่ว่าระบบเครือข่ายดังกล่าวยังจำกัดอยู่ในบริเวณย่านธุรกิจการค้า การท่องเที่ยว หรือภายในเขตเมืองใหญ่เท่านั้น การที่จะขยายพื้นที่ครอบคลุมของเครือข่าย 3G ต้องทำการปรับปรุงโครงสร้างเครือข่ายของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่อย่างมาก กล่าวคือต้องมีการเปลี่ยนอุปกรณ์เครือข่ายที่มีความซับซ้อน ทั้งในส่วนของ Access Network และ Core Network ซึ่งต้องใช้เงินลงทุนที่สูงมาก

ไวแมกซ์ (WiMAX, Worldwide inter-operability for Microwave Access) เป็นเทคโนโลยีการสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงที่สามารถส่งสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ได้ในรัศมีที่กว้างกว่า และ

สามารถให้บริการรับส่งข้อมูลที่อัตราเร็วบิตสูงกว่าระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่มาก ไวแมกซ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.16a สามารถให้บริการรับส่งข้อมูลที่อัตราเร็วบิตได้ถึง 75 Mbps ด้วยการใช้วิธีการส่งสัญญาณแบบ OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) และสามารถส่งสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ในรัศมีที่กว้างถึง 50 กิโลเมตร สำหรับกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง (line of sight) การเชื่อมต่อสถานีฐานของเครือข่ายไวแมกซ์สามารถเชื่อมต่อในรูปแบบจุดต่อจุด (point-to-point) หรือแบบจุดต่อหลายจุด (point-to-multipoint) ซึ่งเป็นการง่ายต่อการวางระบบเครือข่าย อย่างไรก็ตามการเชื่อมต่อเครือข่ายไวแมกซ์ในรูปแบบดังกล่าว มีข้อจำกัดในเรื่องของคุณภาพของสัญญาณและอัตราเร็วบิตที่ขอบเซล (cell edge) ซึ่งเป็นบริเวณที่เป็นจุดอับในการรับสัญญาณเนื่องจากมีสิ่งกีดขวาง ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการใช้สถานีรีเลย์เพื่อรับและส่งต่อสัญญาณจากสถานีฐานไปให้ผู้ใช้ที่อยู่บริเวณขอบเซลหรือบริเวณจุดอับสัญญาณได้ ทำให้สามารถขยายบริเวณครอบคลุมสัญญาณที่มีคุณภาพของเครือข่ายไวแมกซ์ออกไปได้อีก แต่อย่างไรก็ตามการกำหนดจุดติดตั้งของสถานีฐาน และสถานีรีเลย์ รวมถึงการเลือกใช้พารามิเตอร์สำหรับการส่งสัญญาณที่เหมาะสมเป็นประเด็นที่สำคัญที่ผู้ออกแบบและวางแผนเครือข่ายต้องพิจารณาจึงจะทำให้สามารถขยายพื้นที่ให้บริการการสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ และคุ้มค่ากับการลงทุน

ดังนั้นโครงการวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการพัฒนาวิธีการออกแบบและวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการใช้สถานีรีเลย์หลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-hop relay stations) เพื่อให้ได้เครือข่ายไวแมกซ์ที่สามารถส่งสัญญาณครอบคลุมทั่วถึงบริเวณที่ห่างไกลและขาดแคลนระบบสายส่งโทรคมนาคมพื้นฐาน เพื่อที่จะสามารถให้บริการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ภายใต้งบประมาณที่มีอย่างจำกัด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานและตัวชี้วัดประสิทธิภาพการสื่อสารของเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการใช้สถานีรีเลย์หลายช่วงเชื่อมต่อ
2. เพื่อศึกษาการกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการติดตั้งและใช้งานเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการใช้สถานีรีเลย์หลายช่วงเชื่อมต่อ
3. เพื่อพัฒนาเทคนิคการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการใช้สถานีรีเลย์หลายช่วงเชื่อมต่อ เพื่อให้สามารถให้บริการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ภายใต้งบประมาณที่มีอย่างจำกัด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาหลักการทำงานและตัวชี้วัดประสิทธิภาพการสื่อสารของเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการใช้สถานีรีเลย์หลายช่วงเชื่อมต่อ
2. ศึกษาการกำหนดพารามิเตอร์สำหรับการติดตั้งและใช้งานเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการใช้สถานีรีเลย์หลายช่วงเชื่อมต่อ
3. พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ รวมถึงการออกแบบกรอบวิธี และเกณฑ์เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการใช้สถานีรีเลย์หลายช่วงเชื่อมต่อ
4. พัฒนาโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการใช้สถานีรีเลย์หลายช่วงเชื่อมต่อ
5. ศึกษา วิเคราะห์ และตรวจสอบประสิทธิภาพของเครือข่ายที่ได้จากวิธีการออกแบบที่พัฒนาขึ้น

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

1. ศึกษาและสำรวจวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบเครือข่ายเครือข่ายไวแมกซ์
2. กำหนดกรอบวิธีและเกณฑ์การออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ที่ใช้สถานีรีเลย์หลายช่วงเชื่อมต่อ
3. พัฒนาสมการคณิตศาสตร์เพื่อกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการใช้สถานีรีเลย์หลายช่วงเชื่อมต่อ
4. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมเพื่อหาคำตอบของสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการใช้สถานีรีเลย์หลายช่วงเชื่อมต่อ
5. ศึกษา วิเคราะห์ และตรวจสอบประสิทธิภาพของเครือข่ายที่ได้จากวิธีการออกแบบที่พัฒนาขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

ประโยชน์ที่ได้รับ : ได้เทคนิคการออกแบบและวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการใช้สถานีรีเลย์หลายช่วงเชื่อมต่อ ที่สามารถกำหนดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งอุปกรณ์เครือข่ายเพื่อให้ได้สัญญาณครอบคลุมทั่วถึงบริเวณที่ห่างไกล และสามารถให้บริการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้เงื่อนไขของงบประมาณที่มีอย่างจำกัด ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอนี้สามารถเป็นองค์ความรู้ในการวิจัยและประยุกต์ใช้ต่อไป นอกจากนี้ยังได้บทความวิจัยที่มีคุณค่าทางวิชาการต่อวงการศึกษาและวิจัย

หน่วยงานที่นำผลการวิจัยไปใช้ประโยชน์ : สถาบันการศึกษาและหน่วยงานวิจัยที่มีความสนใจในเทคนิคการออกแบบและวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ รวมถึงหน่วยงานเอกชนหรือบริษัทที่ดำเนินธุรกิจเกี่ยวกับการให้บริการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงที่ใช้เครือข่ายไวแมกซ์

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

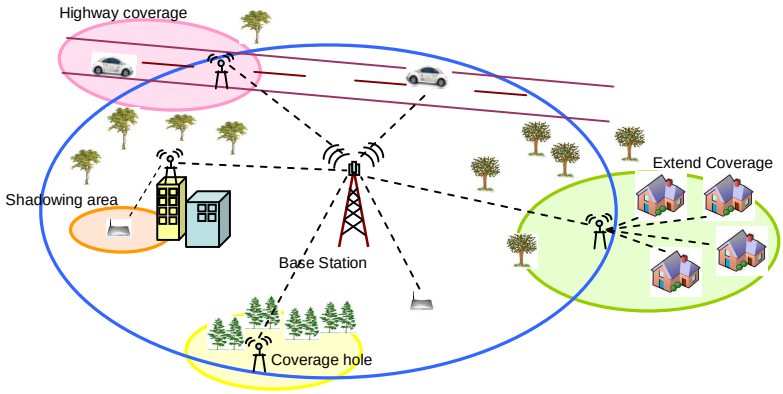
เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและหลักการทำงานของเครือข่ายไวแมกซ์ โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 2.1 กล่าวถึงเครือข่ายไวแมกซ์สำหรับการสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงตามมาตรฐาน IEEE 802.16j หัวข้อ 2.2 กล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง หัวข้อ 2.3 อธิบายพื้นฐานการวางแผนเครือข่ายบรอดแบนด์ไร้สาย และหัวข้อ 2.4 อธิบายแบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถี (Path Loss Model) ที่ใช้ในการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ในงานวิจัยนี้

2.1 เครือข่ายไวแมกซ์สำหรับการสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูง

การสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงตามมาตรฐานของไวแมกซ์ (WiMAX, Worldwide inter-operability for Microwave Access) ได้รับการพัฒนาเริ่มจากมาตรฐาน IEEE 802.16 [1] ซึ่งให้บริการกลุ่มผู้ใช้งานที่อยู่กับที่ เชื่อมต่อแบบ Line of Sight ในย่านความถี่ 10-66 GHz ในพิสัยครอบคลุมกว้าง 50 กิโลเมตร ต่อมาได้มีการพัฒนามาตรฐาน IEEE 802.16a ซึ่งใช้เทคนิคการมอดูเลทสัญญาณแบบ OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) ทำให้สามารถเชื่อมต่อแบบ Non Line of Sight ในย่านความถี่ 2-11 GHz และมาตรฐาน IEEE 802.16d ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในเชิงพาณิชย์เพื่อลดข้อจำกัดเรื่องของสัญญาณควบคุม (signaling) จากนั้นได้มีการพัฒนามาตรฐาน มาตรฐาน IEEE 802.16e หรือเรียกว่า Mobile WiMAX เพื่อรองรับผู้ใช้บริการประเภทเคลื่อนที่ ในปัจจุบันได้มีการพัฒนา มาตรฐาน IEEE 802.16j [2] ซึ่งสนับสนุนการใช้สถานีรีเลย์หลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-hop relay stations) ทำให้เครือข่ายไวแมกซ์สามารถขยายพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณจากสถานีฐาน และสามารถปรับปรุงคุณภาพการรับส่งข้อมูลที่ขอบเซลของสถานีฐานได้

2.1.1 โครงสร้างของเครือข่ายไวแมกซ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.16j

เครือข่ายไวแมกซ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.16j ประกอบด้วยอุปกรณ์สำคัญสามส่วนคือสถานีฐาน (Base Station: BS) สถานีรีเลย์ (Relay Station: RS) และสถานีลูกข่าย (Subscriber Station: SS) ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งหน้าที่และความสำคัญของแต่ละส่วนจะได้อธิบายต่อไปดังนี้



รูปที่ 2.1 สถาปัตยกรรมเครือข่ายระบบไวแมกซ์

ส่วนที่ 1 สถานีฐาน (Base Station : BS) ทำหน้าที่สำคัญคือควบคุมการรับส่งขอมูลของสถานีลูกข่ายทั้งหมดที่อยู่ในพื้นที่ให้บริการของสถานีฐานและเชื่อมต่อกับระบบโครงข่ายหลัก (Backbone Network)

ส่วนที่ 2 สถานีลูกข่าย (Subscriber Station : SS) ทำหน้าที่ติดต่อระหว่างผู้ใช้งานกับเครือข่ายโดยผ่านอุปกรณ์ลูกข่าย (Customer Premises Equipment : CPE) ซึ่งอุปกรณ์ลูกข่ายมี 3 ประเภทคือ

- อุปกรณ์ลูกข่ายแบบคงที่ (Fixed CPE) อุปกรณ์ชนิดนี้จะถูกติดตั้งสายอากาศเพื่อรับสัญญาณจากเครือข่ายไว้บนเสาสูง เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อในแนวเส้นสายตา (Line of Sight) กับเครือข่ายได้ ซึ่งการเชื่อมต่อลักษณะนี้ไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างสถานีภาคส่งกับอุปกรณ์ลูกข่าย ทำให้ได้รับกำลังสัญญาณที่ดีและอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลสูง
- อุปกรณ์ลูกข่ายแบบพกพา (Portable CPE หรือ Nomadic CPE) อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถพกพาเคลื่อนย้ายได้ แต่ขณะใช้งานต้องอยู่กับที่ หรือสามารถเคลื่อนที่ช้า ๆ ในระยะทางใกล้
- อุปกรณ์ลูกข่ายแบบเคลื่อนที่ (Mobile CPE) เป็นอุปกรณ์ลูกข่ายชนิดที่สามารถใช้งานในขณะเคลื่อนที่ได้ ซึ่งจะอยู่ในรูปของ อุปกรณ์เสริมที่สามารถต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์แบบพกพา หรืออาจถูกรวมเป็นอุปกรณ์พื้นฐานในคอมพิวเตอร์แบบพกพาหรือในโทรศัพท์เคลื่อนที่ไปในตัว

ส่วนที่ 3 สถานีรีเลย์ (Relay Station : RS) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางระหว่าง สถานีฐานและสถานีลูกข่าย เพื่อเพิ่มพื้นที่ให้บริการ ลดพื้นที่อับสัญญาณในพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐาน ทำให้สามารถใช้ทรัพยากรความถี่ได้อย่างคุ้มค่า

2.1.2 มาตรฐาน IEEE 802.16j

มาตรฐาน IEEE 802.16j ในปี ค.ศ. 2008 นั้นกำหนดให้ใช้การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ตั้งฉาก (Orthogonal Frequency Division Multiple Access: OFDMA) ที่พัฒนามาจากมาตรฐาน IEEE 802.16 ซึ่งใช้งานในย่านความถี่สัมปทานโดยมีการเพิ่มสถานีรีเลย์เข้ามาในเครือข่าย เพื่อขยายพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ เพิ่มวิสัยสามารถ (Throughput) และปริมาณความจุให้กับเครือข่าย โดยการเพิ่มสถานีรีเลย์เข้ามาในเครือข่ายได้ถูกออกแบบให้ไม่มีผลกระทบกับอุปกรณ์ลูกข่าย กล่าวคือสถานีรีเลย์เป็นที่ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครือข่ายเข้าถึง (Access Network)

ในเครือข่ายไวแมกซ์แบบสถานีรีเลย์หลายช่วงเชื่อมต่อนั้น สถานีฐานแบบเดิมอาจถูกแทนที่ด้วยสถานีฐานที่สามารถรองรับสถานีรีเลย์จำนวน 1 สถานีหรือมากกว่า โดยที่สัญญาณควบคุมระหว่างสถานีลูกข่ายกับสถานีฐานนั้นจะถูกถ่ายทอดโดยสถานีรีเลย์ ทำให้พื้นที่ครอบคลุมและประสิทธิภาพของระบบเพิ่มขึ้น โดยสถานีรีเลย์จะอยู่ภายใต้การควบคุมของสถานีฐานที่เป็นสถานีแม่ข่าย สำหรับเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีช่วงเชื่อมต่อมากกว่าสองช่วง สัญญาณข้อมูลและสัญญาณควบคุมระหว่างสถานีรีเลย์ที่ให้บริการอุปกรณ์ลูกข่าย (Access RS) กับสถานีฐานจะถูกถ่ายทอดโดยสถานีรีเลย์ตัวกลาง (Intermediate RS)

การประยุกต์ใช้งานสถานีรีเลย์ทำได้สามรูปแบบคือ สถานีรีเลย์แบบคงที่ (Fixed RS) สำหรับการใช้งานแบบภายนอกและภายในอาคาร สถานีรีเลย์แบบย้ายตำแหน่งได้ (Nomadic RS) สำหรับการใช้งานในพื้นที่ชั่วคราว และสถานีรีเลย์แบบเคลื่อนที่ (Mobile RS) สำหรับพื้นที่ให้บริการที่มีการเคลื่อนที่ สถานีรีเลย์ทั้งสามประเภทสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพเครือข่าย โดยขยายพื้นที่ครอบคลุม และเพิ่มวิสัยสามารถ สำหรับกรณีสถานีรีเลย์แบบเคลื่อนที่นั้นอยู่ในขั้นทดลองและวิจัย ยังเป็นไปได้ยากในการประยุกต์ใช้งานในทางปฏิบัติ เนื่องจากประเด็นของปริมาณสัญญาณแทรกสอดและประเด็นของการย้ายข้ามสถานีแม่ข่าย

สำหรับในงานวิจัยนี้พิจารณาการประยุกต์ใช้สถานีรีเลย์แบบคงที่ ซึ่งสามารถนำมาติดตั้งเพิ่มในเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีโครงสร้างของเครือข่ายเดิมอยู่แล้ว (Mature networks) หรือนำมาประยุกต์ใช้ในการวางแผนเครือข่ายกรณีที่ไม่มีโครงสร้างเครือข่ายมาก่อน (Greenfield)

2.2 ปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา งานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับปัญหาในการออกแบบเครือข่ายบรอดแบนด์ไร้สายส่วนใหญ่เน้นเรื่องการออกแบบโครงสร้างพื้นฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่เช่น

งานวิจัย [3, 4] ได้เสนอวิธีการเลือกตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานที่ดีที่สุด รวมถึงการเลือกพารามิเตอร์ที่สำคัญของสถานีฐาน เช่น

การเลือกประเภทสายอากาศ กำลังและทิศทางการส่งสัญญาณ เพื่อลดสถานีฐานให้มีจำนวนน้อยที่สุด นั่นคือลดค่าใช้จ่ายในการสร้างระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่นั่นเอง

ในช่วงที่ผ่านมางานวิจัยเกี่ยวกับการสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงผ่านเครือข่ายไวแมกซ์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก โดยได้มีการนำเสนอวิธีการออกแบบเครือข่ายบรอดแบรนด์ไวแมกซ์โดยใช้ข้อมูลภูมิศาสตร์สารสนเทศร่วมกับแบบจำลองการสูญเสียของสัญญาณในการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานในเบื้องต้น [5-10] โดยในงานวิจัย [5, 6] ได้ทำการศึกษาถึงประสิทธิภาพของเครือข่ายไวแมกซ์ในทางทฤษฎีโดยใช้แบบจำลองระบบ ส่วนงานวิจัย [7-10] ได้ทำการประเมินประสิทธิภาพจากเครือข่ายจริง ซึ่งเป็นการใช้งานสื่อสารในด้านต่างๆ เช่น งานด้านการศึกษา งานด้านสุขภาพ งานบริการระบบเหตุฉุกเฉิน รวมไปถึงการใช้งานในย่านธุรกิจและที่อยู่อาศัย โดยได้ทำการพิจารณาประสิทธิภาพเครือข่ายในด้านปริมาณงาน (Throughput) พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ (signal coverage area) และค่าสัญญาณพาหะต่อสัญญาณรบกวน (carrier to interference ratio)

นอกจากนี้ที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอการใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเลขจำนวนเต็ม (Integer Programming) เพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสร้างเครือข่ายไวแมกซ์ [12-16] โดยในงานวิจัย [12-14] ได้พิจารณาถึงปัญหาการออกแบบโครงสร้างพื้นฐานที่จำเป็นของเครือข่ายบอร์ดแบนด์ไร้สายไวแมกซ์ประเภทหนึ่งช่วงเชื่อมต่อ (single hop) กล่าวคือเครื่องผู้ใช้จะรับส่งสัญญาณกับสถานีฐานไวแมกซ์โดยตรง โดยไม่มีการใช้สถานีรีเลย์ (relay station) ซึ่งแต่ละงานวิจัยแตกต่างกันในส่วนของประเด็นและเงื่อนไขที่พิจารณาในการออกแบบเครือข่าย โดยงานวิจัย [12] ได้พิจารณาค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและซ่อมบำรุงสถานีฐาน และพิจารณาเงื่อนไขเรื่องพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ ปริมาณทราฟฟิกที่สามารถรองรับได้ และระดับของสัญญาณรบกวนในเครือข่าย งานวิจัย [13] นำเสนอปัญหาการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ที่ทำการกำหนดตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งสถานีฐาน รวมถึงการกำหนดจำนวนลำคลื่น และจำนวนคลื่นพาหะที่เหมาะสมที่สุด โดยได้พิจารณาเรื่องค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีฐาน กำลังส่งสัญญาณและความจุของทราฟฟิกในการให้บริการ ส่วนงานวิจัย [14] ได้พิจารณาเรื่องของค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่าย การซ้อนทับของพื้นที่ครอบคลุม ระดับการให้บริการ และรายได้จากการให้บริการ

สำหรับงานวิจัย [15,16] ได้พิจารณาถึงปัญหาการออกแบบโครงสร้างพื้นฐานของเครือข่ายบอร์ดแบนด์ไร้สายไวแมกซ์ประเภทสองช่วงเชื่อมต่อ (double-hop) นั่นคือได้มีการติดตั้งสถานีรีเลย์ในเครือข่ายเพื่อขยายพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ โดยที่เครื่องผู้ใช้สามารถรับส่งสัญญาณกับสถานีรีเลย์จากนั้น

สถานีรีเลย์ก็จะส่งสัญญาณต่อไปให้สถานีฐานไวแมกซ์ งานวิจัย [15, 16] กล่าวถึงการกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานไวแมกซ์และสถานีรีเลย์โดยมีวัตถุประสงค์ในการวางจุดที่ตั้งให้เหมาะสมกับความต้องการของผู้ใช้ รวมถึงการพิจารณาเรื่องค่าใช้จ่ายในการสร้างเครือข่าย

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบเครือข่ายบรอดแบนด์ไร้สาย โดยเฉพาะงานวิจัยที่เกี่ยว กับการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ พบว่างานวิจัยที่ผ่านมามีข้อจำกัดอยู่ที่การกำหนดตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานและสถานีรีเลย์แบบสองช่วงเชื่อมต่อ ซึ่งอาจทำให้พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณไม่ทั่วถึง ดังนั้นโครงการวิจัยที่นำเสนอนี้จึงมุ่งพัฒนาวิธีการออกแบบและวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการใช้สถานีรีเลย์หลายช่วงเชื่อมต่อ ภายใต้การสนับสนุนทางเทคนิคของมาตรฐาน IEEE 802.16j ซึ่งจะทำให้สามารถทำการขยายพื้นที่สัญญาณครอบคลุมไปยังบริเวณที่ห่างไกลที่ขาดแคลนระบบสายสัญญาณโทรคมนาคมพื้นฐานอย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้งบประมาณที่มีอย่างจำกัดได้

2.3 การวางแผนเครือข่ายบรอดแบนด์ไร้สาย

ผู้ให้บริการเครือข่ายบรอดแบนด์ไร้สายต้องการลดงบประมาณในการลงทุน ในขณะที่ยังสามารถให้บริการแก่ผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ การประยุกต์ใช้งานเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการใช้สถานีรีเลย์จึงมีประโยชน์ในแง่ของการขยายพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณและเพิ่มความจุของเครือข่าย โดยที่สถานีรีเลย์นั้นสามารถประยุกต์ใช้งานกับเครือข่ายได้หลายวิธี และสามารถเชื่อมต่อในแนวเส้นสายตา (line of sight) หรือนอกแนวเส้นสายตา (non-line of sight) กับสถานีฐาน และสถานีลูกข่ายได้

แต่เดิมในการวางแผนเครือข่ายบรอดแบนด์ไร้สาย เช่นเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินจำนวนสถานีฐานและตำแหน่งสำหรับติดตั้ง เพื่อให้สัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการอย่างทั่วถึง และมีความจุเพียงพอในการรองรับปริมาณทราฟฟิกจากผู้ใช้บริการในพื้นที่ แต่เมื่อบ้านเมืองขยายตัว มีลักษณะสิ่งก่อสร้างภายในพื้นที่เปลี่ยนไป รวมถึงการขยายขอบเขตของพื้นที่ให้บริการและการเพิ่มขึ้นของปริมาณทราฟฟิกและจำนวนผู้ใช้บริการ ทำให้ผู้ให้บริการเครือข่ายบรอดแบนด์ไร้สายต้องทำการปรับปรุงและขยายเครือข่าย หรือสร้างเครือข่ายเพิ่มเติม ในกรณีนี้การประยุกต์ใช้เครือข่ายไวแมกซ์ที่ใช้สถานีรีเลย์หลายช่วงเชื่อมต่อจะช่วยให้ผู้ให้บริการหรือผู้ประกอบการทำการขยายเครือข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพภายในวงเงินงบประมาณที่จำกัด

ในการวางแผนเครือข่ายบรอดแบนด์ไร้สาย เช่น เครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ และเครือข่ายไวแมกซ์ จะต้องพิจารณาพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ รวมถึงต้องใช้ความรู้พื้นฐานในการวิเคราะห์พื้นที่ครอบคลุม และการวิเคราะห์ความจุของเครือข่าย ซึ่งจะได้อธิบายในหัวข้อต่อไปนี้

2.3.1 พารามิเตอร์ที่พิจารณาในการวางแผนเครือข่าย

ในการวางแผนเครือข่ายบรอดแบนด์ไร้สาย เพื่อหาจำนวนสถานีฐานและจำนวนสถานีรีเลย์ รวมถึงตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้ง จะต้องทำการวิเคราะห์พื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ และการแทรกสอดของสัญญาณ รวมถึงวิเคราะห์ความจุของเครือข่าย ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวจะต้องพิจารณาถึงความต้องการทางเทคนิค ลักษณะการแผ่กระจายสัญญาณและความต้องการด้านการตลาด ซึ่งพารามิเตอร์ที่เป็นข้อมูลอินพุตสำหรับประเมินขนาดพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณ คุณภาพสัญญาณ และความจุของเครือข่ายได้แก่

- พารามิเตอร์ด้านรายละเอียดของอุปกรณ์: พารามิเตอร์ในด้านรายละเอียดของอุปกรณ์นั้นประกอบไปด้วย กำลังส่งของสถานีฐาน สถานีรีเลย์และสถานีลูกข่าย ค่าการลดทอนของท่อนำสัญญาณ กำลังขยายของสายอากาศ คุณลักษณะด้านการรองรับแบนด์วิดท์ รวมถึงความสูงของสถานีฐาน สถานีรีเลย์และสถานีลูกข่าย
- พารามิเตอร์ด้านรายละเอียดทางการตลาด: อินพุตทางการตลาดประกอบไปด้วยพื้นที่สำหรับให้บริการผู้ใช้งาน การคำนวณความต้องการการจราจรของข้อมูลต่อผู้ใช้งานหนึ่งรายสำหรับช่วงปีแรก และการประเมินการเติบโตของปริมาณการใช้งานในอีก 5 หรือ 10 ปีข้างหน้า รวมถึงการครอบคลุมของเซลล์และการรับประกันอัตราเร็วการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน
- คุณลักษณะการแผ่กระจายสัญญาณและความต้องการแบนวิดท์: การพยากรณ์สัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการนั้นจำเป็นต้องใช้แบบจำลองการสูญเสียตามแนววิถี (Path loss model) เพื่อคำนวณงบประมาณของการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานกับสถานีรีเลย์ สถานีฐานกับสถานีลูกข่าย และสถานีรีเลย์กับสถานีลูกข่าย โดยแบบจำลองที่ใช้ควรใกล้เคียงกับการสูญเสียในสิ่งแวดล้อมจริง สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิธีของมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด (Stanford University Interim model : SUI model) [11] ซึ่งมีค่าแฟกเตอร์สำหรับแก้ไข ซึ่งปรับตามลักษณะสิ่งแวดล้อมของพื้นที่ให้บริการเครือข่าย ทำให้สามารถคำนวณค่าสัญญาณครอบคลุมได้ใกล้เคียงกับสิ่งแวดล้อมในพื้นที่จริง (หัวข้อที่ 2.4 อธิบายรายละเอียดของ SUI model)

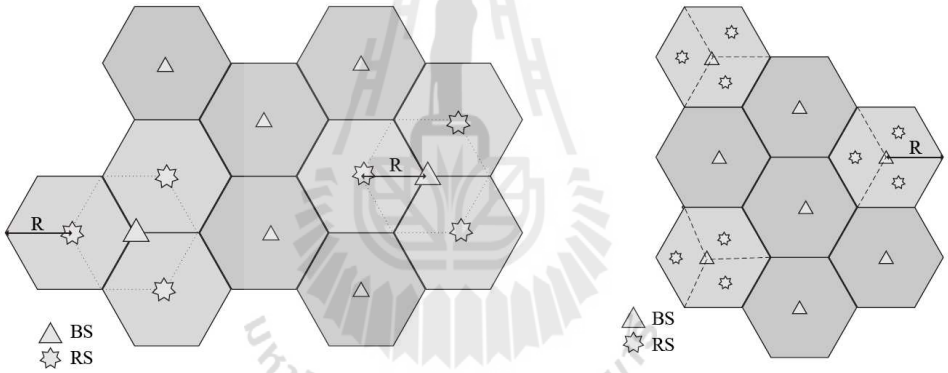
2.3.2 การวิเคราะห์พื้นที่ครอบคลุม

วัตถุประสงค์พื้นฐานของการใช้งานสถานีรีเลย์ คือช่วยในการขยายพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณให้กับเครือข่าย โดยติดตั้งสถานีรีเลย์ไว้ที่ปลายพิสัยของสัญญาณจากสถานีฐาน ซึ่งระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีรีเลย์ขึ้นอยู่กับคุณภาพสัญญาณที่ต้องดีพอสำหรับการการเชื่อมต่อสื่อสารระหว่างกัน

และต้องพิจารณาการซ้อนทับของพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณของสถานีฐานและสถานีรีเลย์ที่เหมาะสมด้วย เพื่อให้สามารถทำการย้ายข้ามเซลล์ได้

ในการคำนวณหารัศมีเซลล์สำหรับสถานีฐานและสถานีรีเลย์ จะต้องทำการวิเคราะห์ link budget ของค่าความแรงสัญญาณซึ่งแพร่กระจายจากสถานีฐานและสถานีรีเลย์ ซึ่งคำนวณได้โดยใช้สมการการสูญเสียกำลังตามแนววิถีระหว่างสถานีภาคส่ง และสถานีภาครับ ในงานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิธีของมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด (Stanford University Interim model : SUI model) จากการวิเคราะห์นี้จะได้ระยะทางระหว่างสถานีฐานกับสถานีรีเลย์ที่เหมาะสม กล่าวคือสามารถทำการเชื่อมต่อสื่อสารระหว่างสถานีทั้งสองได้อย่างมีคุณภาพ

รูปที่ 2.2 (ก) แสดงตัวอย่างการขยายพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณของสถานีฐานซึ่งแทนด้วยเส้นประ การขยายพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณทำได้โดยติดตั้งสถานีรีเลย์สามสถานีไว้ที่มุม จะทำให้พื้นที่ครอบคลุมการให้บริการของสถานีฐานขยายออกไปได้ โดยมีสถานีรีเลย์เป็นตัวเชื่อมต่อสัญญาณให้



(ก) วิธีขยายขนาดเซลล์ (ข) วิธีเพิ่มอัตราเร็วและความจุ

รูปที่ 2.2 วิธีขยายขนาดและเพิ่มอัตราเร็วในการให้บริการโดยใช้สถานีรีเลย์

2.3.3 การวิเคราะห์ความจุของเครือข่าย

ความจุของเครือข่าย ในที่นี้หมายถึงความสามารถของเครือข่ายในการรองรับปริมาณทราฟฟิกภายในพื้นที่ให้บริการ การวิเคราะห์ค่าความจุของเครือข่ายพิจารณาได้จากจำนวนและลักษณะการกระจายตัวของผู้ใช้บริการ รวมถึงปริมาณทราฟฟิกโดยเฉลี่ยของผู้ใช้บริการ นอกจากนี้ยังต้องพิจารณาพารามิเตอร์ของการรับ-ส่งสัญญาณของสถานีฐาน สถานีรีเลย์ และสถานีลูกข่ายด้วย

สถานีรีเลย์สามารถเพิ่มความจุและขีดความสามารถของการสื่อสารภายในพื้นที่ให้บริการได้ โดยติดตั้งสถานีรีเลย์ไว้ภายในรัศมีครอบคลุมสัญญาณของสถานีฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) ซึ่งจะทำ

ให้คุณภาพสัญญาณดีขึ้น กล่าวคือ เป็นการเพิ่มอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (Signal to Interference and Noise Ratio: SINR) นอกจากนี้ การติดตั้งสถานีรีเลย์ไว้ภายในรัศมีครอบคลุมสัญญาณของสถานีฐานสามารถช่วยลดกำลังส่งสัญญาณของสถานีลูกข่ายในการติดต่อกับเครือข่ายได้อีกด้วย

2.4 แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถี (Path Loss Model)

แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถี (Path Loss Model) เป็นสมการที่ใช้คำนวณค่าการลดทอนความแรงสัญญาณ เนื่องจากการสูญเสียของกำลังสัญญาณในการแพร่กระจายของสัญญาณจากสถานีภาคส่งถึงสถานีภาครับ ในการวางแผนเครือข่ายไร้สายนิยมใช้แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถีในการวิเคราะห์และประมาณค่าความแรงสัญญาณครอบคลุมพื้นที่จากสถานนีภาคส่ง

สำหรับในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถีของมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด (Stanford University Interim model : SUI model) [13, 14] ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้รับการแนะนำจากกลุ่มความร่วมมือไวแมกซ์และใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบไวแมกซ์อย่างแพร่หลาย

แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถีของมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ดมีคุณสมบัติที่ดีในการประเมินค่าการลดทอนสัญญาณสำหรับเครือข่ายไวแมกซ์ เนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ผ่านขั้นตอนการวิเคราะห์ให้ใกล้เคียงกับกฎของแบบรูปการแผ่กระจายของสัญญาณไมโครเวฟ และมีตัวแปรแฟคเตอร์แก้ไข (Correction Factor) เพื่อปรับค่ากำลังการสูญเสียให้ถูกต้องมากที่สุด และสอดคล้องกับสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ให้บริการมากที่สุด โดยแบบจำลองนี้ได้แบ่งประเภทสิ่งแวดล้อมและลักษณะของพื้นที่การแพร่กระจายสัญญาณระหว่างสถานีภาคส่งและสถานีภาครับเป็นสามประเภทคือ พื้นที่ประเภท A เป็นลักษณะภูมิประเทศที่มีภูเขาหรือต้นไม้ปกคลุมหนาแน่น พื้นที่ประเภท B เป็นพื้นที่ที่มีต้นไม้ปกคลุมปานกลาง และพื้นที่ประเภท C เป็นพื้นที่ที่มีต้นไม้เบาบางหรือพื้นที่โล่ง ซึ่งสมการของแบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถีของมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด แสดงในสมการที่ (2.1) ซึ่งเป็นผลรวมของการสูญเสียกำลังตามแนววิถีที่ระยะทางอ้างอิง (A) คำนวณจากสมการ (2.2) ค่าการสูญเสียกำลังตามระยะทาง (n) คำนวณจากสมการ (2.3) และแฟคเตอร์แก้ไขซึ่งประกอบไปด้วยแฟกเตอร์สำหรับค่าความถี่พาห์ (X_f) คำนวณจากสมการ (2.4) และแฟกเตอร์สำหรับค่าความถี่พาห์แยกตามชนิดของพื้นที่ (X_h) คำนวณจากสมการ (2.5) และ (2.6) รวมถึงแฟกเตอร์ของชาโดว์เฟดดิง (s) ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.1

$$PL = A + 10n\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_f + X_h + s \qquad (2.1)$$

โดยที่

$$A = 20\log_{10}\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) \tag{2.2}$$

$$n = a - bh_b + c/h_b \tag{2.3}$$

$$X_f = 6.0\log_{10}\left(\frac{f}{2000}\right) \tag{2.4}$$

$$X_h = -10.8\log_{10}\left(\frac{h_r}{2}\right) \quad \text{สำหรับพื้นที่ประเภท A และ B} \tag{2.5}$$

$$X_h = -20.0\log_{10}\left(\frac{h_r}{2}\right) \quad \text{สำหรับพื้นที่ประเภท C} \tag{2.6}$$

เมื่อ PL = ค่ากำลังการสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด

A = การสูญเสียกำลังตามแนววิธีที่ระยะทางอ้างอิง d_0

n = เอกซ์โพเนนท์การสูญเสียเชิงวิถี (Path loss exponent)

d = ระยะทาง (m.) ระหว่างสถานีภาคส่งกับสถานีลูกข่าย

d_0 = ระยะทางอ้างอิง (100 m.)

X_f = แฟกเตอร์แก้ไขสำหรับค่าความถี่ของคลื่นพาห์ (dB)

X_h = แฟกเตอร์แก้ไขสำหรับความสูงของสายอากาศของสถานีลูกข่าย (dB)

s = แฟกเตอร์ของชาโดว์เฟดดิง (Shadow fading factor) (dB)

h_b = ความสูงของสายอากาศของสถานีภาคส่ง (m.)

h_r = ความสูงของสายอากาศของสถานีลูกข่าย (m.)

f = ค่าความถี่ของคลื่นพาห์ (MHz)

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับ SUI Model แบ่งตามประเภทสิ่งแวดล้อมและลักษณะของพื้นที่

พารามิเตอร์	ลักษณะของพื้นที่		
	ประเภท A	ประเภท B	ประเภท C
a	4.6	4	3.6
b	0.0075	0.0065	0.0050
c	12.6	17.1	20
s	10.6 dB	9.6 dB	8.2 dB
s_{95}	17.4 dB	15.8 dB	13.5 dB

บทที่ 3
เทคนิคการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์เพื่อการสื่อสารข้อมูลที่มีประสิทธิภาพภายใต้งบประมาณการสร้างเครือข่ายที่จำกัด

ในการออกแบบและการวางแผนเครือข่ายบรอดแบนด์ไร้สายนั้น งบประมาณการสร้างเครือข่ายเป็นสิ่งสำคัญที่ผู้ให้บริการเครือข่ายต้องพิจารณา สำหรับการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีงบประมาณสำหรับลงทุนติดตั้งเครือข่ายจำกัด ผู้วางแผนเครือข่ายต้องทำการวางแผนเครือข่ายอย่างรอบคอบเพื่อให้งบประมาณที่ลงทุนติดตั้งเครือข่ายคุ้มค่ามากที่สุด การวางแผนเครือข่ายอย่างมีหลักการเพื่อให้เครือข่ายสามารถรับประกันคุณภาพการให้บริการสื่อสารข้อมูลแก่ผู้ใช้ ทั้งในด้านการรับประกันสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ และการรับประกันอัตราเร็วในการสื่อสารข้อมูลภายใต้งบประมาณที่จำกัดจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับผู้ประกอบการหรือผู้ให้บริการเครือข่าย เพื่อให้งบประมาณที่ลงทุนไปคุ้มค่า และนำกำไรกลับมาสู่ผู้ให้บริการเครือข่ายมากที่สุด

เนื้อหาในบทนี้อธิบายเทคนิคการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ที่ได้พัฒนาขึ้น โดยได้ประยุกต์ใช้โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (Binary Interger Programming) เพื่อช่วยในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพามิเตอร์ของการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ หัวข้อ 3.1 อธิบายนิยามปัญหาสำหรับการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ หัวข้อ 3.2 อธิบายการกำหนดตัวแปรและสมการคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ และหัวข้อสุดท้าย 3.3 อธิบายโปรแกรมสำหรับหาคำตอบของสมการเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.1 การนิยามปัญหาสำหรับการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์

การออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวางแผนเครือข่ายในส่วนของระบบไร้สาย ซึ่งเป็นการกำหนดการติดตั้งสถานีฐาน และสถานีรีเลย์เพื่อเพิ่มการรับประกันคุณภาพการให้บริการให้แก่ผู้ใช้งานจำนวนมากที่สุดภายใต้งบประมาณการลงทุนที่จำกัด โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีในการออกแบบ เพื่อกำหนดจำนวนและตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งสถานีฐาน (Base Station: BS) และสถานีรีเลย์ (Relay Station: RS) โดยสามารถรับประกันสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการและรับประกันอัตราเร็วในการสื่อสารข้อมูลให้กับผู้ใช้บริการ

ในงานวิจัยนี้การเลือกติดตั้งสถานีฐานและสถานีรีเลย์นั้น ตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีฐาน (Candidate Base Stations) และ ตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีรีเลย์ (Candidate Relay Stations) ผู้ออกแบบเครือข่ายได้กำหนดขึ้นในพื้นที่ที่ต้องการ ซึ่งในการกำหนดนั้นได้พิจารณาความเป็นไปได้ในการติดตั้งสถานีฐานและสถานีรีเลย์ เช่น ความยากง่ายในการเชื่อมระบบไฟฟ้ากำลังและระบบส่งสัญญาณ (Transmission Systems) ระหว่างสถานีฐานและสถานีรีเลย์เข้ากับเครือข่ายหลัก (Core Network) นอกจากนั้นยังพิจารณาถึงระยะเวลาสำหรับเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลเครือข่ายในการเข้าถึงอุปกรณ์เมื่อเกิดปัญหา หรืออาจพิจารณาจากสถานที่ที่มีโครงสร้างพื้นฐานอยู่แล้วทำให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้ง่ายและรวดเร็ว เช่นสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือสถานีวิทยุที่มีเสาสูงสำหรับส่งสัญญาณ ตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งเหล่านี้จะถูกนำเข้ากระบวนการคัดเลือกเพื่อใช้เป็นที่ตั้งสถานีฐานและสถานีรีเลย์ เมื่อผ่านกระบวนการคัดเลือกแล้ว จะได้จำนวนของสถานีฐานและสถานีรีเลย์ที่สามารถรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้ที่อยู่ในพื้นที่ให้บริการได้มากที่สุดภายใต้งบประมาณการติดตั้งเครือข่ายที่จำกัด

ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาคุณภาพการสื่อสารข้อมูลของเครือข่ายไวแมกซ์ในสองประเด็นคือ คุณภาพของอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูล และคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ที่ต้องการให้บริการเครือข่าย ในการวางแผนเครือข่ายได้พยายามให้ผู้ใช้งานได้รับการประกันคุณภาพในทั้งสองประเด็นให้มากที่สุดเท่าที่งบประมาณการลงทุนติดตั้งเครือข่ายจะอำนวย โดยการรับประกันคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมนั้นได้กำหนดจุดทดสอบสัญญาณ (Signal Test Points: STPs) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่จะทำการประเมินคุณภาพสัญญาณ ตำแหน่งเหล่านี้ถูกกำหนดให้กระจายตัวทั่วพื้นที่ให้บริการเพื่อรับประกันว่าในเครือข่ายที่ออกแบบนั้น ได้รับสัญญาณครอบคลุมอย่างทั่วถึง

ส่วนการรับประกันคุณภาพของอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูลนั้น ในการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ของงานวิจัยนี้ได้กำหนดจุดทดสอบอัตราเร็วบิตที่เรียกว่า Demand Points (DPs) ไว้ที่สถานที่ใด ๆ ก็ตามในพื้นที่ให้บริการที่มีผู้ใช้บริการอยู่จำนวนมาก เช่น สถานที่ราชการ สถานศึกษา แหล่งท่องเที่ยวและที่พักอาศัย ซึ่งจุดทดสอบอัตราเร็วบิต (DP) นี้ไม่เพียงรับประกันคุณภาพสัญญาณครอบคลุมถึง แต่ระดับสัญญาณยังต้องดีพอสำหรับการสื่อสารข้อมูลที่อัตราเร็วบิตได้สูงตามต้องการด้วย โดยในที่นี้พิจารณาการรับประกันอัตราการสื่อสารข้อมูลทางกายภาพ (Physical Data Rate) ให้ครอบคลุมพื้นที่ที่มีผู้ใช้บริการให้มากที่สุด

ในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาโครงสร้างของเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานและสถานีรีเลย์แบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-hop Relay Networks) กล่าวคือ มีการใช้สถานีรีเลย์เพื่อขยายพื้นที่ครอบคลุมสัญญาณของสถานีฐาน หรือปรับปรุงคุณภาพสัญญาณของพื้นที่บางส่วนที่อยู่ในขอบเขต

ครอบคลุมสัญญาณของสถานีฐานแต่ว่าอยู่ในจุดอับสัญญาณ โดยกำหนดให้ช่วงเชื่อมต่อ (Hop) ระหว่างผู้ใช้บริการกับสถานี้ฐานไม่เกิน 2 ช่วง นั่นคือ ผู้ใช้บริการสามารถสื่อสารกับสถานีฐานโดยตรง หรือเชื่อมต่อกับเครือข่ายผ่านสถานีถ่ายทอด 1 สถานี เหตุที่มีการจำกัดจำนวนช่วงเชื่อมต่อก็เพื่อไม่ให้เกิดเวลาหน่วงในการสื่อสารมากเกินไป ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของการสื่อสารประเภทมัลติมีเดียได้

3.2 การพัฒนาสมการคณิตศาสตร์

หัวข้อนี้นำเสนอสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบและวางแผนการติดตั้งสถานีฐานและสถานีรีเลย์ของเครือข่ายไวแมกซ์ โดยในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (Binary Interger Programming) ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข โดยที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ต้องการทำให้คุณภาพการบริการของเครือข่ายมีค่าสูงที่สุด ส่วนสมการเงื่อนไขเป็นการกำหนดข้อจำกัดเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของการเชื่อมต่อสัญญาณในส่วนของระบบไร้สายที่สามารถใช้สถานีรีเรย์เพื่อเชื่อมผู้ใช้เข้ากับเครือข่ายแบบหลายช่วงเชื่อมต่อได้ หัวข้อต่อไปนี้ได้นิยามตัวแปรต่างๆที่ใช้ในโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้น

3.2.1 การนิยามตัวแปร

ตัวแปรที่ใช้ประกอบด้วย เซท ตัวแปรตัดสินใจ (decision variables) และพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่ (constant parameters) ดังแสดงในตารางที่ 3.1, 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับตัวแปรเซท

สัญลักษณ์	คำนิยาม
B	เซทของตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีฐาน (Candidate Base Stations)
R	เซตของตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีรีเลย์ (Candidate Relay Stations)
D	เซตของตำแหน่งที่เป็นจุดทดสอบอัตราเร็วบิต (Demand points: DP)
T	เซตของตำแหน่งที่เป็นจุดทดสอบสัญญาณ (Signal Test Points: STP)

ตารางที่ 3.2 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับตัวแปรตัดสินใจ

สัญลักษณ์	คำนิยาม
β_j	ตัวแปรไบนารี {0, 1} ถ้า $\beta_j = 1$ หมายความว่าเลือกติดตั้งสถานีฐานที่ตำแหน่ง j แต่ถ้า $\beta_j = 0$ หมายความว่าไม่เลือกติดตั้งสถานีฐานที่ตำแหน่ง j เมื่อ $j \in B$
γ_i	ตัวแปรไบนารี {0, 1} ถ้า$\gamma_i = 1$ หมายความว่าเลือกติดตั้งสถานีรีเลย์ที่ตำแหน่ง i แต่ถ้า $\gamma_i = 0$ หมายความว่าไม่เลือกติดตั้งสถานีรีเลย์ที่ตำแหน่ง i เมื่อ $i \in R$
u_{hj}	ตัวแปรไบนารี {0, 1} ถ้า $u_{hj} = 1$ หมายความว่ากำหนดให้ STP h เชื่อมต่อกับสถานีฐานที่ตำแหน่ง j แต่ถ้า $u_{hj} = 0$ หมายความว่าไม่กำหนดให้ STP h เชื่อมต่อกับสถานีฐานที่ตำแหน่ง j เมื่อ $h \in T$ และ $j \in B$
v_{hi}	ตัวแปรไบนารี {0, 1} ถ้า $v_{hi} = 1$ หมายความว่ากำหนดให้ STP h เชื่อมต่อกับสถานีรีเลย์ที่ตำแหน่ง i แต่ถ้า $v_{hi} = 0$ หมายความว่าไม่กำหนดให้ STP h เชื่อมต่อกับสถานีรีเลย์ที่ตำแหน่ง i เมื่อ $h \in T$ และ $i \in R$
x_{gj}	ตัวแปรไบนารี {0, 1} ถ้า $x_{gj} = 1$ หมายความว่ากำหนดให้ DP g เชื่อมต่อกับสถานีฐานที่ตำแหน่ง j แต่ถ้า $x_{gj} = 0$ หมายความว่าไม่กำหนดให้ DP g เชื่อมต่อกับสถานีฐานที่ตำแหน่ง j เมื่อ $g \in D$ และ $j \in B$
y_{gi}	ตัวแปรไบนารี {0, 1} ถ้า $y_{gi} = 1$ หมายความว่ากำหนดให้ DP g เชื่อมต่อกับสถานีรีเลย์ที่ตำแหน่ง i แต่ถ้า $y_{gi} = 0$ หมายความว่าไม่กำหนดให้ DP g เชื่อมต่อกับสถานีรีเลย์ที่ตำแหน่ง i เมื่อ $g \in D$ และ $i \in R$
w_{ij}	ตัวแปรไบนารี {0, 1} ถ้า $w_{ij} = 1$ หมายความว่ากำหนดให้สถานีรีเลย์ i เชื่อมต่อกับสถานีฐานที่ตำแหน่ง j แต่ถ้า $w_{ij} = 0$ หมายความว่าไม่กำหนดให้สถานีรีเลย์ i เชื่อมต่อกับสถานีฐานที่ตำแหน่ง j เมื่อ $j \in B$ และ $i \in R$

ตารางที่ 3.3 สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่

สัญลักษณ์	คำนิยาม
F_j	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีฐาน $j, j \in B$
E_i	ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีรีเลย์ $i, i \in R$
C	งบประมาณการลงทุนสร้างเครือข่าย
P_t	ความแรงสัญญาณที่น้อยที่สุดที่สามารถสื่อสารผ่านเครือข่ายได้
P_d	ความแรงสัญญาณที่น้อยที่สุดที่สามารถรับประกันอัตราเร็วบิตข้อมูลได้
P_r	ความแรงสัญญาณที่น้อยที่สุดที่สถานีรีเลย์สามารถสื่อสารกับสถานีฐานได้
P_{hj}	ความแรงสัญญาณที่ STP h รับได้จากสถานีฐาน $j, h \in T$ และ $j \in B$
P_{hi}	ค่าความแรงสัญญาณที่ STP h รับได้จากสถานีรีเลย์ $i, h \in T$ และ $i \in R$
P_{gj}	ค่าความแรงสัญญาณที่ DP g รับได้จากสถานีฐาน $j, g \in D$ และ $j \in B$
P_{gi}	ค่าความแรงสัญญาณที่ DP g รับได้จากสถานีรีเลย์ $i, g \in D$ และ $i \in R$
P_{ij}	ค่าความแรงสัญญาณที่สถานีรีเลย์ i รับได้จากสถานีฐาน $j, i \in R$ และ $j \in B$

3.2.2 สมการเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีสำหรับวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบและวางแผนการติดตั้งสถานีฐานและสถานีรีเลย์ของเครือข่ายไวแมกซ์ โดยใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี ซึ่งประกอบด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการเงื่อนไข

(1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์แสดงในสมการที่ (3.1) เป็นฟังก์ชันที่ต้องการทำให้คุณภาพการบริการของเครือข่ายมีค่าสูงที่สุด (Maximize quality of services)โดยพิจารณาคุณภาพการบริการของเครือข่ายในสองประเด็นคือ คุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ที่ต้องการให้บริการเครือข่าย และคุณภาพของอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูล สำหรับคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมนั้นวัดจากจำนวนจุดทดสอบสัญญาณ (Signal Test Points: STPs) ที่มีคุณภาพสัญญาณผ่านเกณฑ์ที่ทำให้สามารถสื่อสารข้อมูลได้ ส่วนคุณภาพในเรื่องของอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูลนั้น วัดจากจำนวนจุดทดสอบอัตราเร็วบิต (Demand Points: DPs) ซึ่งสามารถสื่อสารที่อัตราเร็วบิตไม่ต่ำกว่าที่กำหนดไว้

$$Maximize \sum_{h\in T}(u_{hj}+v_{hi})+\sum_{g\in D}(x_{gj}+y_{gi}) \qquad (3.1)$$

(2) สมการเงื่อนไข (Constraints)

เงื่อนไขในการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์เป็นการกำหนดข้อจำกัดเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของการเชื่อมต่อสัญญาณในส่วนของระบบไร้สายที่สามารถใช้สถานีรีเรย์เพื่อเชื่อมผู้ใช้เข้ากับเครือข่ายแบบหลายช่วงเชื่อมต่อได้ ซึ่งผู้วิจัยได้แบ่งเงื่อนไขออกเป็นสี่กลุ่มคือ เงื่อนไขในเรื่องความจำกัดของงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่าย เงื่อนไขในเรื่องของคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ เงื่อนไขในเรื่องของคุณภาพของอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูล และเงื่อนไขการเชื่อมต่อระหว่างสถานีรีเลย์กับสถานีฐาน ซึ่งโครงสร้างของเครือข่ายไวแมกซ์ที่ได้จากการออกแบบ (นั่นคือจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐานและสถานีรีเลย์) ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ทั้งหมด

(2.1) เงื่อนไขในเรื่องความจำกัดของงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่าย

$$\sum_{j\in B}F_j\beta_j+\sum_{i\in R}E_i\gamma_i\le C \qquad ,j\in B,\ i\in R \qquad (3.2)$$

เงื่อนไขที่ (3.2) จำกัดงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่าย กล่าวคือ ผลรวมของค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีฐานและสถานีรีเลย์ต้องไม่เกินจำนวนงบประมาณที่ตั้งไว้

(2.2) เงื่อนไขในเรื่องของคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ

$$\sum_{j\in B}u_{hj}+\sum_{i\in R}v_{hi}\le 1 \qquad ,\forall h\in T \qquad (3.3)$$

$$u_{hj}\left(P_{hj}-P_t\right)\ge 0 \qquad ,\forall h\in T, j\in B \qquad (3.4)$$

$$v_{hi}\left(P_{hi}-P_t\right)\ge 0 \qquad ,\forall h\in T, i\in R \qquad (3.5)$$

$$u_{hj}\le\beta_j \qquad ,\forall h\in T, j\in B \qquad (3.6)$$

$$v_{hi}\le\gamma_i \qquad ,\forall h\in T, i\in R \qquad (3.7)$$

เงื่อนไขที่ (3.3) - (3.5) กำหนดการครอบคลุมของสัญญาณในพื้นที่ให้บริการ ซึ่งพื้นที่ให้บริการกำหนดโดยเซทของ STPs (T) โดยจะทำการประเมินความแรงของสัญญาณที่ STP h รับจากสถานีฐาน j (P_{hj}) หรือรับจากสถานีรีเลย์ i (P_{hi}) ซึ่งการที่จะสื่อสารผ่านเครือข่ายจากตำแหน่ง STP h ได้ ค่าความแรงสัญญาณ P_{hj} หรือ P_{hi} จะต้องมากกว่าค่าขีดแบ่ง (threshold) P_t เมื่อ $h \in T$, $i \in R$ และ $j \in B$

เงื่อนไขที่ (3.6) - (3.7) กำหนดการติดตั้งสถานีฐานที่ตำแหน่ง j หรือติดตั้งสถานีรีเลย์ที่ตำแหน่ง i ในกรณีที่ STP h เลือกที่จะสื่อสารกับสถานีฐานที่ตำแหน่ง j หรือสื่อสารกับสถานีรีเลย์ที่ตำแหน่ง i เมื่อ $h \in T$, $i \in R$ และ $j \in B$

(2.3) เงื่อนไขในเรื่องของคุณภาพของอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูล

$$\sum_{j \in B} x_{gj} + \sum_{i \in R} y_{gi} \leq 1 \qquad , \forall g \in D \qquad (3.8)$$

$$x_{gj}\left(P_{gj} - P_d\right) \geq 0 \qquad , \forall g \in D, j \in B \qquad (3.9)$$

$$y_{gi}\left(P_{gi} - P_d\right) \geq 0 \qquad , \forall g \in D, i \in R \qquad (3.10)$$

$$x_{gj} \leq \beta_j \qquad , \forall \mathrm{g} \in \mathrm{D}, \mathrm{j} \in \mathrm{B} \qquad (3.11)$$

$$y_{gi} \leq \gamma_j \qquad , \forall \mathrm{g} \in \mathrm{D}, \mathrm{i} \in \mathrm{R} \qquad (3.12)$$

เงื่อนไขที่ (3.8) - (3.10) กำหนดการรับประกันคุณภาพการสื่อสารข้อมูล โดยพิจารณาจากอัตราเร็วบิตข้อมูลที่เป็นไปได้ตามความแรงของสัญญาณที่ผู้ใช้บริการสื่อสารกับเครือข่าย ซึ่งกลุ่มเป้าหมายของผู้ใช้บริการกำหนดโดยเซทของ DPs (D) โดยจะทำการประเมินความแรงของสัญญาณที่ DP g รับจากสถานีฐาน j (P_{gj}) หรือรับจากสถานีรีเลย์ i (P_{gi}) ซึ่งการที่จะสื่อสารที่อัตราเร็วบิตข้อมูลที่กำหนดไว้ผ่านเครือข่ายจากตำแหน่ง DP g ได้ ค่าความแรงสัญญาณ P_{gj} หรือ P_{gi} จะต้องมากกว่าค่าขีดแบ่ง P_d เมื่อ $g \in D$, $i \in R$ และ $j \in B$

เงื่อนไขที่ (3.11) - (3.12) กำหนดการติดตั้งสถานีฐานที่ตำแหน่ง j หรือติดตั้งสถานีรีเลย์ที่ตำแหน่ง i ในกรณีที่ DP g เลือกที่จะสื่อสารกับสถานีฐานที่ตำแหน่ง j หรือสื่อสารกับสถานีรีเลย์ที่ตำแหน่ง i เมื่อ $g \in D$, $i \in R$ และ $j \in B$

(2.4) เงื่อนไขการเชื่อมต่อระหว่างสถานีรีเลย์กับสถานีฐาน

$$\sum_{j \in B} w_{ij} = \gamma_i \qquad , \forall i \in R \qquad (3.13)$$

$$w_{ij}\left(P_{ij} - P_r\right) \geq 0 \qquad , j \in B, i \in R \qquad (3.14)$$

$$w_{ij} \leq \beta_j \qquad , \forall \mathrm{i} \in \mathrm{R}, \mathrm{j} \in \mathrm{B} \qquad (3.15)$$

เงื่อนไขที่ (3.13) - (3.15) กำหนดช่วงเชื่อมต่อ (Hop) ระหว่างผู้ใช้บริการกับสถานีฐานแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-hop Relay Networks) โดยในงานวิจัยนี้กำหนดไว้ไม่เกิน 2 ช่วง นั่นคือ ผู้ใช้บริการสามารถสื่อสารกับสถานีฐานโดยตรง หรือเชื่อมต่อกับเครือข่ายผ่านสถานีรีเลย์ 1 สถานี เหตุที่มีการจำกัดจำนวนช่วงเชื่อมต่อก็เพื่อไม่ให้เกิดเวลาหน่วงในการสื่อสารมากเกินไป ซึ่งจะส่งผลต่อคุณภาพของการสื่อสารประเภทมัลติมีเดียได้ โดยเงื่อนไขที่ (3.13) กำหนดว่าหากมีการติดตั้งสถานีรีเลย์ที่ตำแหน่ง i ต้องมีการเชื่อมต่อสถานีรีเลย์นี้กับสถานีฐานหนึ่งสถานี เงื่อนไขที่ (3.14) กำหนดว่า สถานีรีเลย์ i จะสามารถเชื่อมต่อกับ สถานีฐาน j ได้ก็ต่อเมื่อความแรงสัญญาณที่สถานีรีเลย์ i รับได้จากสถานีฐาน j ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่าค่าขีดแบ่ง (threshold) P_r.และสุดท้าย เงื่อนไขที่ (3.15) กำหนดว่าหากมีการเลือกเชื่อมต่อสถานีรีเลย์ i กับสถานีฐาน j จะต้องทำการติดตั้งสถานีฐานที่ตำแหน่ง j นั่นคือ หาก w_{ij}= 1 แล้วจะส่งผลให้ β_j = 1

3.3 โปรแกรมสำหรับหาคำตอบของสมการเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี

ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับสมการทางคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีที่ใช้ในการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์นั้น ผู้วิจัยได้ประยุกต์ใช้โปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio โดยได้ทำการแปลงสมการเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีให้เป็นคำสั่งในโปรแกรม ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.3.1 ส่วนหัวข้อที่ 3.3.2 อธิบายรายละเอียดหน้าต่างการใช้งานโปรแกรม

3.3.1 การแปลงสมการเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีเป็นคำสั่งในโปรแกรม

การแปลงสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีจากหัวข้อที่ 3.3.2 ให้เป็นคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio แสดงในตารางที่ 3.4 ซึ่งประกอบด้วยการกำหนดตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (3.1) และเงื่อนไข (3.2) - (3.15)

ตารางที่ 3.4 แสดงการแปลงสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีเป็นคำสั่งในโปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio

สมการจากหัวข้อ 3.2.2	คำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE
ตัวแปรตัดสินใจ	//Decision Variable
β_j	dvar int B[BS] in 0..1;
γ_i	dvar int r[RS] in 0..1;
u_{hj}	dvar int u[BS][TP] in 0..1;
v_{hi}	dvar int v[RS][TP] in 0..1;
x_{gj}	dvar int x[BS][DP] in 0..1;
y_{gi}	dvar int y[RS][DP] in 0..1;
w_{ij}	dvar int w[BS][RS] in 0..1;
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์	//Objective Function
สมการ(3.1)	Minimize sum(j in BS) B[j]*Cb+ sum(i in RS) r[i]*Cr;
เงื่อนไข	subject to
สมการ(3.2)	{ct1:forall (h in TP) sum(j in BS) u[j][h]+ sum(i in RS) v[i][h] >= 1;
สมการ(3.3)	ct2:forall (h in TP) forall (j in BS) u[j][h]<=B[j];
สมการ(3.4)	ct3:forall (h in TP) forall (i in RS) v[i][h]<=r[i];
สมการ(3.5)	ct4:forall (h in TP) forall (j in BS) u[j][h]*(m[j][h]-Ptp)>=0;
สมการ(3.6)	ct5:forall (h in TP) forall (i in RS) v[i][h]*(n[i][h]-Ptp)>=0;
สมการ(3.7)	ct6:forall (g in DP) sum(j in BS) x[j][g]+ sum(i in RS) y[i][g] >= 1;
สมการ(3.8)	ct7:forall (g in DP) forall (j in BS) x[j][g]<=B[j];
สมการ(3.9)	ct8:forall (g in DP) forall (i in RS) y[i][g]<=r[i];
สมการ(3.10)	ct9:forall (j in BS) forall (g in DP) x[j][g]*(o[j][g]-Pdp)>=0;
สมการ(3.11)	ct10:forall (i in RS) forall (g in DP) y[i][g]*(p[i][g]-Pdp)>=0;
สมการ(3.12)	ct11:forall (i in RS) sum (j in BS) w[j][i]==r[i];
สมการ(3.13)	ct12:forall (j in BS) forall (i in RS) w[j][i]<=B[j];
สมการ(3.14)	ct13:forall (j in BS) forall (i in RS) w[j][i]*(l[j][i]-Prs)>=0;}

3.3.2 ส่วนประกอบของโปรแกรม

รูปที่ 3.1 แสดงหน้าต่างโปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio ซึ่งมีรายละเอียดและหน้าที่การทำงานดังนี้

หมายเลข 1 (OPL Project) แสดงไฟล์โครงการ (Project) ที่กำลังเปิดอยู่ สำหรับการคำนวณหาคำตอบแต่ละครั้งจำเป็นต้องมีไฟล์ครบทั้ง 3 ไฟล์ ประกอบไปด้วย โมเดลไฟล์ (*.mod) ดาต้าไฟล์ (*.dat) และ เซตติ้งไฟล์ (*.ops)

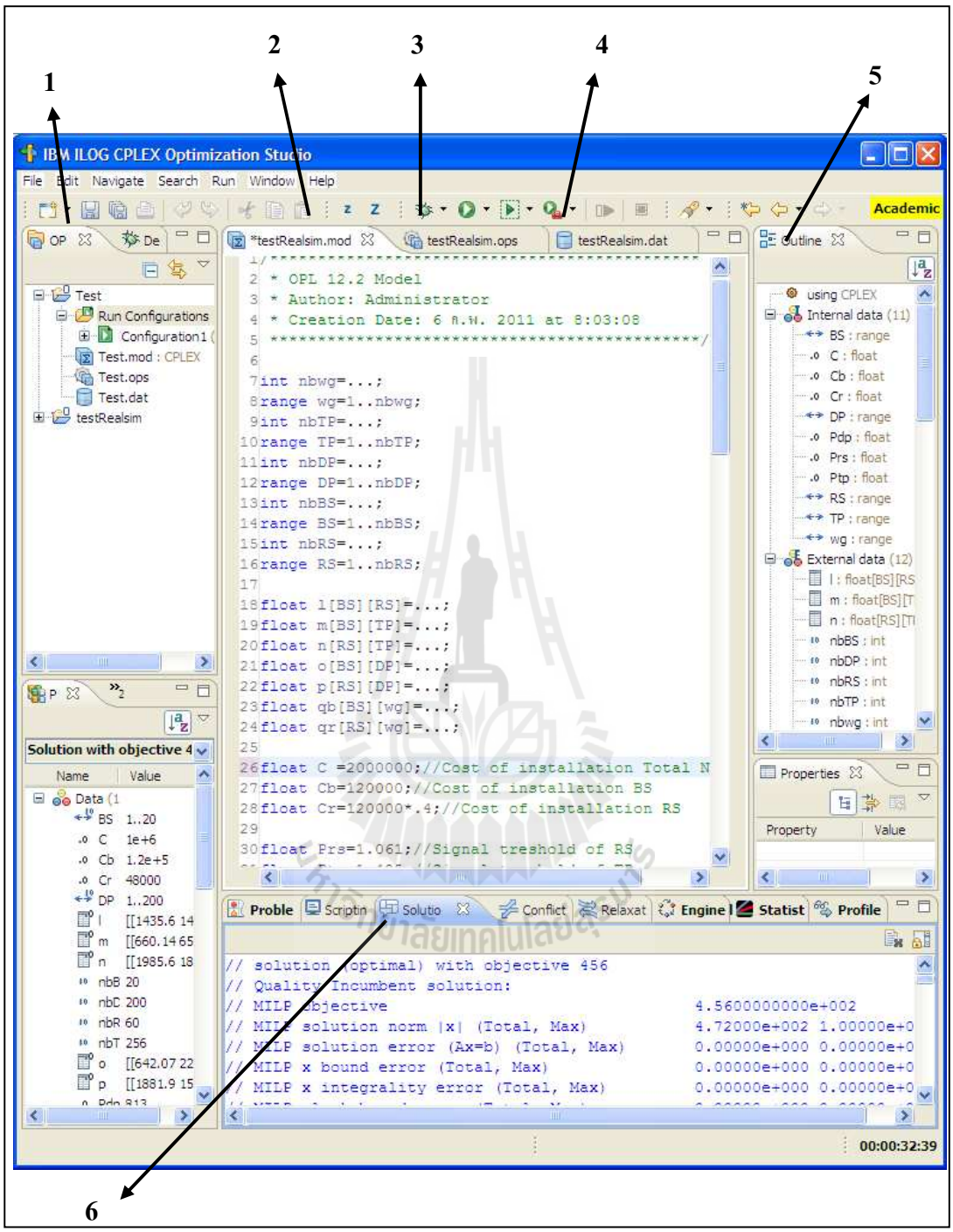
หมายเลข 2 (Model File Editing Area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่คำสั่งที่ใช้คำนวณหาค่าที่ดีที่สุด โดยคำสั่งเหล่านี้ได้ทำการแปลงมาจากสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี ซึ่งประกอบไปด้วย ตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ เงื่อนไข

หมายเลข 3 (Data File Editing Area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่ข้อมูลที่เป็นตัวแปร ทั้งที่อยู่ในรูปของตัวแปรค่าเดียว และในรูปของเมตริกซ์ (Matrix) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกเรียกใช้ในการคำนวณโดยคำสั่งในโมเดลไฟล์

หมายเลข 4 (Setting File Editing Area) แสดงหน้าต่างสำหรับตั้งค่าพารามิเตอร์ เพื่อคำนวณคำตอบที่ดีที่สุดให้กับโปรแกรม เช่น การจำกัดเพดานของเวลาและหน่วยความจำ (Memory) ที่ใช้ในการคำนวณ

หมายเลข 5 (Outline View) แสดงโครงสร้างของข้อมูลที่อยู่ในหน้าต่างของ โมเดลไฟล์ ดาต้าไฟล์ และ เซตติ้งไฟล์ และจัดเรียงข้อมูลให้แสดงในรูปแบบรายการเพื่อง่ายต่อการตรวจสอบและค้นหา

หมายเลข 6 (Solutions Log Area) แสดงคำตอบที่โปรแกรมทำการคำนวณพบ และพิจารณาว่าน่าจะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดได้ (Feasible Solution) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกบันทึกไว้เรื่อย ๆ จนกระทั่งโปรแกรมทำการคำนวณพบคำตอบที่ดีที่สุด (Final Solution)



รูปที่ 3.1 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOC CPLEX Optimization Studio

บทที่ 4
การทดลองออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์และการวิเคราะห์ผล

เนื้อหาในบทนี้สาธิตการใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีที่ได้อธิบายในบทที่ 3 ในการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์แบบหลายช่วงเชื่อมต่อ โดยเนื้อหาในหัวข้อที่ 4.1 เป็นการทดลองออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ภายใต้การจำกัดงบประมาณลงทุน หัวข้อที่ 4.2 ศึกษาการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์สำหรับเขตในเมืองนครราชสีมา และหัวข้อที่ 4.3 เป็นการสรุปผลการทดลอง

4.1 การทดลองออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ภายใต้การจำกัดงบประมาณลงทุน

หัวข้อนี้เป็นการทดลองใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ในการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ โดยการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ที่พิจารณาในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวางแผนเครือข่ายในส่วนของระบบไร้สาย ซึ่งเป็นการกำหนดสถานที่ติดตั้งสถานีฐาน และสถานีรีเลย์เพื่อเพิ่มการรับประกันคุณภาพการให้บริการให้แก่ผู้ใช้งานจำนวนมากที่สุดภายใต้งบประมาณการลงทุนที่จำกัด ตามที่ได้อธิบายรายละเอียดในบทที่ 3

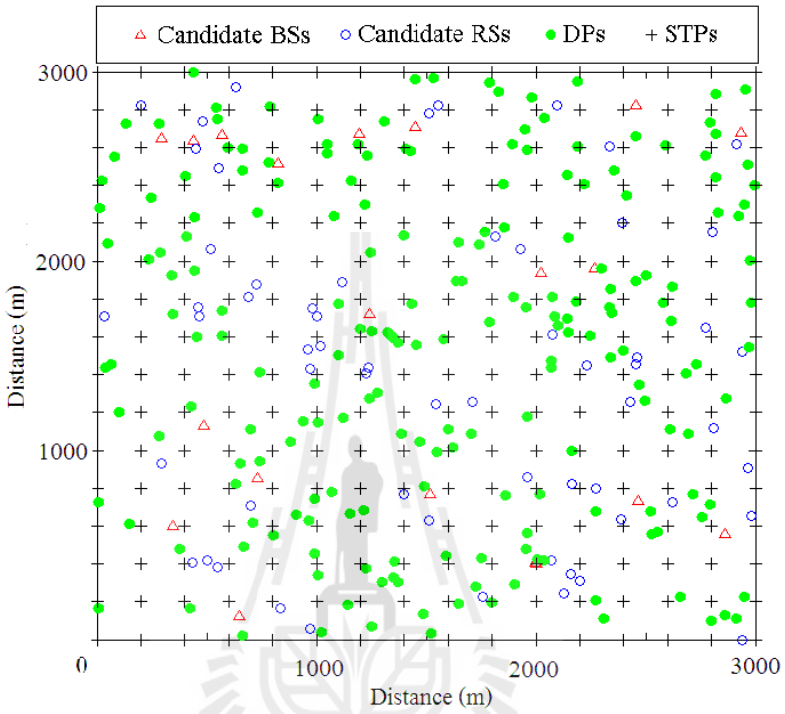
4.1.1 พารามิเตอร์และลักษณะพื้นที่ให้บริการที่ใช้ในการทดลอง

ลักษณะพื้นที่ให้บริการเครือข่ายไวแมกซ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงในรูปที่ 4.1 เป็นพื้นที่ขนาด 9 ตารางกิโลเมตร (3กม.x3กม.) ในรูปได้แสดงลักษณะการกระจายตัวของกลุ่มผู้ใช้บริการที่เป็นเป้าหมายของการให้บริการเครือข่ายไว้ด้วย

ในการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ในกรณีนี้ได้กำหนดตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับเลือกติดตั้งสถานีฐาน (Candidate Base Stations) 20 ตำแหน่ง (แสดงด้วยสัญลักษณ์สามเหลี่ยมสีแดงในรูปที่ 4.1) และได้กำหนดตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีรีเลย์ (Candidate Relay Stations) 60 ตำแหน่ง (แสดงด้วยสัญลักษณ์วงกลมสีฟ้า (กรวง) ในรูปที่ 4.1)

การพิจารณาคุณภาพการสื่อสารข้อมูลของเครือข่ายไวแมกซ์ในการวางแผนเครือข่ายนั้น เราได้พิจารณาในสองประเด็นคือ ความทั่วถึงของการให้บริการในพื้นที่เป้าหมาย และอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูล โดยการประเมินความทั่วถึงของการให้บริการเครือข่ายนั้น พิจารณาจากคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่เป้าหมาย โดยได้กำหนดจุดทดสอบสัญญาณ (Signal Test Points: STPs) ที่จะใช้ในการประเมินคุณภาพสัญญาณทั้งหมด 256 จุดทดสอบ (แสดงด้วยสัญลักษณ์เครื่องหมายบวกในรูปที่

4.1) ส่วนคุณภาพของอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูลนั้น ได้กำหนดจุดทดสอบอัตราเร็วบิตที่เรียกว่า Demand Points (DPs) ไว้ที่ตำแหน่งการกระจายตัวของกลุ่มผู้ใช้บริการที่เป็นเป้าหมายของการให้บริการเครือข่ายซึ่งมีทั้งหมด 200 จุดทดสอบ (แสดงด้วยสัญลักษณ์จุดสีเขียว (ทึบ) ในรูปที่ 4.1)



รูปที่ 4.1 พื้นที่ให้บริการเครือข่ายไวแมกซ์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 4.1 แสดงพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่สำหรับใช้ในการทดลอง โดยกำหนดค่ากำลังส่งสัญญาณจากสถานีฐานและสถานีรีเลย์เท่ากับ 35 dBm ซึ่งเป็นค่าที่ใช้โดยทั่วไปในเครือข่ายไวแมกซ์ [4] ส่วนราคาของอุปกรณ์สำหรับติดตั้งสถานีฐาน และสถานีรีเลย์เป็นราคาประมาณที่ได้จากตัวแทนจำหน่ายอุปกรณ์ [12] พารามิเตอร์อื่นๆได้พิจารณาใช้ค่าจากมาตรฐาน WiMAX IEEE 802.16

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่จะต้องรับได้ เพื่อให้ผู้ใช้บริการสามารถทำการสื่อสารที่อัตราเร็วบิตต่างๆได้ตามคุณลักษณะของวิธีการทำงานของเทคนิคมอดูเลตนั้นๆ โดยค่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำนี้จะใช้เป็นค่าของพารามิเตอร์ที่ใส่ให้สมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ พารามิเตอร์นี้ได้แก่ ความแรงสัญญาณที่น้อยที่สุดที่สามารถสื่อสารผ่านเครือข่ายได้ (P_l) ความแรงสัญญาณที่น้อยที่สุดที่สามารถรับประกันอัตราเร็วบิตข้อมูลได้ (P_a) และพารามิเตอร์ความแรงสัญญาณที่น้อยที่สุดที่สถานีรีเลย์สามารถสื่อสารกับสถานีฐานได้ (P_r)

ในการประเมินค่าความแรงสัญญาณที่ DPs และ STPs นั้น ได้ทำการคำนวณโดยใช้สมการ Stanford University Interim (SUI) ซึ่งเป็นแบบจำลองสัญญาณสำหรับการส่งสัญญาณมาตรฐาน IEEE 802.16 [13, 14] (อธิบายในบทที่ 2) และนำค่าที่ได้จากการคำนวณไปกำหนดให้กับพารามิเตอร์ของสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่สำหรับใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่า
ความสูงของเสาสัญญาณที่ติดตั้งสายอากาศของสถานีฐานและสถานีรีเลย์	60 m
ความสูงสายอากาศของอุปกรณ์ผู้ใช้งาน	2 m
กำลังส่งสัญญาณจากสถานีฐานและสถานีรีเลย์	35 dBm
กำลังขยายสัญญาณของสายอากาศที่สถานีฐานและสถานีรีเลย์	16 dBi
กำลังขยายสัญญาณของสายอากาศที่อุปกรณ์ผู้ใช้งาน	2 dBi
ความถี่ของสัญญาณพาห์	2.5 GHz
ประเภทของลักษณะภูมิประเทศ (อ้างอิงจาก SUI model)	C
ความกว้างของช่องสัญญาณ	3.5 MHz
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับจุดทดสอบอัตราเร็วบิต (DPs)	12.71 Mbps
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับจุดทดสอบสัญญาณ (STPs)	5.64 Mbps
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 1 สถานีฐาน (F_j)	120,000 $
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 1 สถานีรีเลย์ (E_i)	48,000 $

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูเลต อัตราเร็วบิตและระดับสัญญาณขั้นต่ำในการทำงานที่อัตราเร็วบิตต่างๆ

วิธีการมอดูเลต	อัตราเร็วบิต (Mbps)	ระดับสัญญาณขั้นต่ำที่ควรรับได้ (dBm)
BPSK 1/2	1.41	-100
BPSK 3/4	2.12	-98
QPSK 1/2	2.82	-97
QPSK 3/4	4.23	-94
QAM 16 1/2	5.64	-91
QAM 16 3/4	8.47	-88
QAM 64 2/3	11.29	-83
QAM 64 3/4	12.71	-82

4.1.2 การวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลกับการออกแบบเครือข่ายแนวทางอื่น

หัวข้อนี้ได้แสดงการวิเคราะห์และการเปรียบเทียบเชิงเลข (numerical result analysis and comparisons) โดยได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ (ซึ่งต่อไปจะเรียกว่า MQoS ย่อมาจาก Maximize Quality of Service[1]) กับวิธีการวางแผนเครือข่ายแนวทางอื่น ได้แก่แนวทางกำหนดตำแหน่งสถานีฐานแบบสม่ำเสมอ (Uniform BS placement : UB) และแนวทางการประมาณตำแหน่ง (Estimating Approximation: EA) สำหรับแนวทาง UB นั้น ตำแหน่งในการติดตั้งสถานีฐานจะกำหนดให้กระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วพื้นที่ให้บริการ ส่วนแนวทาง EA นั้น ในการกำหนดตำแหน่งสถานีฐานได้ใช้หลักการหาจุดศูนย์รวมความโนมถ่วง (Center of gravity) ของกลุ่มผู้ใช้ในพื้นที่ให้บริการ

การหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ด้วยวิธี MQoS สำหรับพื้นที่ให้บริการที่อธิบายในหัวข้อที่ 4.1.1 ทำโดยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ที่จะมีการป้อนข้อมูลพารามิเตอร์ค่าคงที่ต่างๆ รวมถึงค่าความแรงสัญญาณที่รับได้จากสถานีฐานหรือสถานีรีเลย์ที่ตำแหน่งเลือกติดตั้งต่างๆ ซึ่งคำนวณได้จากสมการจำลองความแรงสัญญาณ Stanford University Interim (SUI) [13, 14] และทำการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์รุ่น Intel Centrino Core2 Duo Processor 2.0 GHz หน่วยความจำขนาด 2GB

[1] Maximize Quality of Service เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแนวทางการออกแบบเครือข่ายที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้

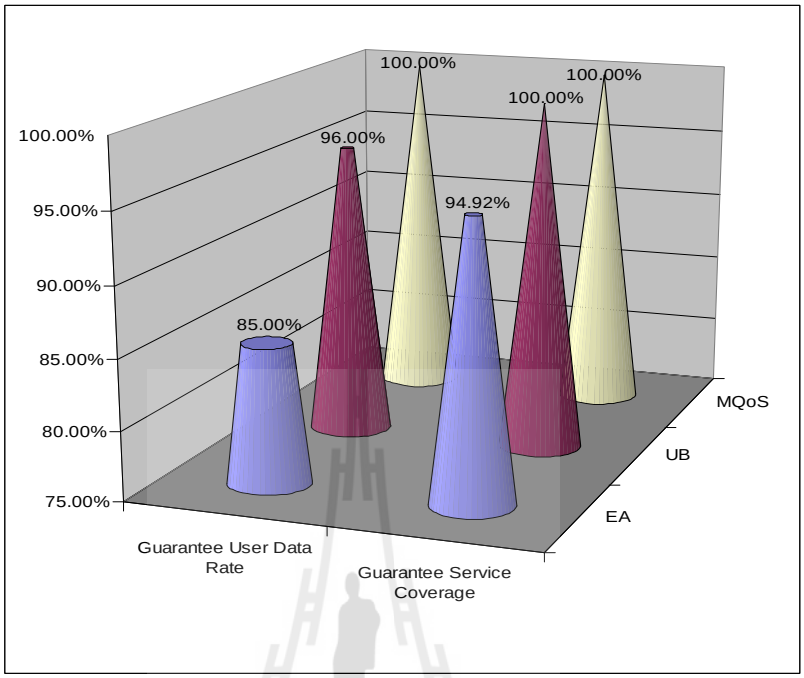
ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์สำหรับพื้นที่ให้บริการในรูปที่ 4.1 ด้วยการใช้วิธี MQoS UB และ EA ในที่นี้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ (performance matrices) ที่ใช้ในการเปรียบเทียบได้แก่ 1) ความจำกัดของงบประมาณ 2) จำนวนสถานีฐานและจำนวนสถานีรีเลย์ 3) คุณภาพการให้บริการซึ่งได้พิจารณาคุณภาพการสื่อสารข้อมูลของเครือข่ายไวแมกซ์ในสองประเด็นคือ คุณภาพของอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูล (user data rate guarantee) และคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ที่ต้องการให้บริการเครือข่าย (service coverage guarantee)

จากผลที่แสดงในตารางที่ 4.3 จะเห็นว่า การวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ด้วยวิธี MQoS ทำให้เครือข่ายที่ได้มีประสิทธิภาพในการให้บริการสื่อสารมากกว่าวิธีอื่นทั้งในกรณีที่จำกัดงบประมาณเครือข่ายที่ 400,000 US$ และ 800,000 US$ ซึ่งในกรณีที่จำกัดงบประมาณที่ 800,000 US$ วิธีวางแผนเครือข่ายแบบ MQoS ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ทำให้โครงสร้างเครือข่ายที่ได้มีคุณภาพการสื่อสารข้อมูลสูง กล่าวคือเครือข่ายที่ได้มีเปอร์เซนต์การรับประกันอัตราเร็วบิตข้อมูลตามที่กำหนดได้ 100% และ มีเปอร์เซนต์การรับประกันความทั่วถึงของการให้บริการในพื้นที่กำหนด 100%

รูปที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบคุณภาพการให้บริการเครือข่ายสำหรับกรณีที่ใช้งบประมาณจำกัดที่ 800,000 US$ จะเห็นได้ชัดว่าวิธี MQoS ทำให้ได้เครือข่ายไวแมกซ์ที่มีคุณภาพการให้สูงกว่าวิธี UB และ EA ทั้งในด้านคุณภาพของอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูล และคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ที่ต้องการให้บริการเครือข่าย

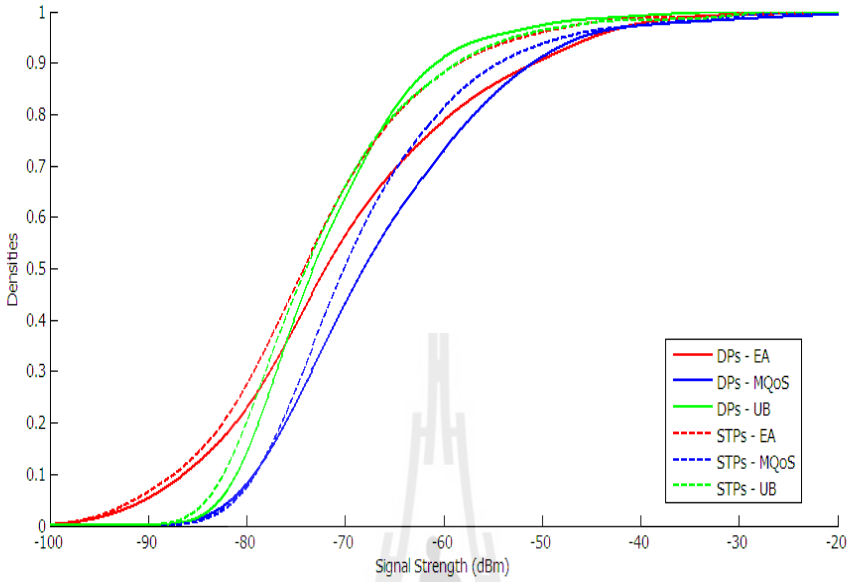
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์และการเปรียบเทียบเชิงเลข (numerical result analysis and comparisons)

Budget limitation (US$)	400,000			800,000		
Techniques	MQoS	UB	EA	MQoS	UB	EA
จำนวนสถานีฐานที่ใช้ในเครือข่าย	2	3	3	4	6	6
จำนวนสถานีรีเลย์ที่ใช้ในเครือข่าย	3	0	0	6	0	0
จำนวน DPs ที่ได้รับบริการที่อัตราเร็วบิตตามที่กำหนด	157	148	118	200	192	170
จำนวน STPs ที่อยู่ในเขตครอบคลุมสัญญาณ และสามารถรับบริการได้	244	240	236	256	256	243
เปอร์เซนต์การรับประกันอัตราเร็วบิต	78.50%	74.00%	59.00%	100.00%	96.00%	85.00%
เปอร์เซนต์การรับประกันความทั่วถึงของการให้บริการในพื้นที่กำหนด	95.31%	93.75%	92.19%	100.00%	100.00%	94.92%



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบคุณภาพการให้บริการเครือข่ายกรณีที่ใช้งบประมาณ 800,000 US$

ในการวิเคราะห์ลักษณะการแพร่กระจายของความแรงสัญญาณ (signal propagation characteristic) ในพื้นที่ให้บริการของรูปที่ 4.1 เราได้ใช้สมการจำลองความแรงสัญญาณ Stanford University Interim (SUI) [13, 14] สำหรับคำนวณค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ที่จุดทดสอบสัญญาณ STPs และจุดทดสอบอัตราเร็วบิตข้อมูล DPs ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งเป็นกราฟฟังก์ชันความหนาแน่นสะสม (Cumulative Density Function: CDF) ของค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ที่จุดทดสอบสัญญาณ STPs และจุดทดสอบอัตราเร็วบิต DPs (กรณีที่กำหนดงบประมาณจำกัดที่ 800,000 US$) จะเห็นได้ว่าเครือข่ายที่ได้จากการวางแผนเครือข่ายทั้ง 3 วิธี ทำให้ได้ลักษณะการแพร่กระจายของความแรงสัญญาณที่ต่างกันภายในพื้นที่ให้บริการ จากกราฟจะเห็นได้ว่า เครือข่ายไวแมกซ์ที่ออกแบบและวางแผนด้วยวิธี MQoS จะทำให้ได้ลักษณะการการจายตัวของความแรงสัญญาณที่ดีกว่า กล่าวคือตำแหน่งของเส้นกราฟของวิธี MQoS อยู่ทางขวาของเส้นกราฟของวิธี UB และEA นั่นคือมีค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ที่ STPs และ DPs สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการการจายตัวของความแรงสัญญาณที่ได้จากวิธี UB และ EA ลักษณะดังกล่าวนี้ส่งผลให้เครือข่ายไวแมกซ์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี MQoS สามารถให้บริการสื่อสารที่อัตราเร็วบิตที่สูงกว่าเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีอื่น



รูปที่ 4.3 กราฟฟังก์ชันความหนาแน่นสะสมของค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับที่จุดทดสอบสัญญาณ STPs และจุดทดสอบอัตราเร็วบิต DPs กรณีที่ใช้งบประมาณ 800,000 US$

4.2 การวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์สำหรับเขตในเมืองนครราชสีมา

หัวข้อนี้เป็นการทดลองใช้สมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ในการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ในพื้นที่เขตในเมืองนครราชสีมา

4.2.1 ลักษณะพื้นที่เขตในเมืองนครราชสีมาและพารามิเตอร์ที่ใช้ทดลอง

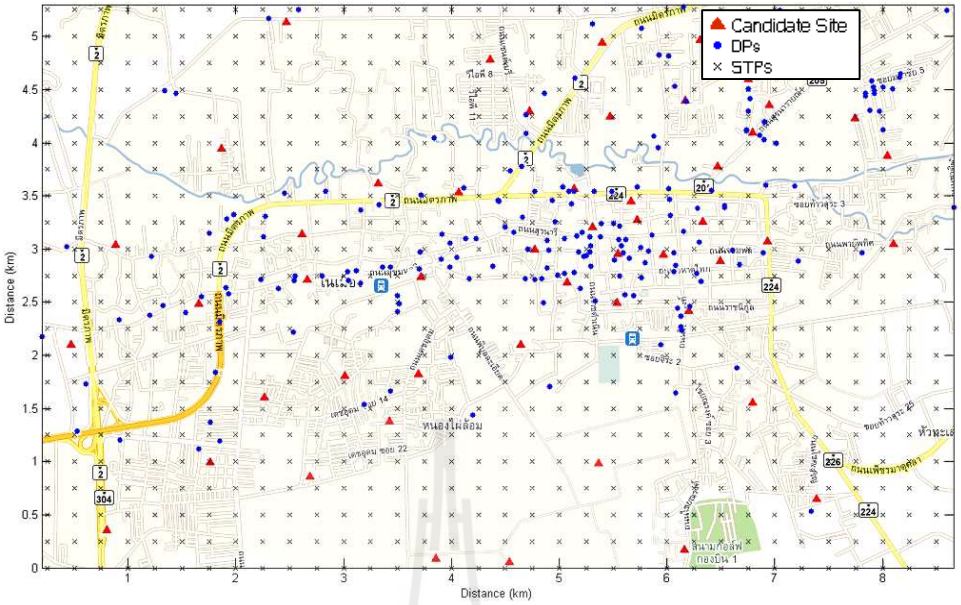
พื้นที่สำหรับการทดลองออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ในหัวข้อนี้คือเขตในเมืองนครราชสีมา ซึ่งมีความต้องการใช้งานการสื่อสารบอร์ดแบนด์สูง โดยพิจารณาขอบเขตของบริเวณให้บริการการสื่อสารภายในพื้นที่ 46 ตารางกิโลเมตร (5กม.x9กม.) ของเขตตัวเมือง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ในรูปได้แสดงลักษณะการกระจายตัวของกลุ่มผู้ใช้บริการที่เป็นเป้าหมายของการให้บริการเครือข่ายไว้ด้วย

สำหรับตำแหน่งที่เป็นไปได้ในการเลือกติดตั้งสถานีฐาน (Candidate Base Stations) และสถานีรีเลย์ (Candidate Relay Stations) ในการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ในกรณีนี้ได้พิจารณาใช้ตำแหน่งของสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบจีเอสเอ็ม ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานพร้อมอยู่แล้ว ได้แก่เสาสัญญาณ ระบบไฟฟ้ากำลัง และระบบเครือข่ายใยแก้วนำแสง ทำให้สามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างโครงสร้าง

พื้นฐานเหล่านี้ และสามารถติดตั้งอุปกรณ์เครือข่ายไวแมกซ์ได้ง่ายและรวดเร็ว จำนวนสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบจีเอสเอ็มที่พิจารณาสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ไวแมกซ์มีจำนวน 55 ตำแหน่ง (แสดงด้วยสัญลักษณ์สามเหลี่ยมสีแดงในรูปที่ 4.4) ซึ่งสามารถทำการเลือกติดตั้งทั้งสถานีฐานและสถานีรีเลย์ได้

การพิจารณาคุณภาพการสื่อสารข้อมูลของเครือข่ายไวแมกซ์ในการวางแผนเครือข่ายนั้น เราได้พิจารณาในสองประเด็นเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.3 คือ ความทั่วถึงของการให้บริการในพื้นที่เป้าหมาย และอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูล โดยการประเมินความทั่วถึงของการให้บริการเครือข่ายนั้น พิจารณาจากคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่เป้าหมาย โดยได้กำหนดจุดทดสอบสัญญาณ (Signal Test Points: STPs) ที่จะใช้ในการประเมินคุณภาพสัญญาณทั้งหมด 770 จุดทดสอบ (แสดงด้วยสัญลักษณ์เครื่องหมายกากบาทในรูปที่ 4.4) ส่วนคุณภาพของอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูลนั้น ได้กำหนดจุดทดสอบอัตราเร็วบิตที่เรียกว่า Demand Points (DPs) ไว้ที่ตำแหน่งการกระจายตัวของกลุ่มผู้ใช้บริการที่เป็นเป้าหมายของการให้บริการเครือข่าย ซึ่งคัดเลือกจากสถานที่ที่มีผู้ใช้บริการอยู่รวมกันจำนวนมาก เช่น สถานที่ราชการ สถานศึกษา แหล่งท่องเที่ยว และที่พักอาศัย ซึ่งในการทดลองนี้ได้กำหนดจุดทดสอบอัตราเร็วบิต DPs ทั้งหมด 207 จุดทดสอบ (แสดงด้วยสัญลักษณ์จุดสีน้ำเงินในรูปที่ 4.4)

ตารางที่ 4.4 แสดงพารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่สำหรับใช้ในการทดลองของหัวข้อนี้ โดยราคาของอุปกรณ์สำหรับติดตั้งสถานีฐาน และสถานีรีเลย์เป็นราคาประมาณที่ได้จากตัวแทนจำหน่ายอุปกรณ์ [4, 12] พารามิเตอร์อื่นๆได้พิจารณาใช้ค่าจากมาตรฐาน WiMAX IEEE 802.16 สำหรับค่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่ต้องรับได้เพื่อให้ผู้ใช้บริการสามารถทำการสื่อสารที่อัตราเร็วบิตที่ต้องการ ได้ใช้ค่าตามตารางที่ 4.2 กำหนดเป็นค่าของพารามิเตอร์ P_t P_d และ P_r ให้แก่สมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ ส่วนการประเมินค่าความแรงสัญญาณที่ DPs และ STPs นั้น ได้ทำการคำนวณโดยใช้สมการ Stanford University Interim (SUI) ซึ่งเป็นแบบจำลองสัญญาณสำหรับการส่งสัญญาณมาตรฐาน IEEE 802.16 [13, 14] โดยค่าที่ได้จากการคำนวณ ได้ถูกนำไปกำหนดให้กับพารามิเตอร์ของสมการคณิตศาสตร์สำหรับการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์



รูปที่ 4.4 พื้นที่ให้บริการเครือข่ายไวแมกซ์เขตในเมืองนครราชสีมา

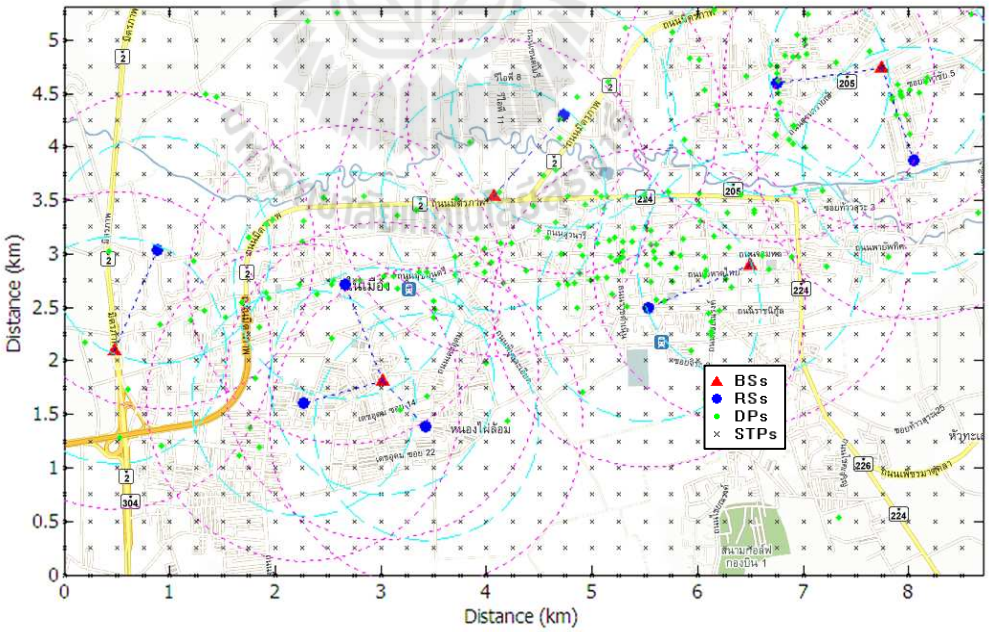
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ที่มีค่าคงที่สำหรับใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่า
งบประมาณการติดตั้งเครือข่าย ($\times 10^6$US$)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5
ความสูงของเสาสัญญาณที่ติดตั้งสายอากาศของสถานีฐานและสถานีรีเลย์	30 m
ความสูงสายอากาศของอุปกรณ์ผู้ใช้งาน	2 m
กำลังส่งสัญญาณจากสถานีฐานและสถานีรีเลย์	35 dBm
กำลังขยายสัญญาณของสายอากาศที่สถานีฐานและสถานีรีเลย์	16 dBi
กำลังขยายสัญญาณของสายอากาศที่อุปกรณ์ผู้ใช้งาน	2 dBi
ความถี่ของสัญญาณพาห์	2.5 GHz
ประเภทของลักษณะภูมิประเทศ (อ้างอิงจาก SUI model)	A
ความกว้างของช่องสัญญาณ	3.5 MHz
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับจุดทดสอบอัตราเร็วบิต (DPs)	12.71 Mbps
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับจุดทดสอบสัญญาณ (STPs)	5.64 Mbps
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 1 สถานีฐาน (F_j)	120,000 $
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 1 สถานีรีเลย์ (E_i)	48,000 $

4.2.2 ตัวอย่างโครงสร้างเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบ

การหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์สำหรับพื้นที่เขตในเมืองนครราชสีมา ทำโดยใช้โปรแกรม IBM ILOG CPLEX Optimization Studio ที่จะมีการป้อนข้อมูลพารามิเตอร์ค่าคงที่ต่างๆ รวมถึงค่าความแรงสัญญาณที่รับได้จากสถานีฐานหรือสถานีรีเลย์ที่ตำแหน่งเลือกติดตั้งต่างๆ ซึ่งคำนวณได้จากสมการจำลองความแรงสัญญาณ Stanford University Interim (SUI) [13, 14] และทำการประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์รุ่น Intel Centrino Core2 Duo Processor 2.0 GHz หน่วยความจำขนาด 2GB

รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างเครือข่ายไวแมกซ์ที่ได้จากการออกแบบในกรณีที่ใช้งบประมาณในการติดตั้งเครือข่ายหนึ่งล้านเหรียญสหรัฐ รูปนี้แสดงให้เห็นตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐานและสถานีรีเลย์ที่เลือกติดตั้ง และบริเวณสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ จากการวิเคราะห์คุณภาพการให้บริการเครือข่ายปรากฏว่า โครงสร้างเครือข่ายไวแมกซ์ที่ได้จากการออกแบบสามารถให้บริการสื่อสารครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการได้อย่างทั่วถึง นั่นคือครอบคลุมพื้นที่ให้บริการที่กำหนด 100% และได้อัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูลตามที่ต้องการที่ทุกจุดทดสอบอัตราเร็วบิต DPs ที่กำหนดไว้ในการออกแบบ



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างโครงสร้างเครือข่ายไวแมกซ์ของพื้นที่เขตในเมืองนครราชสีมา

4.2.3 การวิเคราะห์คุณภาพการให้บริการเครือข่าย

หัวข้อนี้ได้แสดงการวิเคราะห์เชิงเลข (numerical analysis) สำหรับการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ของเขตในเมืองนครราชสีมาโดยใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งได้ทำการทดลองใน 2 กรณีคือ

1) กรณีที่ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบที่ไม่พิจารณาความแตกต่างของความสำคัญของจุดทดสอบอัตราเร็วบิต (DPS) และจุดทดสอบสัญญาณ (STPs) ซึ่งเป็นการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (3.1) ตามที่อธิบายในบทที่ 3 วิธีการในกรณีนี้เรียกว่า MQoS1
2) กรณีที่ใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์แบบที่พิจารณาความแตกต่างของความสำคัญของจุดทดสอบอัตราเร็วบิต (DPS) และจุดทดสอบสัญญาณ (STPs) ซึ่งเป็นการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (4.1) ซึ่งปรับปรุงจากสมการที่ (3.1) โดยมีการเพิ่มพารามิเตอร์ค่าถ่วงน้ำหนัก (w_i) ให้กับจุดทดสอบอัตราเร็วบิต (DPs) โดยที่แต่ละ DPs สามารถกำหนดให้มีค่าถ่วงน้ำหนักที่ต่างกันได้ เพื่อเพิ่มความสำคัญให้กับกลุ่มผู้ใช้บริการบางกลุ่มได้ตามต้องการ วิธีการในกรณีนี้เรียกว่า MQoS2

$$Maximize \sum_{h\in T}(u_{hj}+v_{hi})+\sum_{g\in D}w_i(x_{gj}+y_{gi}) \qquad (4.1)$$

ตารางที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์สำหรับพื้นที่ให้บริการในเขตเมืองนครราชสีมาด้วยการใช้วิธี MQoS1 และ MQoS2 เมื่อกำหนดให้ใช้งบประมาณการติดตั้งเครือข่ายที่ต่างกันในการออกแบบเครือข่าย ในที่นี้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพ (performance matrices) ของโครงสร้างเครือข่ายที่ได้จากกการออกแบบได้แก่ 1) ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเครือข่าย 2) จำนวนสถานีฐานและจำนวนสถานีรีเลย์ 3) คุณภาพการให้บริการซึ่งได้พิจารณาคุณภาพการสื่อสารข้อมูลของเครือข่ายไวแมกซ์ในสองประเด็นคือ คุณภาพของอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูล (user data rate guarantee) และคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ที่ต้องการให้บริการเครือข่าย (service coverage guarantee)

จากผลที่แสดงในตารางที่ 4.5 จะเห็นว่า ในกรณีที่ใช้งบประมาณในการติดตั้งเครือข่ายน้อย นั่นคือ 0.5 – 1.5 ล้านเหรียญสหรัฐ การออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ด้วยวิธี MQoS2 ทำให้ได้เครือข่ายที่มีประสิทธิภาพในการให้บริการสื่อสารดีกว่าวิธี MQoS1 กล่าวคือ เครือข่ายที่ออกแบบด้วยวิธี MQoS2 มีคุณภาพการแพร่กระจายสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ที่มีกลุ่มผู้ใช้บริการอยู่ได้ทั่วถึงกว่าเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี MQoS1 ซึ่งส่งผลให้เครือข่ายที่ออกแบบด้วยวิธี MQoS2 มีเปอร์เซนต์การรับประกันอัตราเร็วบิตที่สูงกว่า ส่วนในกรณีที่ใช้งบประมาณในการติดตั้งเครือข่ายที่สูงขึ้น คือ 2 - 2.5 ล้านเหรียญสหรัฐ วิธีวางแผนเครือข่ายแบบ MQoS1 และ MQoS2 ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ทำให้ได้โครงสร้าง

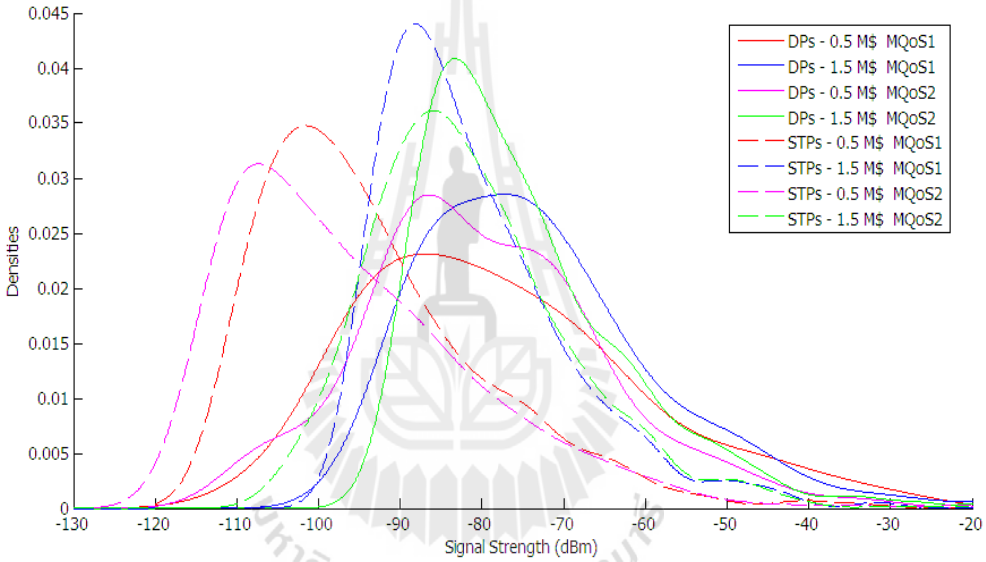
เครือข่ายที่มีคุณภาพการสื่อสารข้อมูลสูง กล่าวคือเครือข่ายที่ได้มีเปอร์เซนต์การรับประกันอัตราเร็วบิตข้อมูลตามที่กำหนดได้ 100% และ มีเปอร์เซนต์การรับประกันความทั่วถึงของการให้บริการในพื้นที่กำหนด 100%

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์และการเปรียบเทียบเชิงเลข (numerical result analysis and comparisons)

งบประมาณการติดตั้งเครือข่าย ($\times 10^6$US$)		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
ค่าติดตั้งเครือข่ายจริง ($\times 10^6$US$)	MQoS1	0.480	0.984	1.488	1.944	2.472
	MQoS2	0.480	0.984	1.464	1.992	2.472
จำนวนสถานีฐานที่ใช้ในเครือข่าย	MQoS1	2	7	10	15	19
	MQoS2	2	5	9	15	19
จำนวนสถานีรีเลย์ที่ใช้ในเครือข่าย	MQoS1	5	3	6	3	4
	MQoS2	5	8	8	4	4
จำนวน DPs ที่ได้รับบริการที่อัตราเร็วบิตตามที่กำหนด	MQoS1	156	160	197	207	207
	MQoS2	168	201	207	207	207
จำนวน STPs ที่อยู่ในเขตครอบคลุมสัญญาณ และสามารถรับบริการได้	MQoS1	418	699	768	770	770
	MQoS2	361	578	728	770	770
เปอร์เซนต์การรับประกันอัตราเร็วบิต	MQoS1	75.36%	77.29%	95.17%	100.00%	100.00%
	MQoS2	81.16%	97.10%	100.00%	100.00%	100.00%
เปอร์เซนต์การรับประกันความทั่วถึงของการให้บริการในพื้นที่กำหนด	MQoS1	54.29%	90.78%	99.74%	100.00%	100.00%
	MQoS2	46.88%	75.06%	94.55%	100.00%	100.00%

ในการวิเคราะห์ลักษณะการแพร่กระจายของความแรงสัญญาณ (signal propagation characteristic) ภายในพื้นที่เขตในเมืองนครราชสีมา เราได้ใช้สมการจำลองความแรงสัญญาณ Stanford University Interim (SUI) [13, 14] สำหรับคำนวณค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ที่จุดทดสอบสัญญาณ STPs และจุดทดสอบอัตราเร็วบิตข้อมูล DPs ผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นกราฟฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) ของค่าความแรงสัญญาณที่รับได้ที่จุดทดสอบสัญญาณ STPs และจุดทดสอบอัตราเร็วบิต DPs เราจะสังเกตได้ว่า ในกรณีที่ใช้งบประมาณในการติดตั้งเครือข่ายน้อย เช่นกรณี 05. ล้านเหรียญสหรัฐ คุณภาพสัญญาณที่รับได้ที่จุดทดสอบอัตราเร็ว

บิต (DPs) จะดีกว่าคุณภาพสัญญาณที่รับได้ที่จุดทดสอบสัญญาณ (STPs) ซึ่งหมายความว่า ในกรณีใช้งบประมาณในการติดตั้งเครือข่ายน้อย วิธีการออกแบบที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้จะเน้นการทำให้คุณภาพสัญญาณในบริเวณที่มีกลุ่มผู้ใช้อยู่หนาแน่นดีกว่าบริเวณอื่น และเมื่อกำหนดให้ใช้งบประมาณการติดตั้งเครือข่ายที่สูงขึ้น เช่นกรณี 1.5 ล้านเหรียญสหรัฐ คุณภาพของสัญญาณที่รับได้ที่จุดทดสอบสัญญาณ (STPs) จะดีขึ้น โดยมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับคุณภาพสัญญาณที่รับได้ที่จุดทดสอบอัตราเร็วบิต (DPs) ซึ่งหมายความว่าถ้าใช้งบประมาณในการติดตั้งเครือข่ายสูงขึ้น ลักษณะการแพร่กระจายสัญญาณภายในพื้นที่จะมีคุณภาพสัญญาณที่ดีสม่ำเสมอทั่วบริเวณเป้าหมายที่ต้องการให้บริการสื่อสารเครือข่าย



รูปที่ 4.6 กราฟฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็นของค่าความแรงสัญญาณที่ได้รับที่จุดทดสอบสัญญาณ STPs และจุดทดสอบอัตราเร็วบิต DPs

4.3 สรุปการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้ได้นำเสนอการใช้เทคนิควิธีที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ในการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ โดยได้ทำการทดลองออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ในหลายกรณี เช่น การจำกัดงบประมาณลงทุนที่แตกต่างกัน และการออกแบบเครือข่ายสำหรับพื้นที่เป้าหมายที่มีขนาดต่างกัน และมีลักษณะการกระจายตัวของกลุ่มผู้ใช้บริการสื่อสารต่างกัน นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครือข่ายไวแมกซ์ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ กับเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบด้วยแนวทางอื่น

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองในบทนี้ จะเห็นว่าการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ทำให้ได้โครงสร้างเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีประสิทธิภาพในการให้บริการสื่อสารดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีอื่นแม้ว่าจะมีงบประมาณที่จำกัดในการติดตั้งเครือข่าย กล่าวคือเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะมีคุณภาพการสื่อสารข้อมูลสูง ทั้งในด้านอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูล และคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ที่ต้องการให้บริการเครือข่าย

จากการทดลองใช้ค่าถ่วงน้ำหนักในฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความสำคัญให้กับบริเวณที่มีกลุ่มผู้ใช้กระจายอยู่ ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการเครือข่ายขึ้นได้อีกโดยเฉพาะในกรณีที่มีงบประมาณการติดตั้งเครือข่ายที่จำกัด จึงทำให้ได้เครือข่ายไวแมกซ์ที่สามารถรองรับผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่ากับงบประมาณที่ลงทุน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 5
สรุปงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยที่นำเสนอนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาเทคนิคการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์เพื่อการสื่อสารข้อมูลที่มีประสิทธิภาพภายใต้งบประมาณการสร้างเครือข่ายที่จำกัด โดยได้พัฒนาเทคนิคดังกล่าวในรูปของสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (Binary Interger Programming) เพื่อช่วยในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับพามิเตอร์ของการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวางแผนเครือข่ายในส่วนของระบบไร้สาย ซึ่งเป็นการกำหนดจำนวนและตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดสำหรับติดตั้งสถานีฐาน (Base Station: BS) และสถานีรีเลย์ (Relay Station: RS) เพื่อเพิ่มการรับประกันคุณภาพการให้บริการให้แก่ผู้ใช้งานจำนวนมากที่สุดภายใต้งบประมาณการลงทุนที่จำกัด โดยได้พิจารณาคุณภาพการสื่อสารข้อมูลของเครือข่ายไวแมกซ์ในสองประเด็นคือ คุณภาพของอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูล และคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ที่ต้องการให้บริการเครือข่าย โดยในการวางแผนเครือข่ายได้พยายามให้ผู้ใช้งานได้รับการประกันคุณภาพในทั้งสองประเด็นให้มากที่สุดเท่าที่งบประมาณการลงทุนติดตั้งเครือข่ายจะอำนวย

จากการทดลองที่ใช้เทคนิคที่ได้พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ในการออกแบบและวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ภายใต้เงื่อนไขความจำกัดของงบประมาณการติดตั้งเครือข่าย และได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารของเครือข่ายที่ได้กับเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการอื่น พบว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นมาในงานวิจัยนี้ทำให้ได้โครงสร้างเครือข่ายที่มีประสิทธิภาพการสื่อสารที่ดีกว่าเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีอื่น

จากการศึกษาผลกระทบของปัจจัยต่างๆในการวางแผนและออกแบบเครือข่าย ได้แก่ การจำกัดงบประมาณลงทุนที่แตกต่างกัน และการออกแบบเครือข่ายสำหรับพื้นที่เป้าหมายที่มีขนาดต่างกัน และมีลักษณะการกระจายตัวของกลุ่มผู้ใช้บริการสื่อสารต่างกัน พบว่าการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ด้วยวิธีที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ ทำให้ได้โครงสร้างเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีประสิทธิภาพในการให้บริการสื่อสารดีกว่าการออกแบบด้วยวิธีอื่นแม้ว่าจะมีงบประมาณที่จำกัดในการติดตั้งเครือข่าย กล่าวคือเครือข่ายที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะมีคุณภาพการสื่อสารข้อมูลสูง ทั้งในด้านอัตราเร็วบิตในการสื่อสารข้อมูล และคุณภาพของสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ที่ต้องการให้บริการเครือข่าย นอกจากนี้เมื่อได้เพิ่มการใช้ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับกำหนดความสำคัญที่แตกต่างกันให้กับบริเวณที่มีกลุ่มผู้ใช้กระจายอยู่ ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการเครือข่ายขึ้นได้อีก โดยเฉพาะในกรณีที่มี

งบประมาณการติดตั้งเครือข่ายที่จำกัด จึงทำให้เทคนิคการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ที่รองรับผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่ากับงบประมาณที่ลงทุน

เทคนิคการการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ที่ได้ศึกษาและพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ สามารถเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งานสำหรับหน่วยงานที่ต้องทำการออกแบบและวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ในส่วนของระบบไร้สายได้ ซึ่งทำให้สามารถทำการขยายการให้บริการสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงสู่พื้นที่ห่างไกลภายใต้งบประมาณที่จำกัดได้ นอกจากนี้องค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ยังมีคุณค่าทางวิชาการต่อวงการศึกษาและวิจัยที่มีความสนใจในเรื่องของปัญหาการออกแบบและวางแผนระบบเครือข่ายไร้สายประเภทอื่นได้ แนวทางสำหรับงานวิจัยในอนาคต สามารถพิจารณาใช้สมการคณิตศาสตร์แบบหลายวัตถุประสงค์ในการออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพการให้บริการของเครือข่ายไวแมกซ์ เพื่อที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ทรัพยากรเครือข่ายได้อย่างคุ้มค่ากับการลงทุนยิ่งขึ้น

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บรรณานุกรม

[1] A. Ghosh, D. R. Wolter, J. G. Andrews and R. Chen, "Broadband Wireless Access with WiMax/8O2.16: Current Performance Benchmarks and Future Potential," IEEE Communications Magazine, Feb, 2005, pp. 129 – 136.

[2] S. W. Peters and R. W. Heath, "The Future of WiMAX: Multi-hop Relaying with IEEE 802.16j," IEEE Communications Magazine, Jan, 2009, pp. 104 – 111.

[3] S.Hurley, "Automatic Base Station Selection and Configuration in Mobile Networks," in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, 2000, pp. 2585 – 2592.

[4] R. Kapp Rawnsley, S. Hurley, "Towards Automatic Cell Planning," in Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2000, pp. 1583 – 1588.

[5] J. Garcia-Fragoso and G.M. Galvan-Tejada, "Cell Planning Based on the WiMax Standard for Home Access: A Practical Case," in Proc. International Conference on Electrical and Electronics Engineering , 2005, pp. 89 – 92.

[6] B. Lannoo, et.al.,"Business Scenarios for a WiMAX Deployment in Belgium," in Proc. IEEE Mobile WiMAX Symposium, 2007, pp. 132 – 137.

[7] P. Neves, et.al, "WiMAX for Emergency Services: An Empirical Evaluation," in Proc. IEEE International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, 2007, pp. 340 – 345.

[8] F.J. Velez, et.al, "Cell Planning Based on the WiMax Standard for Home Access: A Practical Case," in Proc. IEEE International Symposium on Wireless Pervasive Computing, 16-18 Jan. 2006.

[9] T.Theodoros and V. Kostantinos, "WiMax Network Planning and System's Performance Evaluation," in Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2007, pp. 1948 – 1953.

[10] M. Marques, et.al, "Design and Planning of IEEE 802.16 Networks," in Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007, pp. 1 – 5.

[11] S.M. Allen, S.Hurley, R.K. Taplin, and R.M. Whitaker,"Automatic Cell Planning of Broadband Fixed Wireless Networks," in Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, 2001, pp. 2808 – 2812.

[12] V. Teterin, S. Hurley, and SM Allen, "Optimizing Performance of WIMAX Networks through Automated Site Selection," in Proc. the Convergence of Telecommunications, Networking and Broadcasting, 2007.

[13] M. Mousavi, S. Chamberlanda, and A. Quintero, "A New Approach for Designing WiMAX Networks," in Proc. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2007, pp. 487 – 490.

[14] V. Teterin, S. Hurley, and S.M. Allen, "A Staged Optimization Framework for Cost Optimized WiMax Network Design," in Proc. IEEE International Conference on Wireless and Mobile Communications, 2008, pp. 185 – 190.

[15] Y. Yu, S. Murphy, and L. Murphy, "Planning Base Station and Relay Station Locations in IEEE 802.16j Multi-hop Relay Networks," in Proc. Consumer Communications and Networking Conference, 2008, pp. 922 – 926.

[16] Y. Yu, S. Murphy and L. Murphy, "A Clustering Approach to Planning Base Station and Relay Station Locations in IEEE 802.16j Multi-hop Relay Networks," in Proc. IEEE International Conference on Communications, 2008, pp. 2586 – 2591.

[17] S. Ahson, M. Ilyas, WiMAX handbook, CRC Press, London, 2008.

[18] L. Nuaymi, WiMAX technology for broadband wireless access, John Wiley, Chichester, England, 2007.

[19] Z. Abate, WiMax RF systems engineering, Artech House, Boston, 2009.

[20] M.D. Katz, F.H.P. Fitzek, WiMAX evolution: emerging technologies and applications, John Wiley & Sons, Chichester, England, 2009.

ภาคผนวก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระดับนานาชาติ

1. C. Prommak and C.Wechtaison, “On the Quality of Service Optimization for WiMAX Networks Using Multi-hop Relay Stations”, Communications in Computer and Information Science, V. Snasel et al. (Eds.), vol. 189, pp. 93-106, Springer, Heidelberg 2011.
2. C. Prommak and C.Wechtaison, “WiMAX Network Design for Cost Minimization and Access Data Rate Guarantee Using Multi-hop Relay Stations”, International Journal of Communications, vol. 4, no. 2, pp. 36-46, 2010.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้วิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุติมา พรหมมาก สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (เกียรตินิยม) จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น เมื่อ พ.ศ. 2535 ปริญญาโท (Telecommunication Engineering) จาก University of Colorado at Boulder เมื่อ ค.ศ. 1998 และปริญญาเอก (Telecommunication Engineering) จาก University of Pittsburgh เมื่อ ค.ศ. 2004 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สนใจงานวิจัยเรื่อง Wireless network design, Optical network design, Network optimization และ Heuristic approaches for network design

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี