

การวางแผนเครือข่ายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการลงทุนที่มีประสิทธิภาพ
ในเครือข่ายไอแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อ

นายจิตพงศ์ เวชโรสงค์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2553

**OPTIMAL NETWORK PLANNING FOR EFFICIENT
INVESTMENT IN WIMAX MULTIHOP RELAY
NETWORKS**

Chitapong Wechtaisong

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2010

การวางแผนเครือข่ายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการลงทุนที่มีประสิทธิภาพ
ในเครือข่ายไอแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักศึกษานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ชุติมา พรหมมาก)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.รังสรรค์ ทองทา)

กรรมการ

(อ. ดร.วุฒิ คำนกิตติกุล)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร.วรพจน์ จำพิศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ชิตพงศ์ เวชโชสงค์ : การวางแผนเครือข่ายที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการลงทุนที่มีประสิทธิภาพในเครือข่ายไวแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อ (OPTIMAL NETWORK PLANNING FOR EFFICIENT INVESTMENT IN WIMAX MULTIHOP RELAY NETWORKS) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา พรหมมาก, 132 หน้า

ในปัจจุบันการสื่อสารข้อมูลแบบบรอดแบนด์ (Broadband) มีการเติบโตอย่างมาก และยังมีหลายพื้นที่ที่ต้องการใช้บริการแต่โครงสร้างพื้นฐานแบบสายทองแดงหรือใยแก้วนำแสงของเครือข่ายนั้นไม่สามารถขยายถึงได้ ดังนั้นเทคโนโลยีสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูง (High Speed Broadband Wireless Communication) ได้เข้ามามีบทบาทในการลดข้อจำกัดเหล่านี้ เทคโนโลยีไวแมกซ์ (WiMAX) เป็นบรอดแบนด์ไร้สายชนิดหนึ่งที่ใช้หลักการพื้นฐานของระบบโทรศัพท์แบบเซลลูลาร์ที่มีสถานีฐาน (Base Station : BS) ให้บริการการสื่อสารข้อมูลความเร็วสูงในพิสัยไกลและรองรับผู้ใช้บริการแบบเคลื่อนที่ตามมาตรฐาน IEEE 802.16e สำหรับผู้ใช้บริการเครือข่ายไวแมกซ์นั้นการลงทุนในการสร้างเครือข่ายเป็นสิ่งสำคัญ ด้วยเหตุนี้มาตรฐาน IEEE 802.16j จึงถูกพัฒนาขึ้นโดยเพิ่มสถานีถ่ายทอด (Relay Station : RS) เป็นอุปกรณ์สื่อกลางระหว่างสถานีฐานกับอุปกรณ์ของผู้ใช้บริการทำให้สามารถเพิ่มพิสัยครอบคลุมและลดจำนวนสถานีฐานลงสามารถลดมูลค่าการลงทุนก่อสร้างเครือข่ายได้ อย่างไรก็ตามการก่อสร้างเครือข่ายยังคงต้องการการวางแผนที่ดีเพื่อให้สามารถรองรับผู้ใช้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพและลดงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่ายให้ได้มากที่สุด

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอวิธีการหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดของเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการเชื่อมสถานีถ่ายทอดแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ ด้วยการพัฒนาสมการคณิตศาสตร์จากระเบียบวิธีการโปรแกรมเลขจำนวนเต็ม (Integer Programming : IP) โดยมีจุดประสงค์เพื่อลดจำนวนสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดสัญญาณให้เหลือน้อยที่สุดที่จะสามารถรองรับผู้ใช้บริการได้ และพิจารณาถึงเงื่อนไขเกี่ยวกับการรับประกันคุณภาพการให้บริการ และยังสามารถนำเสนอวิธีการหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดของเครือข่ายไวแมกซ์ ในกรณีที่มีงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่ายอยู่จำกัด เพื่อให้สามารถรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้งานให้ได้จำนวนมากที่สุด และทำการทดลองวางแผนเครือข่ายในพื้นที่ทดลองเทียบกับงานวิจัยในปริทัศน์วรรณกรรมแล้วพบว่า การวางแผนเครือข่ายในวิทยานิพนธ์นี้ได้เพิ่มการรับประกันคุณภาพการให้บริการในด้านการรับประกันอัตราเร็วในการให้บริการ และด้านการรับประกันสัญญาณครอบคลุมเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 60 และร้อยละ 12 ตามลำดับ

เพื่อเป็นการประยุกต์สมการคณิตศาสตร์สำหรับวางแผนเครือข่ายของงานวิจัยนี้เข้ากับการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริง จึงได้ทำการทดลองวางแผนเครือข่ายบนพื้นที่เขตเมืองของจังหวัดนครราชสีมา และเพื่อเป็นการลดงบประมาณการลงทุน สถานีฐานและสถานีถ่ายทอดของระบบไวแมกซ์ ที่วางแผนนั้นได้อาศัยโครงข่ายพื้นฐานเดิมที่มีอยู่แล้วเช่นส่วนของตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานเสาสัญญาณและระบบสายส่งของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งสามารถวางแผนเครือข่ายได้ตามวัตถุประสงค์ และผลของการวางแผนเครือข่ายได้แสดงให้เห็นว่า งบประมาณเป็นปัจจัยสำคัญในการวางแผนเครือข่ายให้ประสิทธิภาพตามวัตถุประสงค์ของการวางแผนเครือข่ายที่ตั้งไว้

CHITAPONG WECHTAISONG : OPTIMAL NETWORK PLANNING
FOR EFFICIENT INVESTMENT IN WIMAX MULTIHOP RELAY
NETWORK. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. CHUTIMA PROMMAK,
Ph.D., 132 PP.

WIMAX/ NETWORK PLANNING/ SITE SELECTION

Currently, Broadband communication is continuously grown. There are many area that infrastructure of copper wire or fiber optic cable cannot access. So, the high speed broadband wireless communication can reduce this limitation. WiMAX is one of high speed broadband wireless communication based on cellular network. It can provide mobility high speed and long range link in IEEE 802.16e standard. For network operator, investment cost is important for business. The IEEE 802.16j is developed by using relay station to be intermediate node between base station and user. This helps increase service coverage and reduce amount of base stations for lower investment cost. However, network planning is necessary for network constructions due to requirement to minimize investment cost with guarantee quality of service for users.

This research presents site selection method for base stations and relay stations by developed mathematical equations from Integer Programming. The objective is minimized amount of base station and relay station with guarantee quality of service for user. And another mathematical equation to achieve objective for maximize amount of users that guaranteed quality of service under limited investment cost. The results of network planning this research can guarantee 100 percent service data rate

and network coverage for all users. The comparison of network planning with literature review indicated that this research can improve quantity of service in case of user to guarantee service data rate and network coverage at 60 and 12 respectively.

The experiment of WiMAX network planning in city estate of Nakhon Ratchasima Province is established for applying the mathematical equations in this research with real network. Using old infrastructure of mobile phone network to install WiMAX network is economy way for reduce investment cost. So this experiment selected candidate site from mobile phone base station site due to save cost in case of site tower, electrical power system and transmission system. The results of network planning can achieve its objective. And it indicates that investment cost is one from many important parameters for performance of network planning.

School of Telecommunication engineering

Academic Year 2010

Student's Signature_____

Advisor's Signature_____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา พรหมมาก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำคำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ รองอธิการบดีฝ่ายพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้โอกาสในการศึกษา คำแนะนำในด้านวิชาการแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยมาโดยตลอด

คณาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้กำลังใจมาโดยตลอด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับคุณพ่อทวิสิทธิ์ และคุณแม่สุดใจ เวชโรสงค์ รวมถึงทุกคนในครอบครัวอันเป็นที่รัก และที่จะขาดเสียมิได้ บริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด (มหาชน) ที่ได้อนุญาตให้ใช้เวลาปฏิบัติงานบางส่วนในการศึกษา และดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้เสร็จสมบูรณ์

จิตพงศ์ เวชโรสงค์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมุติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ขอบเขตของเรื่อง.....	4
1.5 ขอบเขตของการวิจัย.....	4
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์.....	6
2 ปรัชญ์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 กล่าวนำ.....	7
2.2 ปรัชญ์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	8
2.3 สรุปรงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.4 นวัตกรรมงานวิจัยของวิทยานิพนธ์.....	11
2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.5.1 การสื่อสารแบบบรอดแบนด์ไร้สาย.....	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5.2	ระบบไวแมกซ์.....	13
2.5.1.1	ลำดับของการพัฒนามาตรฐาน IEEE 802.16.....	14
2.5.1.2	สถาปัตยกรรมระบบไวแมกซ์.....	16
2.5.3	เทคโนโลยีไวแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อ.....	17
2.5.3.1	มาตรฐาน IEEE 802.16j สำหรับไวแมกซ์.....	13
2.5.3.2	รูปแบบการใช้งานสถานีถ่ายทอดสำหรับการวางแผน เครือข่าย.....	19
2.5.4	แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถี.....	21
2.5.5	การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม.....	23
2.5.6	การหาคำตอบสำหรับโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม.....	24
2.5.7	ระเบียบวิธีซิมเพล็กซ์.....	25
2.5.8	การวางแผนเครือข่ายไร้สายสำหรับเครือข่ายไวแมกซ์ แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อ.....	27
2.8.1.1	กล่าวนำ.....	27
2.8.1.2	การวิเคราะห์รูปแบบเซลล์.....	27
2.8.1.3	การวิเคราะห์พื้นที่ครอบคลุม.....	28
2.8.1.4	การวิเคราะห์ความจุของเครือข่าย.....	29
2.8.1.5	การวิเคราะห์การแทรกสอดของสัญญาณ.....	30
3	เทคนิคการหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดสำหรับเครือข่าย ไวแมกซ์เพื่อการลงทุนอย่างมีประสิทธิภาพ.....	32
3.1	กล่าวนำ.....	32
3.2	การนิยามปัญหา.....	33
3.3	สมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีสำหรับวางแผนเครือข่าย.....	34
3.4	การตั้งปัญหาสำหรับการทดลองหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน และสถานีถ่ายทอด.....	39
3.5	การหาคำตอบสำหรับสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี.....	42

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6	การดำเนินการทดลองหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้ง สถานีฐานและสถานีถ่ายทอด.....	45
3.6.1	การทดลองหาตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งสถานีฐานและ สถานีถ่ายทอดโดยสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี.....	45
3.6.1.1	การวางแผนเครือข่ายโดยกำหนดฟังก์ชัน วัตถุประสงค์เพื่อลดมูลค่าการลงทุน.....	46
3.6.1.2	การวางแผนเครือข่ายโดยกำหนดฟังก์ชัน วัตถุประสงค์เพื่อลดมูลค่าการลงทุน และลดกำลังส่งจากสถานีภาคส่ง.....	47
3.6.2	การทดสอบวางแผนเครือข่ายโดยกำหนดตำแหน่งที่ตั้ง สถานีฐานให้กระจายตัวเท่ากัน.....	50
3.6.3	การทดสอบวางแผนเครือข่ายโดยการคาดคะเนตำแหน่ง ที่ตั้งสถานีฐาน.....	50
3.6.4	วิเคราะห์ผลการวางแผนเครือข่าย.....	50
3.6.4.1	วิเคราะห์ผลการทดสอบการวางแผนเครือข่าย โดยสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี.....	51
3.6.4.2	วิเคราะห์ผลการทดสอบการวางแผนเครือข่ายโดย สมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีเทียบกับ วิธีกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน.....	52
3.7	การวางแผนเครือข่ายในพื้นที่ให้บริการจริง.....	56
3.8	สรุป.....	64
4	เทคนิคการหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดสำหรับเครือข่าย ไวแมกซ์เพื่อการให้บริการอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้งบประมาณจำกัด.....	65
4.1	กล่าวนำ.....	65
4.2	การนิยามปัญหา.....	66
4.3	สมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีสำหรับวางแผนเครือข่าย.....	67
4.4	การตั้งปัญหาการทดลองหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด.....	72

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.5	การหาคำตอบสำหรับสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี.....	74
4.6	การดำเนินการทดลองวางแผนเครือข่ายสำหรับติดตั้งสถานีสถาน และสถานีถ่ายทอดภายใต้งบประมาณจำกัด.....	76
4.6.1	การทดลองวางแผนเครือข่ายสำหรับติดตั้งสถานีสถาน และสถานีถ่ายทอดโดยใช้สมการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ไบนารีภายใต้งบประมาณจำกัด.....	76
4.6.2	การทดลองวางแผนเครือข่ายโดยกำหนดตำแหน่งที่ตั้ง สถานีสถานให้กระจายตัวเท่ากันภายใต้งบประมาณจำกัด.....	82
4.6.3	การทดลองวางแผนเครือข่ายโดยวิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้ง สถานีสถานภายใต้งบประมาณจำกัด.....	87
4.6.4	วิเคราะห์ผลการวางแผนเครือข่ายภายใต้งบประมาณจำกัด.....	91
4.7	การวางแผนเครือข่ายในพื้นที่ให้บริการจริงภายใต้งบประมาณจำกัด.....	94
4.7.1	การทดลองวางแผนเครือข่ายบนพื้นที่ให้บริการจริง ภายใต้งบประมาณจำกัด.....	96
4.7.2	การทดลองวางแผนเครือข่ายบนพื้นที่ให้บริการจริง โดยพิจารณาการถ่วงน้ำหนักภายใต้งบประมาณจำกัด.....	101
4.7.3	การวิเคราะห์ผลการทดลองวางแผนเครือข่ายบนพื้นที่ ให้บริการจริงภายใต้งบประมาณจำกัด.....	108
4.8	สรุป.....	109
5	สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	110
5.1	สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์.....	110
5.2	ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	112
5.3	งานวิจัยในอนาคต.....	112
	รายการอ้างอิง.....	114
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	116
	ประวัติผู้เขียน.....	132

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การเปรียบเทียบการสื่อสารแบบบอร์ดแบนด์ไร้สายระหว่าง ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย และระบบไวแมกซ์.....	13
2.2 ลำดับการพัฒนามาตรฐานของระบบไวแมกซ์.....	14
2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับ SUI Model แบ่งตามชนิดของสภาพพื้นที่.....	23
2.4 รูปแบบของตารางซึมเพล็กซ์.....	23
3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองร่วมกับข้อมูลตั้งต้นสำหรับการคำนวณ.....	41
3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูเลต อัตราเร็วทางกายภาพ และระดับสัญญาณขั้นต่ำในการรักษาอัตราเร็วทางกายภาพ.....	41
3.3 แสดงการแปลงสมการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีเป็นคำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE.....	44
3.4 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ โดยใช้สมการคณิตศาสตร์โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี.....	51
3.5 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ โดยใช้วิธีกำหนดที่ตั้งสถานีฐาน.....	53
3.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์เขตในเมืองนครราชสีมา.....	58
3.7 การเปรียบเทียบผลการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ในพื้นที่จริง.....	61
4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองร่วมกับข้อมูลตั้งต้นสำหรับการคำนวณ.....	73
4.2 แสดงการแปลงสมการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีเป็นคำสั่งในโปรแกรม ILOG OPL IDE.....	75
4.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ภายใต้งบประมาณจำกัดโดยใช้สมการคณิตศาสตร์การ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี.....	79
4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์โดยวิธีกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานกระจายตัวเท่ากันภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน.....	84
4.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์โดยวิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน.....	89

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.6	การเปรียบเทียบผลจากการทดลองวางแผนเครือข่าย ไวแมกซ์โดยใช้วิธีต่างกัน.....92
4.7	พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ ในเขตเมืองนครราชสีมา.....95
4.8	ผลการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริงภายใต้การจำกัด งบประมาณต่างกัน.....101
4.9	ค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้กับตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ.....102
4.10	ผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักภายใต้การจำกัด งบประมาณต่างกัน.....105

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	สถาปัตยกรรมเครือข่ายระบบไวแมกซ์.....16
2.2	วิธีขยายขนาดและเพิ่มอัตราเร็วในการให้บริการโดยใช้สถานีถ่ายทอด.....29
2.3	ตัวอย่างเครือข่ายไวแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อ สำหรับวิเคราะห์การแทรกสอดของสัญญาณ.....30
3.1	ข้อมูลตั้งต้นสำหรับการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์.....40
3.2	หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG OPL IDE.....44
3.3	ผลการวางแผนเครือข่ายจากสมการปัญหาการหาตำแหน่งติดตั้ง สถานีฐานและสถานีถ่ายทอด.....46
3.4	ผลการวางแผนเครือข่ายแบบถ่วงน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงค์.....47
3.5	ผลการวางแผนเครือข่ายโดยวิธีกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน ให้กระจายตัวเท่ากัน.....48
3.6	ผลการวางแผนเครือข่ายโดยวิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน.....49
3.7	แสดงความหนาแน่นของสัญญาณที่รับจากเครือข่ายที่ตำแหน่ง DP's และ STPs ของ BRPP model เทียบกับ WOF model.....47
3.8	แสดงความหนาแน่นของสัญญาณที่รับได้จากเครือข่ายที่วางแผนเครือข่าย ด้วยวิธี BRPP model เทียบกับ UB method และ EA method.....54
3.9	พื้นที่ที่ดำเนินการศึกษา เขตเทศบาลนครนครราชสีมา.....57
3.10	ข้อมูลตั้งต้นสำหรับการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ในพื้นที่ ให้บริการจริง.....58
3.11	แสดงผลการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่ให้บริการจริง.....59
3.12	เปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่ให้บริการจริง.....62
4.1	ข้อมูลตั้งต้นสำหรับการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์.....73
4.2	ผลการวางแผนเครือข่ายด้วยสมการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ไบนารีเมื่อกำหนดงบประมาณในการลงทุนต่างกัน.....77

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.3	เปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายด้วยสมการ โปรแกรมเชิงเส้น จำนวนเต็มใบนาริภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน.....80
4.4	ผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีการกำหนดสถานียุทธแบบกระจายตัว เท่ากันเมื่อใช้งบประมาณลงทุนต่างกัน.....82
4.5	เปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีการกำหนดตำแหน่งที่ตั้ง สถานียุทธให้กระจายตัวเท่ากันภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน.....85
4.6	ผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีการกำหนดสถานียุทธแบบคาดคะเน ตำแหน่งที่ตั้งสถานียุทธเมื่อใช้งบประมาณลงทุนต่างกัน.....87
4.7	เปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีการคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้ง สถานียุทธภายใต้การจำกัดงบประมาณลงทุนต่างกัน.....89
4.8	ความหนาแน่นของความแรงสัญญาณที่ DP's และ STP's รับได้ จากเครือข่ายที่มีวิธีการวางแผนเครือข่ายต่างกัน.....93
4.9	การเปรียบเทียบคุณภาพการให้บริการของการวางแผนเครือข่ายแบบต่าง ๆ.....93
4.10	แสดงข้อมูลตั้งต้นสำหรับการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ ภายใต้การจำกัดงบประมาณในเขตเมืองนครราชสีมา.....95
4.11	แสดงผลการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริงภายใต้การจำกัด งบประมาณต่างกัน.....97
4.12	ผลการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริงภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน.....99
4.13	แสดงผลการวางแผนเครือข่ายแบบถ่วงน้ำหนักในพื้นที่ให้บริการจริง ภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน.....103
4.14	เปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีถ่วงน้ำหนัก ในพื้นที่ให้บริการจริงภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน.....106

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

FDD	การคูณเฟลทซ์แบบแบ่งความถี่
TDD	การคูณเฟลทซ์แบบแบ่งเวลา
FDMA	การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่
TDMA	การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา
OFDMA	การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ตั้งฉฉฉฉ
BPSK	การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟสแบบสองค่า
QPSK	การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟสแบบสี่ค่า
QAM	การมอดูเลตเชิงเลขทางขนาดและเฟส
BSs	สถานีฐาน
RSs	สถานีถ่ายทอด
DPs	ตำแหน่งรับประฉฉฉรับประฉฉฉการให้บริการแก่ผู้ฉฉ
STPs	ตำแหน่งรับประฉฉฉการเข้าถึงเครือข่ายแก่ผู้ฉฉ
PL	ค่าการสูญเสียที่เกฉฉฉขึ้นทั้งหมด
A	การสูญเสียการฉฉฉตามแนววิธีที่ระยะทางอ้างอิง d_0
N	เอกฉฉฉพฉฉฉการสูญเสียเชิงวิธี (Path loss exponent)
D	ระยะทางระหว่างสถานีภาคส่งกับสถานีลูกข่าย
d_0	ระยะทางอ้างอิง (100 m.)
X_f	แฟกเตอร์แก้ไขสำหรับค่าความถี่ของคลื่นพาห้
X_h	แฟกเตอร์แก้ไขสำหรับความสูงของสายอากาศของสถานีลูกข่าย
S	แฟกเตอร์ของชาโดว์เฟดดิ้ง (Shadow fading factor)
h_b	ความสูงของสายอากาศของสถานีภาคส่ง
h_r	ความสูงของสายอากาศของสถานีลูกข่าย
f	ค่าความถี่ของคลื่นพาห้
B	เซตของตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีฐาน (BSs)
R	เซตของตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีถ่ายทอด (RSs)
D	เซตของตำแหน่งที่รับประฉฉฉการให้บริการแก่ผู้ฉฉ (DPs)
T	เซตของตำแหน่งที่รับประฉฉฉการเข้าถึงเครือข่ายแก่ผู้ฉฉ (STPs)

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

F_j	มูลค่าในการลงทุนติดตั้งสถานีฐาน j
E_i	มูลค่าในการลงทุนติดตั้งสถานีถ่ายทอด i
P_t	ค่าความแรงสัญญาณที่น้อยที่สุดสำหรับการเชื่อมต่อ DPs กับเครือข่ายกับเครือข่าย
P_d	ค่าความแรงสัญญาณที่น้อยที่สุดสำหรับการเชื่อมต่อ DPs กับเครือข่าย
P_r	ค่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำสำหรับการเชื่อมต่อ RSs กับ BSs
P_{hj}	ค่าความแรงสัญญาณที่ STP h รับผิดชอบจาก BS j
P_{hi}	ค่าความแรงสัญญาณที่ STP h รับผิดชอบจาก RS i
P_{gj}	ค่าความแรงสัญญาณที่ DP g รับผิดชอบจาก BS j
P_{gi}	ค่าความแรงสัญญาณที่ DP g รับผิดชอบจาก RS i
β_j	ตัวแปรตัดสินใจกรณีติดตั้งสถานีฐาน
γ_i	ตัวแปรตัดสินใจกรณีติดตั้งสถานีถ่ายทอด
u_{hj}	ตัวแปรตัดสินใจสำหรับการเชื่อมต่อระหว่าง STP ที่ h กับสถานีฐาน j
v_{hi}	ตัวแปรตัดสินใจสำหรับการเชื่อมต่อระหว่าง STP ที่ h กับสถานีถ่ายทอด i
x_{gij}	ตัวแปรตัดสินใจสำหรับการเชื่อมต่อระหว่าง DP ที่ g กับสถานีฐาน j
y_{gi}	ตัวแปรตัดสินใจสำหรับการเชื่อมต่อระหว่าง DP ที่ g กับสถานีถ่ายทอด i
w_{ij}	ตัวแปรตัดสินใจสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอด i กับสถานีฐาน j
W_g	ค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับ DP ที่ g

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การติดต่อสื่อสารของมนุษย์มีการพัฒนาอย่างไม่หยุดยั้ง ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันความต้องการความเร็วในการรับส่งข้อมูลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ยิ่งไปกว่านั้นระบบสื่อสารยังต้องตอบสนองความต้องการในการพกพาอุปกรณ์สื่อสารไปใช้ในสถานที่ต่าง ๆ ได้อย่างสะดวกสบาย ดังนั้นความต้องการของผู้ใช้งานระบบสื่อสารจึงนำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยี การสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูง (High Speed Broadband Wireless Communication) ซึ่งเป็นการสื่อสารที่สามารถรองรับกลุ่มผู้ใช้งานแบบอยู่กับที่ไปจนถึงกลุ่มผู้ใช้งานแบบเคลื่อนที่ตลอดเวลา ปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงนี้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเช่นระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 และระบบไวแมกซ์ (WiMAX) สำหรับพื้นที่ที่โครงข่ายปลายทาง (Last Mile) แบบสายทองแดงขยายไปไม่ถึงนั้น ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 และระบบไวแมกซ์ (WiMAX) ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการช่วยลดความเหลื่อมล้ำทางการเข้าถึงสารสนเทศและความรู้ (Digital Divide) ลงได้

ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 นั้นพัฒนามาจากระบบโทรศัพท์แบบเซลลูลาร์ (Cellular Phone System) โดยแต่เดิมนั้นถูกสร้างขึ้นเพื่อรองรับการใช้งานในรูปแบบของเสียงเท่านั้น เรียกว่าระบบโทรศัพท์ยุคที่ 1 เป็นระบบโทรศัพท์แบบอนาล็อก ที่ยังมีข้อจำกัดหลายอย่างทั้งด้านประสิทธิภาพการให้บริการและระบบความปลอดภัย และต่อมาระบบโทรศัพท์ยุคที่ 2 ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยเป็นระบบโทรศัพท์แบบดิจิทัล เพิ่มคุณสมบัติในการรับส่งข้อมูลในช่องสัญญาณแบบความถี่แคบโดยมีการแบ่งเวลาในการเข้าใช้ช่องสัญญาณ ในปัจจุบันระบบโทรศัพท์ยุคที่ 2.75 ได้มีการปรับปรุงให้สามารถรองรับการรับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วตามทฤษฎีได้เพียง 384 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งยังไม่เพียงพอสำหรับบริการที่ผู้ใช้บริการต้องการระบบโทรศัพท์ยุคที่ 3 ถูกปรับปรุงขึ้นโดยเพิ่มคุณสมบัติของเทคโนโลยีการสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงด้วยเทคโนโลยี HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) ซึ่งสามารถรองรับการรับส่งข้อมูลตามทฤษฎีได้ถึง 7 เมกกะบิตต่อวินาที แต่ในการปรับปรุงโครงสร้างเครือข่ายจากระบบโทรศัพท์ยุคที่ 2.75 ไปเป็นระบบโทรศัพท์ยุคที่ 3 นั้น แม้จะมีผลในด้าน อัตราเร็วของข้อมูลที่เพิ่มขึ้น การให้บริการขณะเคลื่อนที่ ระบบความปลอดภัย และการรักษาคุณภาพการให้บริการ แต่ยังมีข้อจำกัดด้านอัตราเร็วของการรับส่งข้อมูลและต้องมีการเปลี่ยนอุปกรณ์เครือข่ายที่มีความซับซ้อน ทั้งส่วนเครือข่ายเข้าถึง

(Access Network) และเครือข่ายหลัก (Core Network) ซึ่งใช้งบประมาณลงทุนสูงกว่าเทคโนโลยีการสื่อสารแบบบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงประเภทอื่น

ระบบสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายอีกชนิดหนึ่งที่เข้ามาช่วยลดความเหลื่อมล้ำทางการเข้าถึงสารสนเทศและความรู้ได้คือ เครือข่ายระบบไวแมกซ์ (WiMAX : Worldwide Interoperability for Microwave Access) ซึ่งเริ่มต้นด้วยการออกมาตรฐาน IEEE 802.16 ซึ่งให้บริการกลุ่มผู้ใช้งานแบบอยู่กับที่ เชื่อมต่อในแนวเส้นสายตา (Line of Sight : LOS) และปัจจุบันระบบไวแมกซ์ถูกพัฒนาต่อเนื่องจนสามารถรองรับการเชื่อมต่อนอกแนวเส้นสายตา (Non-Line of Sight : NLOS) สำหรับผู้ให้บริการที่เคลื่อนที่ตลอดเวลาด้วยมาตรฐาน IEEE 802.16e หรือที่เรียกว่าโมบายล์ไวแมกซ์ (Mobile WiMAX) และต่อมาไวแมกซ์ถูกพัฒนาความสามารถด้านการขยายพื้นที่ครอบคลุมด้วยมาตรฐาน IEEE 802.16j โดยการใช้สถานีถ่ายทอด (Relay Station : RS) แทนสถานีฐาน (Base Station : BS) ในการเพิ่มพื้นที่ครอบคลุม ทำให้เทคโนโลยีนี้เหมาะสำหรับให้บริการการสื่อสารแบบบรอดแบนด์ไร้สายทุกพื้นที่ทั้งเขตเมืองและชนบท ส่วนอุปกรณ์สถานีฐานและสถานีถ่ายทอดของไวแมกซ์ ทำหน้าที่รับส่งสัญญาณไมโครเวฟกับอุปกรณ์ของผู้ใช้ และระหว่างอุปกรณ์ในเครือข่ายไวแมกซ์นั้นทำการเชื่อมต่อกันบนพื้นฐานของโปรโตคอลอินเทอร์เน็ต (Internet Protocol : IP) สถาปัตยกรรมเครือข่ายของระบบไวแมกซ์จึงไม่ซับซ้อน ทำให้ง่ายต่อการวางระบบเพื่อให้บริการ และใช้เงินลงทุนไม่สูงในการสร้างเครือข่าย ด้วยอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลตามทฤษฎีที่สูงถึง 46 เมกกะบิตต่อวินาทีและการใช้สถานีถ่ายทอดเพื่อเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมรวมถึงสถาปัตยกรรมเครือข่ายที่ไม่ซับซ้อนทำให้ไวแมกซ์เป็นเทคโนโลยีที่ได้เปรียบกว่าเมื่อเทียบกับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

จากการศึกษาปรัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมาได้มีการนำเสนองานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับการออกแบบเครือข่ายระบบโทรศัพท์แบบเซลลูลาร์โดยใช้สมการคณิตศาสตร์ช่วยหาคำแนะนำที่ตั้งสถานีฐานที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ได้เป็นพื้นฐานของงานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบเทคโนโลยีการสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงแบบอื่น นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ ทั้งการศึกษาในเชิงปฏิบัติโดยพิจารณาประสิทธิภาพสัญญาณรวมถึงคุณภาพการให้บริการเพื่อการใช้งานจริงและศึกษาด้วยการจำลองระบบเพื่อการออกแบบโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ช่วยหาจุดที่ตั้งสถานีฐาน และสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสม เพื่อให้สัญญาณครอบคลุมและรองรับอัตราเร็วสำหรับผู้ให้บริการได้อย่างเหมาะสมโดยลดมูลค่าการลงทุนให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่ได้ทำการพิจารณาการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีการเชื่อมต่อสถานีถ่ายทอดแบบหลายช่วงเชื่อมต่อโดยพิจารณาถึงการรับประกันอัตราเร็วในการให้บริการและพิจารณาถึงการรับประกันสัญญาณครอบคลุม บนสถาปัตยกรรมโครงข่ายของระบบ

โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ให้บริการอยู่เดิมซึ่งเป็นทางออกที่เป็นไปได้สำหรับผู้ให้บริการที่ต้องการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ที่ต้องการลดต้นทุนในการก่อสร้างเครือข่าย

จุดประสงค์ในการวางแผนเครือข่ายของผู้ให้บริการเครือข่ายคือการลดต้นทุนในการติดตั้ง โดยที่การให้บริการเครือข่ายยังคงมีประสิทธิภาพในการให้บริการและพื้นที่ครอบคลุมสำหรับผู้ให้บริการงานวิจัย ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีแก้ปัญหาและลดข้อจำกัดด้านงบประมาณลงทุนในการให้บริการเครือข่ายการสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายความเร็วสูงโดยการพัฒนาวิธีการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ด้วยการใช้ระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มไบนารี (0-1 Integer Programming) พัฒนาสมการคณิตศาสตร์ เพื่อหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีฐาน และสถานีทวนสัญญาณที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถรองรับจำนวนของผู้ใช้บริการและลดมูลค่าการลงทุนได้มากที่สุด โดยตำแหน่งสำหรับเลือกติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดนั้นอาจพิจารณา สถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งมีเสาสัญญาณ และระบบสายส่งที่ติดตั้งไว้แล้วเพื่อลดต้นทุนในการก่อสร้างเครือข่าย และใช้ทรัพยากรเครือข่ายให้เกิดประโยชน์สูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหลักการทำงานและสถาปัตยกรรมพื้นฐานของระบบไวแมกซ์
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาวิธีออกแบบเครือข่ายโดยการเลือกตำแหน่งสำหรับตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดในระบบไวแมกซ์
- 1.2.3 เพื่อศึกษาและนำระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ ในการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ เพื่อให้สอดคล้องกับข้อจำกัดหรือเงื่อนไขต่าง ๆ เช่น งบประมาณในการลงทุน (budget) และ อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับให้บริการแก่ผู้ใช้ เป็นต้น

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

- 1.3.1 การหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสม สามารถลดมูลค่าการลงทุนในการสร้างเครือข่ายไวแมกซ์และยังคงประสิทธิภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้บริการได้
- 1.3.2 เครือข่ายไร้สายที่ดี ควรมีสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมดและอัตราเร็วทางกายภาพสามารถรองรับผู้ใช้บริการได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 1.3.3 ปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนในการสร้างเครือข่าย คือพื้นที่ในการออกแบบและจำนวนผู้ใช้บริการ

1.3.4 ระเบียบวิธีโปรแกรมเลขจำนวนเต็มสามารถนำมาใช้สำหรับการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ ภายใต้เงื่อนไขการวางแผนเครือข่ายเดียวกัน โดยงบประมาณลงทุนอาจแตกต่างกัน ตามลักษณะการกระจายตัวของผู้ใช้บริการ

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.4.1 ใช้แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิธีของมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด (Stanford University Interim model : SUI) เพื่อทำนายค่าการสูญเสียกำลังตามแนววิธีของสัญญาณระหว่างเครือข่ายกับอุปกรณ์ผู้ใช้งาน

1.4.2 ใช้โปรแกรม ILOG OPL IDE ทำการประมวลเพื่อเลือกตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดสัญญาณที่เหมาะสมที่สุดของระบบ

1.4.3 การวัดสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการทั้งหมดแทนด้วยตำแหน่งรับประกันสัญญาณครอบคลุม (Signal Test Point : STP) ซึ่งกระจายตัวเป็นรูปแบบตารางซึ่งมีระยะทางระหว่างแต่ละจุดเท่ากัน

1.4.4 ความต้องการการบริการของผู้ใช้แทนด้วยตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วในการให้บริการ (Demand Point : DP) และมีการรับประกันอัตราเร็วทางกายภาพให้กับจุดทดสอบบริการซึ่งกระจายตัวตามความหนาแน่นของผู้ใช้

1.4.5 ใช้ระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มไปนารีสำหรับกำหนดปัญหา

1.4.6 ตำแหน่งสำหรับเลือกติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดของระบบไวแมกซ์เป็นตำแหน่งที่มีโครงสร้างพื้นฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่อยู่มาก่อนแล้ว

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

1.5.1 เครือข่ายที่ทำการวิเคราะห์ในวิทยานิพนธ์นี้คือเครือข่ายไร้สายในระบบไวแมกซ์ โดยกำหนดการออกแบบเป็นการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ที่อาศัยโครงสร้างพื้นฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่

1.5.2 ทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์

1.5.3 กำหนดเงื่อนไขต่างๆที่ส่งผลต่อการตัดสินใจในการเลือกตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดให้อยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อช่วยในการออกแบบเครือข่ายที่เหมาะสม

1.5.4 ทำการหาคำตอบที่ดีที่สุดโดยใช้โปรแกรม ILOG OPL IDE

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

1.6.1 ระเบียบวิธีวิจัย

เป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

- การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

- กำหนดวัตถุประสงค์และเงื่อนไขในการวางแผนเครือข่ายไวมแมกซ์
- ใช้วิธีการโปรแกรมเลขจำนวนเต็มเพื่อกำหนดปัญหาและพัฒนาสมการ
- ใช้โปรแกรม ILOG OPL IDE ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดจากสมการโปรแกรมเลขจำนวนเต็ม

- ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลที่ได้จากวิธีโปรแกรมเลขจำนวนเต็ม

- สรุปผลการทดลองและรวบรวมข้อมูลเพื่อเขียนเป็นรายงาน

1.6.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- เก็บรวบรวมข้อมูลของการออกแบบเครือข่ายไวมแมกซ์จากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- เก็บรวบรวมข้อมูลของการออกแบบเครือข่ายไวมแมกซ์โดยใช้ระเบียบวิธีการโปรแกรมเลขจำนวนเต็ม

1.6.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลเกี่ยวกับการเปรียบเทียบคุณภาพการให้บริการ ระหว่างการวางแผนเครือข่ายไวมแมกซ์โดยมีเงื่อนไขการให้บริการและวัตถุประสงค์เดียวกันด้วยวิธีต่าง ๆ ทำการวิเคราะห์และสรุปผลในรูปของรูปภาพและข้อมูลตารางเปรียบเทียบตัวเลข

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการออกแบบเครือข่ายในส่วนไร้สายของระบบไวมแมกซ์ และระบบการสื่อสารอื่น ๆ ที่ใช้พื้นฐานของระบบโทรศัพท์แบบเซลลูลาร์

1.7.2 สามารถสร้างสมการทางคณิตศาสตร์จากระเบียบวิธีการโปรแกรมเลขจำนวนเต็มที่ใช้ในการออกแบบเครือข่ายในส่วนไร้สายของระบบไวมแมกซ์ให้สอดคล้องกับข้อจำกัดและเงื่อนไขต่าง ๆ เช่นงบประมาณการลงทุนและปริมาณผู้ใช้งานที่เครือข่ายรองรับ

1.8 ส่วนประกอบของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งออกเป็น 5 บท ดังนี้คือ

บทที่ 1 กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย และบอกถึงข้อตกลงเบื้องต้นสำหรับการวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงปรัทัศน์วรรณกรรมที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าที่เกี่ยวข้องในงานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงเทคนิคการวางแผนหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีสฐานและสถานีถ่ายทอดสำหรับเครือข่ายไวแมกซ์เพื่อการลงทุนอย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 4 กล่าวถึงเทคนิคการวางแผนหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีสฐานและสถานีถ่ายทอดสำหรับเครือข่ายไวแมกซ์ เพื่อให้บริการอย่างมีประสิทธิภาพภายใต้งบประมาณที่จำกัด

บทที่ 5 สรุปการวิจัย ข้อเสนอแนะและงานวิจัยในอนาคต

บทที่ 2

ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับในบทที่ 2 ถูกแบ่งเนื้อหาเป็น 2 ส่วน โดยส่วนแรกจะกล่าวถึงปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนเครือข่าย โดยหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด รูปแบบและวิธีการวางแผนเครือข่ายจากงานวิจัยต่าง ๆ ที่นำมาสู่งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ และได้กล่าวถึงนวัตกรรมของงานวิจัยซึ่งนำเสนอการคิดค้นการวางแผนเครือข่ายแบบใหม่ที่พัฒนาจากงานวิจัยในปริทัศน์วรรณกรรมซึ่งสามารถครอบคลุมปัญหาการวางแผนเครือข่ายได้เหมาะสมตามความต้องการของผู้ให้บริการเครือข่ายมากขึ้น

ส่วนที่สองอธิบายถึงทฤษฎีเกี่ยวกับการสื่อสารบอร์ด์แบนด์ไร้สายที่แพร่หลายในปัจจุบัน คือ ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless LAN) ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 (3G) และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ระบบไวแมกซ์ (WiMAX) โดยกล่าวถึงวิวัฒนาการรวมถึงสถาปัตยกรรมเครือข่ายด้วย และในส่วนนี้ยังได้กล่าวถึงแบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถี (Path Loss Model) สมการโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็ม ไบนารี (0-1 Integer Programming) การหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีซิมเพล็กซ์อัลกอริทึม (Simplex Algorithms) และพื้นฐานการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อ ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดต่อไป

2.1 กล่าวนำ

การวางแผนเครือข่ายระบบสื่อสารไร้สายในช่วงเชื่อมต่อสุดท้ายระหว่างเครือข่ายกับผู้ใช้บริการที่เรียกว่าโครงข่ายปลายทาง (Last Mile) นั้น ถือเป็นส่วนที่ต้องใช้งบประมาณการลงทุนสูงเพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานจากผู้ใช้บริการทั้งหมดอย่างมีประสิทธิภาพได้ สำหรับผู้ให้บริการเครือข่ายระบบสื่อสารไร้สายนั้น ต้องคำนึงถึงทั้งการรับประกันประสิทธิภาพการให้บริการและงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่ายไปพร้อมกัน เนื่องจากถ้าผู้ให้บริการสามารถให้บริการแก่ผู้ใช้บริการจำนวนมากอย่างมีประสิทธิภาพโดยลดงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่ายให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ทำให้ผู้ให้บริการสามารถได้รับผลกำไรกลับคืนปริมาณสูงในเวลาอันรวดเร็ว ดังนั้น การวางแผนเครือข่ายระบบสื่อสารไร้สายควรกระทำอย่างมีหลักการเพื่อให้งบประมาณในการลงทุนคุ้มค่ามากที่สุด

เนื่องจากการศึกษาและวิจัยงานด้านการวางแผนเครือข่ายไร้สายในช่วงเชื่อมต่อสุดท้ายระหว่างเครือข่ายกับผู้ใช้บริการ โดยหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานมีส่วนสำคัญในการวางแผนเครือข่ายไร้สาย ดังนั้นจึงมีงานวิจัยหลายด้านที่ให้ความสำคัญและทำการศึกษาวิธีการวางแผนเครือข่ายระบบสื่อสารไร้สายต่าง ๆ ในรูปแบบและเทคนิคที่แตกต่างกัน โดยมีจุดประสงค์เพื่อที่จะสามารถวางแผนเครือข่ายไร้สายให้มีประสิทธิภาพจากปัจจัยที่จำกัดด้านงบประมาณการลงทุนสำหรับการสร้างเครือข่าย

2.2 ปรัชญ่วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาและวิจัยทางด้านการวางแผนเครือข่ายระบบสื่อสารไร้สายด้วยวิธีต่าง ๆ โดยเน้นการนำเทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (0-1 Integer Programming) เพื่อหาผลลัพธ์จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ภายใต้เงื่อนไขและข้อจำกัดต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการวางแผนเครือข่าย ทว่างานวิจัยทางด้านการวางแผนเครือข่ายโดยหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานนั้นยังคงมีส่วนที่ส่งผลให้เกิดการพัฒนาวิธีการวางแผนเครือข่าย เพื่อให้ครอบคลุมปัญหามากยิ่งขึ้นดังนี้

2.2.1 จากงานวิจัยของ Hurley, S. (2000); Rawnsley, R. K., and Hurley, S. (2005) พบว่า

ปัญหาที่ได้ทำการพิจารณา : การวางแผนเครือข่ายโทรศัพท์ระบบเซลลูลาร์ (Cellular network) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐาน รวมถึงการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่จำเป็นโดยใช้งบประมาณการลงทุนน้อยที่สุด

ลักษณะงานวิจัย : ทำการศึกษาและวิจัยสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเพื่อเลือกติดตั้งสถานีฐานของโทรศัพท์ระบบเซลลูลาร์ภายใต้ข้อจำกัดด้านพื้นที่ครอบคลุม (Coverage) สัญญาณแทรกสอด (Interference) การย้ายข้ามสถานีฐาน (Hand Over) และปริมาณความจุ (Capacity) ของเครือข่ายโดยกำหนดปัญหาแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มและใช้อัลกอริทึมแบบจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing Algorithms) เพื่อหาคำตอบของการวางแผนเครือข่ายให้ได้ตามวัตถุประสงค์

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ : ถึงแม้การวางแผนเครือข่ายโทรศัพท์ระบบเซลลูลาร์ที่ถูกออกแบบนั้นมีประโยชน์ในการนำไปใช้ในการติดตั้งเครือข่ายจริงซึ่งทำการพิจารณาข้อจำกัดสำคัญอย่างครอบคลุม และสามารถใช้เป็นต้นแบบในการออกแบบเครือข่ายระบบสื่อสารไร้สายอื่น ๆ ได้ในเวลาต่อมา แต่การหาคำตอบโดยใช้อัลกอริทึมแบบจำลองการอบเหนียว ไม่สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ และในงานวิจัยเหล่านี้ยังไม่ได้พิจารณาถึงอุปกรณ์ทวนสัญญาณใด ๆ

2.2.2 จากงานวิจัยของ Velez, F. J., et al (2006); Lannoo, B., et al (2007) พบว่า

ปัญหาที่ได้ทำการพิจารณา : จำลองการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์บนพื้นที่จริง

ลักษณะงานวิจัย : งานวิจัยเหล่านี้ได้ทำการศึกษาโดยการจำลองการติดตั้งเครือข่ายลงบนพื้นที่ให้บริการจริง แล้วพิจารณาพารามิเตอร์ที่ได้หลังจากการวางแผนเช่นพื้นที่ครอบคลุม อัตราเร็วของข้อมูล รวมไปถึงผลกำไรจากการลงทุน

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ : งานวิจัยเหล่านี้ทำการกำหนดที่ตั้งสถานีฐานตามการคาดคะเนของผู้วางแผนซึ่งไม่ได้นำหลักการทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน ดังนั้นเครือข่ายไวแมกซ์จากงานวิจัยเหล่านี้ยังสามารถทำการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการลงทุนตลอดจนการรับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน

2.2.3 จากงานวิจัยของ Theodoros, T., et al (2007); Marques, M., et al (2007) พบว่า

ปัญหาที่ได้ทำการพิจารณา : วางแผนเครือข่ายไวแมกซ์เชิงปฏิบัติเพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

ลักษณะงานวิจัย : งานวิจัยเหล่านี้ได้ทำการศึกษาการติดตั้งอุปกรณ์เครือข่ายไวแมกซ์ลงบนพื้นที่ให้บริการจริง ซึ่งลักษณะภูมิประเทศของแต่ละงานวิจัยนั้นแตกต่างกัน แล้วพิจารณาพารามิเตอร์ที่ได้หลังจากการวางแผนเครือข่ายเช่นพื้นที่ครอบคลุม อัตราเร็วในการรับและส่งข้อมูล

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ : งานวิจัยเหล่านี้ทำการกำหนดที่ตั้งสถานีฐานตามการคาดคะเนของผู้วางแผนเครือข่ายซึ่งไม่ได้นำหลักการทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน ดังนั้นเครือข่ายไวแมกซ์ที่ได้วางแผนไปนั้นยังสามารถทำการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานที่เหมาะสมที่สุด

2.2.4 จากงานวิจัยของ Teterin, V., Hurley, S., and Allen, S. M. (2008) พบว่า

ปัญหาที่ได้ทำการพิจารณา : การวางแผนเครือข่ายของระบบไวแมกซ์โดยคัดเลือกตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานที่เหมาะสมที่สุด

ลักษณะงานวิจัย : ทำการศึกษาและวิจัยสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเพื่อเลือกติดตั้งสถานีฐานของเครือข่ายไวแมกซ์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาพื้นที่ครอบคลุม (Coverage) สัญญาณแทรกสอด (Interference) ปริมาณความจุ (Capacity) และมูลค่าการลงทุนสร้างเครือข่าย ที่เหมาะสมที่สุดและใช้อัลกอริทึมแบบจำลองการอบเหนียว เพื่อหาคำตอบสำหรับการวางแผนเครือข่ายให้ได้ตามวัตถุประสงค์

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ : งานวิจัยเหล่านี้ไม่ได้พิจารณาถึงสถานีถ่ายทอดซึ่งสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสถานีฐานได้และอัลกอริทึมแบบจำลองการอบเหนียวไม่สามารถรับประกันถึงการหาคำตอบที่ดีที่สุดในการวางแผนเครือข่ายได้

2.2.5 จากงานวิจัยของ Yang, Y., Murphy, S., and Murphy, L. (2008) พบว่า

ปัญหาที่ได้ทำการพิจารณา : การวางแผนเครือข่ายของระบบไวแมกซ์โดยคัดเลือกตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสมที่สุด

ลักษณะงานวิจัย : ทำการศึกษาและวิจัยถึงสมการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มเพื่อเลือกติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดของเครือข่ายไวแมกซ์ โดยมีวัตถุประสงค์มูลค่าการลงทุนสร้างเครือข่ายและกำลังส่งจากเครือข่ายไปยังผู้ใช้ที่เหมาะสมที่สุด และนำอัลกอริทึมแบบแตกสาขาและกำหนดขอบเขต (Branch and Bound Algorithm) ใช้ในการหาผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการวางแผนเครือข่าย

จุดที่สามารถพัฒนาต่อ : ถึงแม้ว่างานวิจัยนี้พิจารณาถึงการใช้สถานีถ่ายทอดเข้ามาเพิ่มประสิทธิภาพของสถานีฐาน แต่ยังไม่ได้อภิปรายถึงการรับประกันคุณภาพการให้บริการซึ่งประกอบด้วย การรับประกันสัญญาณครอบคลุมและการรับประกันอัตราเร็วในการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน

2.3 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมข้างต้นพบว่า กลุ่มงานวิจัยทั้งหมดได้มุ่งเน้นการวางแผนเครือข่ายสื่อสารไร้สายที่มีพื้นฐานสถาปัตยกรรมของระบบโทรศัพท์แบบเซลลูลาร์ เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ และรักษาคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้งานเครือข่าย และถ้าพิจารณาถึงวิธีการวางแผนเครือข่ายแล้ว สามารถแบ่งประเภทของวิธีการวางแผนเครือข่ายออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มแรกคืองานวิจัยจากหัวข้อที่ 2.2.2 และหัวข้อ 2.2.3 ได้ทำการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ โดยทำการกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานด้วยการคาดคะเนโดยผู้วางแผนเอง ซึ่งไม่ได้ใช้หลักการทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วยในการวางแผนเครือข่ายผลการวางแผนเครือข่ายจึงไม่เป็นผลลัพธ์ที่เหมาะสมที่สุด กลุ่มที่สองคืองานวิจัยจากหัวข้อ 2.2.1 และ 2.2.4 ได้ทำการวางแผนเครือข่ายสื่อสารไร้สายโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นเลขจำนวนเต็มกำหนดปัญหาเพื่อหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานที่เหมาะสมที่สุด และกลุ่มที่สามคืองานวิจัยจากหัวข้อ 2.2.5 ได้ทำการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์โดยใช้สมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสมที่สุด แต่ยังไม่พิจารณาถึงการรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน

จากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องพบว่า สมการทางคณิตศาสตร์การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มของการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ยังไม่พิจารณาครอบคลุมถึงการรับประกันคุณภาพการให้บริการทั้งด้านสัญญาณครอบคลุมและอัตราเร็วในการให้บริการ ซึ่งงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มุ่งเน้นการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์โดยหาตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสมที่สุด โดยการลดงบประมาณในการลงทุนและรับประกันคุณภาพ

การให้บริการแก่ผู้ใช้ นอกจากนี้ งานวิจัยยังได้นำเสนอวิธีการวางแผนเครือข่ายโดยหาตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสมที่สุดภายใต้งบประมาณที่จำกัด เพื่อให้สามารถรับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้งานมากที่สุดด้วย

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ โดยหาตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด โดยพัฒนาสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม เข้ามาช่วยในการวางแผนเครือข่ายที่ได้เหมาะสมที่สุด และทำการทดลองวางแผนเครือข่ายทั้งในพื้นที่จำลอง และพื้นที่จริง แล้วทำการวิเคราะห์ผลการวางแผนเครือข่าย ทั้งด้านสัญญาณครอบคลุมและอัตราเร็วในการเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้งานกับเครือข่าย

2.4 นวัตกรรมงานวิจัยของวิทยานิพนธ์

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้มุ่งคิดค้นวิธีการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ โดยการหาตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐาน และสถานีถ่ายทอด โดยสามารถรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้งานในพื้นที่ให้บริการ และการวางแผนเครือข่ายยังคำนึงถึงข้อจำกัดด้านงบประมาณการลงทุน เพื่อให้มีการใช้งบประมาณอย่างคุ้มค่า โดยวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ได้เริ่มต้นศึกษาการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ในพื้นที่ให้บริการที่ได้จากการจำลองซึ่งตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีฐาน สถานีถ่ายทอด และตำแหน่งสำหรับรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้ได้มาจากการสุ่มแบบเท่ากัน (Uniform Random) ในการหาตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสมที่สุดนั้นได้พัฒนาสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดงบประมาณการลงทุนสร้างเครือข่ายให้เหลือน้อยที่สุดโดยคำนึงถึงข้อจำกัดด้านการรับประกันการให้บริการในด้านสัญญาณครอบคลุมและอัตราเร็วทางกายภาพแก่ผู้ใช้งาน นอกจากนี้ วิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ยังได้นำเสนอการพัฒนาสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม สำหรับการวางแผนเครือข่ายที่มีงบประมาณการลงทุนสร้างเครือข่ายที่จำกัด โดยหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด เพื่อให้การรับประกันคุณภาพการให้บริการทั้งในด้านสัญญาณและอัตราเร็ว ครอบคลุมผู้ใช้งานให้มากที่สุด นอกจากการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ลงบนพื้นที่ศึกษาที่จำลองขึ้นมาแล้ว วิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ยังได้ทำการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ลงบนพื้นที่ให้บริการจริง เพื่อยืนยันถึงประโยชน์ของงานวิจัยที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานจริงได้สำหรับผู้ให้บริการที่ต้องการลงทุนติดตั้งเครือข่ายไวแมกซ์อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการรับประกันคุณภาพการให้บริการ และความคุ้มค่าของงบประมาณการลงทุน

2.5 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.5.1 การสื่อสารแบบบรอดแบนด์ไร้สาย (Broadband Wireless Access)

เมื่อพิจารณาถึงวิวัฒนาการของระบบสื่อสารโทรคมนาคมจากอดีตจนถึงปัจจุบันที่นิยมกันอย่างแพร่หลายจนกลายเป็นสิ่งจำเป็นสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มเทคโนโลยีคือ การสื่อสารแบบมีสาย (Wire Line Communication) ซึ่งมีพื้นฐานมาจากการสื่อสารทางเสียงผ่านคู่สายโทรศัพท์ กับ การสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless Communication) ซึ่งมีพื้นฐานจากระบบโทรศัพท์แบบเซลลูลาร์ (Cellular Phone System) การสื่อสารทั้งสองกลุ่มนี้เป็นการเชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายสื่อสารโทรคมนาคมกับผู้ใช้บริการ (User-Network Interface) การพัฒนาของเทคโนโลยีทำให้เกิดการสื่อสารข้อมูลผ่านระบบสื่อสารทั้งสองประเภท คือ การสื่อสารข้อมูลผ่านสายทองแดงสำหรับการสื่อสารแบบมีสาย และผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในกรณีของการสื่อสารไร้สาย และด้วยความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทำให้การสื่อสารข้อมูลสามารถรองรับการสื่อสารในอัตราเร็วยิ่งขึ้นได้ นั่นคือ เทคโนโลยีบรอดแบนด์ (Broadband Technology) ซึ่งเริ่มต้นจากเทคโนโลยีดีเอสแอล (Digital Subscriber Line : DSL) ซึ่งเป็นการสื่อสารบรอดแบนด์โดยใช้สายทองแดง และพัฒนาเป็นเอดีเอสแอล (Asymmetric DSL : ADSL) เพื่อรองรับการใช้งานสื่อสารข้อมูลอินเทอร์เน็ต ซึ่งให้บริการอย่างแพร่หลายในหลายประเทศทั่วโลก

ในส่วนของวิวัฒนาการของเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายนั้น เริ่มจากการแพร่หลายของโทรศัพท์เคลื่อนที่จีเอสเอ็ม (Global System for Mobile Communications : GSM) และซีดีเอ็มเอ (Code Division Multiple Access : CDMA) ซึ่งถูกพัฒนาไปสู่การสื่อสารข้อมูลที่ไม่ใช่เสียง (Non-Voice) กลายเป็นข้อกำหนดสำหรับเทคโนโลยีสื่อสารโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2.5 และยุคที่ 2.75 รวมถึงการพัฒนาสู่การรองรับการสื่อสารข้อมูลไร้สายเต็มรูปแบบในมาตรฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ด้วยเทคโนโลยียูเอ็มทีเอส (UMTS) และ ซีดีเอ็มเอ 2000 (cdma2000)

การสื่อสารข้อมูลไร้สายอีกกลุ่มหนึ่งที่เน้นการใช้งานการรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ คือ เทคโนโลยีเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย (Wireless Local Area Network : WLAN) เป็นการสื่อสารไร้สายความเร็วสูง บนมาตรฐาน IEEE 802.11 ซึ่งมีข้อกำหนดในด้านพื้นที่ให้บริการค่อนข้างเล็ก และอีกเทคโนโลยีหนึ่ง que พัฒนาจากเครือข่ายท้องถิ่นไร้สายคือเทคโนโลยีไวแมกซ์ (Worldwide Interoperability for Microwave Access : WiMAX) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายที่รวมเอาคุณสมบัติเด่นของเครือข่ายคอมพิวเตอร์และเครือข่ายโทรคมนาคมเข้าไว้ด้วยกัน บนมาตรฐาน IEEE 802.16

จากที่กล่าวมาในข้างต้น ทั้งระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย และระบบไวแมกซ์นั้นเป็นการพัฒนาการสื่อสาร ไปสู่การสื่อสารแบบบรอดแบนด์ไร้สาย (Broadband Wireless Access : BWA) ซึ่งได้รวมข้อดีจากการสื่อสารบรอดแบนด์แบบมีสาย

ที่สามารถสื่อสารด้วยความเร็วสูง กับความสามารถในการรองรับการเคลื่อนที่จากการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย จึงสามารถให้บริการการสื่อสารความเร็วสูงไร้สายแก่ผู้ใช้งานได้อย่างดี

ในประเทศไทยนั้นปัญหาความแตกต่างทางดิจิทัล (Digital Divided) ยังเป็นปัญหาที่ทุกภาคส่วนที่เกี่ยวข้องร่วมกันแก้ไข ซึ่งการนำการสื่อสารแบบบรอดแบนด์ไร้สาย (BWA) เข้ามาให้บริการเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาคอขวดทางโครงสร้างพื้นฐาน และนำไปสู่การลดปัญหาความแตกต่างทางดิจิทัลได้ แต่เมื่อพิจารณาการสื่อสารแบบบรอดแบนด์ไร้สาย (BWA) ทั้งสามระบบคือ ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย และระบบไวแมกซ์ จากการเปรียบเทียบในตารางที่ 2.1 เห็นได้ว่าระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 และระบบไวแมกซ์มีข้อได้เปรียบทางด้านขนาดของพื้นที่ให้บริการ ซึ่งสามารถลดโครงสร้างพื้นฐานในส่วนที่เป็นโครงข่ายปลายทาง (Last Mile) ระหว่างผู้ใช้งานกับเครือข่าย ทำให้สามารถลดการลงทุนได้ แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 และระบบไวแมกซ์แล้ว ระบบไวแมกซ์มีข้อได้เปรียบในด้านพื้นที่ให้บริการและอัตราเร็วในการให้บริการมากกว่า หัวข้อต่อไปได้กล่าวถึงเทคโนโลยีไวแมกซ์ทั้งมาตรฐานและโครงสร้างพื้นฐานไว้พอสังเขป

ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบการสื่อสารแบบบรอดแบนด์ไร้สายระหว่าง ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 ระบบเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย และระบบไวแมกซ์

	WiMAX	3G		WLAN
	802.16-2009	HSPA+	1xEVDO Rev A	802.11
ระบบเชื่อมโยงขาลง (Mbps)	128	14.4	3.1	54 (Shared)
ระบบเชื่อมโยงขาขึ้น (Mbps)	56	5.76	1.8	
แบนด์วิดท์ (MHz)	20	5	2.5	20
การเข้าถึงหลายทาง	SOFDMA	CDMA	CDMA	CSMA/CA
คูเพล็กซ์	TDD	FDD	FDD	TDD
การเคลื่อนที่	ปานกลาง	สูง	สูง	ต่ำ
พื้นที่ครอบคลุม	ปานกลาง	กว้าง	กว้าง	เล็ก
มาตรฐาน	IEEE 802.16	3GPP	3GPP3	IEEE 802.11

2.5.2 ระบบไวแมกซ์

ระบบไวแมกซ์ (Worldwide Interoperability for Microwave Access : WiMAX) มีวิวัฒนาการมาจากเทคโนโลยีการรับส่งข้อมูล โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุย่านไมโครเวฟ ซึ่งเดิมมีรูปแบบการสื่อสารในแนวเส้นสายตา (Line of Sight : LOS) และเป็นการเชื่อมต่อเพื่อส่งสัญญาณ

จากจุดหนึ่งไปสู่อีกจุดหนึ่ง (Point to Point) โดยมีการพัฒนาเปลี่ยนแปลงให้ระบบไวแมกซ์นั้นมีรูปแบบการสื่อสารแบบแพร่กระจายคลื่นวิทยุรอบทิศทาง (Omni-direction) หรือเฉพาะทิศทาง (Directional) โดยขึ้นกับการเลือกใช้ระบบสายอากาศ ถือเป็นการสื่อสารแบบนอกแนวสายตา (Non Line of Sight : NLOS) เช่นเดียวกับการแพร่กระจายคลื่นวิทยุในกรณีของโครงข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่เซลลูลาร์ทั่วไป ไวแมกซ์เป็นเทคโนโลยีที่ถูกพัฒนาขึ้นมาบนมาตรฐาน IEEE 802.16 ซึ่งประวัติลำดับการพัฒนามาตรฐาน IEEE 802.16 และสถาปัตยกรรมเครือข่ายไวแมกซ์จะได้อธิบายในหัวข้อต่อไป

2.5.2.1 ลำดับของการพัฒนามาตรฐาน IEEE 802.16

ในอดีตนั้นการให้บริการการสื่อสารแบบบรอดแบนด์ไร้สาย (BWA) จะต้องขึ้นอยู่กับผู้ผลิตอุปกรณ์และผู้ให้บริการเครือข่ายซึ่งปราศจากมาตรฐานและมีราคาสูง ดังนั้นองค์กร The Institute of Electrical and Electronics Engineer Standard Association (IEEE-SA) ของประเทศสหรัฐอเมริกาได้พัฒนามาตรฐาน IEEE 802.16 เพื่อให้บริการการสื่อสารแบบบรอดแบนด์ไร้สาย (BWA) และองค์กร European Telecommunications Standards Institute (ETSI) ของทวีปยุโรปได้พัฒนามาตรฐาน HyperMAN ขึ้นมาเพื่อให้บริการการสื่อสารแบบบรอดแบนด์ไร้สาย (BWA) ในเวลาใกล้เคียงกัน ซึ่งมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลและพัฒนาคู่ขนานเรื่อยมาจนปีคริสต์ศักราช 2001 บริษัทผู้ผลิตอุปกรณ์ ผู้ผลิตส่วนประกอบและผู้ผลิตหน่วยประมวลผลได้ร่วมมือกันจัดตั้งกลุ่มความร่วมมือไวแมกซ์ (WiMAX Forum) ซึ่งเป็นองค์กรที่ไม่แสวงหากำไรเพื่อพัฒนามาตรฐานและกำหนดทิศทางการพัฒนาระบบไวแมกซ์ร่วมกัน หลังจากนั้นจึงได้ออกมาตรฐานของไวแมกซ์มากมายซึ่งได้อธิบายต่อไป

ตารางที่ 2.2 ลำดับการพัฒนามาตรฐานของระบบไวแมกซ์

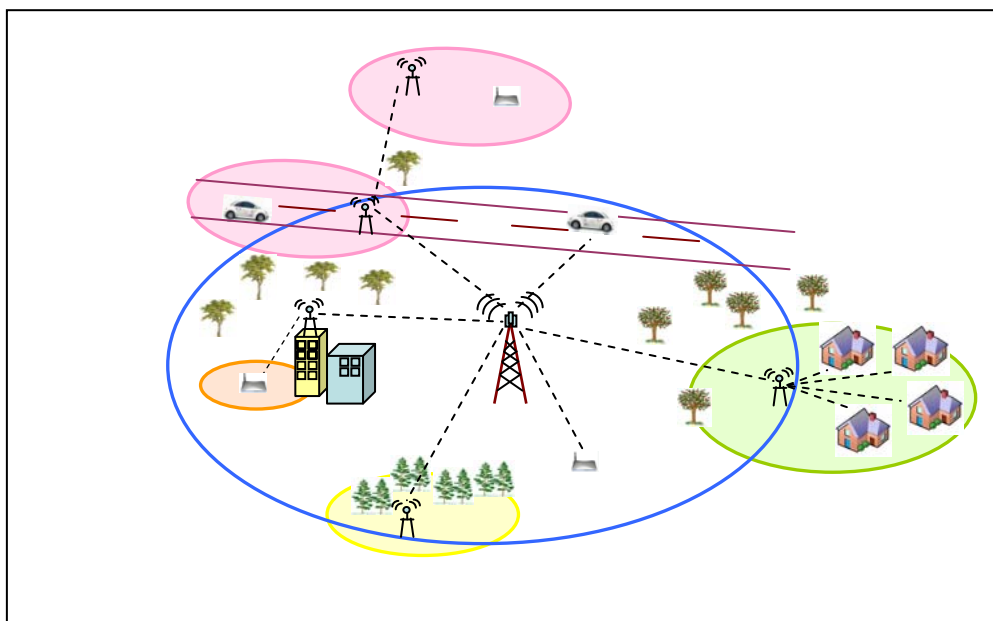
มาตรฐาน/การปรับปรุง	คำอธิบาย
802.16	มาตรฐานขั้นพื้นฐานที่ประกาศใช้ในปีค.ศ. 2001 ให้การเชื่อมโยงข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูงที่ความถี่ระหว่าง 11 และ 60 GHz สนับสนุนการเชื่อมต่อในแนวเส้นสายตา (Line of Sight)
802.16a	เป็นการปรับปรุงมาตรฐานเดิมโดยลดความถี่พาห်ลงมาที่ย่านความถี่ 2-11 GHz ซึ่งทำให้สามารถสนับสนุนการเชื่อมต่อที่อยู่นอกแนวเส้นสายตา (Non-line of Sight)
802.16b	ปรับปรุงมาตรฐานเดิมโดยเพิ่มสเปกตรัมย่าน 5-6 GHz และให้คุณภาพการให้บริการด้านภาพและเสียงบนเวลาจริง

ตารางที่ 2.2 ลำดับการพัฒนามาตรฐานของระบบไวแมกซ์ (ต่อ)

มาตรฐาน/การปรับปรุง	คำอธิบาย
802.16c	ปรับปรุงมาตรฐาน 802.16 โดยเพิ่มรายละเอียดของการเชื่อมต่อย่านความถี่ระหว่าง 11 และ 60 GHz เพื่อยกระดับความสามารถในการทำงานร่วมกัน (Interoperability) ของอุปกรณ์ในเครือข่าย
802.16d (802.16-2004)	เป็นการปรับปรุงมาตรฐานครั้งใหญ่ของ 802.16 ซึ่งได้ยกเลิกมาตรฐาน 802.16 ก่อนหน้านี้ หลังจากการประกาศมาตรฐาน 802.16d เป็นมาตรฐานสำหรับเครือข่ายไร้สายที่เครื่องลูกข่ายอยู่กับที่ และเป็นมาตรฐานแรกที่มีผู้ให้บริการในเชิงพาณิชย์
802.16e (802.16-2005)	เป็นมาตรฐานที่ออกแบบมาให้สนับสนุนการเคลื่อนที่อย่างเต็มรูปแบบ (Mobility) ซึ่งใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ลูกข่ายแบบเคลื่อนที่เช่น คอมพิวเตอร์แบบพกพา โทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น โดยให้รัศมีสำหรับบริการที่ 1.6 – 4.8 กิโลเมตร มีระบบที่ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถสื่อสารได้โดยให้คุณภาพในการสื่อสารที่ดีและมีเสถียรภาพขณะใช้งาน แม้จะมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา
802.16f	ปรับปรุงมาตรฐาน 802.16d โดยเพิ่มฐานข้อมูลสารสนเทศการจัดการ (Management Information Base)
802.16g	ปรับปรุงโดยการเพิ่มขึ้นตอนเกี่ยวกับการจัดการการให้บริการ
802.16h	ปรับปรุงกลไกการทำงานร่วมกันในย่านความถี่สัมปทาน
802.16j	ปรับปรุงด้านพื้นที่ให้บริการ โดยใช้สถานีถ่ายทอดแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-hop Relay Station) เป็นอุปกรณ์ตัวกลางระหว่างสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการให้บริการและใช้ทรัพยากรเครือข่ายได้อย่างคุ้มค่า
802.16Rev2 802.16m	เป็นการปรับปรุงเชิงพัฒนา ซึ่งมีความประสงค์ที่จะรวมมาตรฐาน 802.16-2004, 802.16e, 802.16f/g/i เข้าไว้เอกสารฉบับใหม่ เป็นปรับปรุงเพื่อให้ได้การต่อประสานทางอากาศ (Air Interface) ในขั้นสูง ซึ่งสามารถเชื่อมต่อด้วยอัตราเร็ว 1 Gbps สำหรับลูกข่ายแบบคงที่ และ 100 Mbps สำหรับลูกข่ายแบบเคลื่อนที่ โดยใช้แบนวิธ 20 MHz หรือมากกว่านี้

2.5.2.2 สถาปัตยกรรมระบบไวแมกซ์

สถาปัตยกรรมของระบบไวแมกซ์ในมาตรฐาน IEEE 802.16j นั้น ประกอบไปด้วยอุปกรณ์สำคัญสามส่วนคือสถานีฐาน (Base Station : BS) สถานีถ่ายทอด (Relay Station : RS) และสถานีลูกข่าย (Subscriber Station : SS) ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งหน้าที่และความสำคัญของแต่ละส่วนจะได้อธิบายต่อไปดังนี้



รูปที่ 2.1 สถาปัตยกรรมเครือข่ายระบบไวแมกซ์

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

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

- อุปกรณ์ลูกข่ายแบบคงที่ (Fixed CPE) อุปกรณ์ชนิดนี้จะถูกติดตั้งสายอากาศเพื่อรับสัญญาณจากเครือข่ายไวบนเสาสูง เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อในแนวเส้นสายตา (Line of Sight) กับเครือข่ายได้ ซึ่งการเชื่อมต่อลักษณะนี้ไม่มีสิ่งกีดขวางระหว่างสถานีภาคส่งกับอุปกรณ์ลูกข่าย ทำให้ได้รับกำลังสัญญาณที่ดีและอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลสูง

- อุปกรณ์ลูกข่ายแบบพกพา (Portable CPE หรือ Nomadic CPE) อุปกรณ์ชนิดนี้สามารถพกพาเคลื่อนย้ายได้ แต่ขณะใช้งานต้องอยู่กับที่ หรือสามารถเคลื่อนที่ช้า ๆ ในระยะทางใกล้

- อุปกรณ์ลูกข่ายแบบเคลื่อนที่ (Mobile CPE) เป็นอุปกรณ์ลูกข่ายชนิดที่สามารถใช้งานในขณะที่เคลื่อนที่ได้ ซึ่งจะอยู่ในรูปของ อุปกรณ์เสริมที่สามารถต่อเข้ากับ คอมพิวเตอร์แบบพกพา หรืออาจถูกรวมเป็นอุปกรณ์พื้นฐานในคอมพิวเตอร์แบบพกพาหรือใน โทรศัพท์เคลื่อนที่ไปในตัว

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

2.5.3 เทคโนโลยีไวแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อ

2.5.3.1 มาตรฐาน IEEE 802.16j สำหรับไวแมกซ์

มาตรฐาน IEEE 802.16j ที่ประกาศใช้ในปีคริสตศักราช 2008 นั้นใช้การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ตั้งฉาก (Orthogonal Frequency Division Multiple Access : OFDMA) เป็นพื้นฐานของชั้นสื่อสารกายภาพ (Physical Layer) และชั้นสื่อสารถ่ายทอดควบคุมการใช้สื่อ (Medium Access Control Layer) ซึ่งพัฒนาจากมาตรฐาน IEEE 802.16 ซึ่งใช้งานในย่านความถี่สัมปทานโดยมีการเพิ่มสถานีถ่ายทอด เข้ามาในเครือข่าย จุดประสงค์ของการใช้เครือข่ายไวแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อคือการขยายพื้นที่ครอบคลุม เพิ่มวิสัยสามารถ (Throughput) และปริมาณความจุ ให้กับเครือข่ายมาตรฐาน IEEE 802.16 การเพิ่มสถานีถ่ายทอดเข้ามาในเครือข่ายได้ถูกออกแบบโดยไม่ให้มีผลกระทบกับอุปกรณ์ลูกข่าย สถานีถ่ายทอดเป็นอุปกรณ์ทางเลือกที่ใช้งานเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครือข่ายเข้าถึง (Access Network) ในเครือข่ายไวแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อนั้น สถานีฐานแบบเดิมอาจถูกแทนที่ด้วย สถานีฐานที่สามารถรองรับสถานีถ่ายทอด และสถานีถ่ายทอดจำนวน 1 สถานีหรือมากกว่านี้ สัญญาณควบคุมระหว่างสถานีลูกข่ายกับสถานีฐานนั้นจะถูกถ่ายทอดโดยสถานีถ่ายทอด ดังนั้น ทั้งพื้นที่ครอบคลุมและประสิทธิภาพของระบบจึงเพิ่มขึ้นเมื่อเครือข่ายไวแมกซ์มีการใช้งานสถานีถ่ายทอด แต่ละสถานีถ่ายทอดจะอยู่ภายใต้การควบคุมของสถานีฐานที่เป็นสถานีแม่ข่าย สำหรับระบบไวแมกซ์ที่มีช่วงเชื่อมต่อมากกว่าสองช่วง สัญญาณข้อมูลและสัญญาณควบคุมระหว่างสถานีถ่ายทอดที่ให้บริการอุปกรณ์ลูกข่าย (Access RS) กับสถานีฐานจะถูกถ่ายทอดโดยสถานีถ่ายทอดตัวกลาง (Intermediate RS) สถานีถ่ายทอดอาจถูกติดตั้งแบบคงที่เช่นติดกับตึกสูง หรืออาจติดตั้งแบบเคลื่อนที่ได้เช่นการติดตั้งบนยานพาหนะก็ได้ และสถานีลูกข่ายนั้นยังสามารถเชื่อมต่อกับสถานีฐานได้เช่นเดิม

2.5.3.1.1 สถานีถ่ายทอดแบบรวมศูนย์และสถานีถ่ายทอดแบบกระจายศูนย์ ในมาตรฐาน IEEE 802.16j มีการระบุการจัดการการเข้าใช้ทรัพยากรให้กับสถานีลูกข่ายโดยผ่านสถานีถ่ายทอดอยู่สองแบบคือ แบบรวมศูนย์ (Centralized) และแบบกระจายศูนย์ (Decentralize) สำหรับการจัดการการเข้าใช้ทรัพยากรแบบรวมศูนย์นั้นมีการกำหนดจากสถานีฐาน โดยสถานีฐานทำหน้าที่กำหนดแบนด์วิธ และสร้างสัญญาณควบคุม รวมถึงข้อมูลควบคุมระบบเชื่อมโยงขาขึ้น (Uplink) และขาลง (Downlink) ให้กับการเชื่อมต่อแบบเข้าถึง (ระหว่างสถานีภาคส่งกับลูกข่าย) และแบบถ่ายทอด (ระหว่างสถานีฐานกับสถานีถ่ายทอด) ทั้งหมด ส่วนการจัดการการเข้าใช้ทรัพยากรแบบกระจายศูนย์นั้น สถานีถ่ายทอดสามารถกำหนดการอนุญาตเข้าใช้ทรัพยากรความถี่ให้กับสถานีลูกข่ายที่เชื่อมต่อกับสถานีถ่ายทอดได้เอง แต่ยังคงปฏิบัติงานร่วมกับสถานีฐานอยู่ โดยแต่ละสถานีถ่ายทอดสามารถกำหนดแบนด์วิธและสร้างสัญญาณควบคุม รวมถึงข้อมูลควบคุมระบบเชื่อมโยงให้แก่การเชื่อมต่อระหว่างสถานีลูกข่ายและสถานีถ่ายทอดที่อยู่ภายใต้การครอบคลุมได้เอง

2.5.3.1.2 สถานีถ่ายทอดแบบส่งผ่าน และสถานีถ่ายทอดแบบไม่ส่งผ่าน สำหรับสถานีถ่ายทอดแบบไม่ส่งผ่าน ตัวสถานีถ่ายทอดทำหน้าที่เหมือนสถานีฐาน ให้แก่สถานีลูกข่าย ซึ่งหมายความว่าสถานีถ่ายทอดทำการอนุญาตเข้าใช้ทรัพยากรแก่สถานีลูกข่าย และสร้างข้อมูลส่วนหัวเฟรม (Frame Header) รวมไปถึงสร้างสัญญาณควบคุมการเชื่อมโยง สถานีถ่ายทอดแบบไม่ส่งผ่านสามารถใช้การจัดการการเข้าใช้ทรัพยากรแบบรวมศูนย์และแบบกระจายศูนย์ได้ในกรณีของสถานีถ่ายทอดแบบส่งผ่าน ตัวสถานีถ่ายทอดเป็นเพียงอุปกรณ์ส่งผ่านข้อมูลจากสถานีฐานไปยังสถานีลูกข่าย ซึ่งหมายความว่าสถานีถ่ายทอดไม่ได้ทำหน้าที่จัดสรรทรัพยากรความถี่ให้กับสถานีลูกข่าย แต่สถานีที่ควบคุมสถานีถ่ายทอดแบบส่งผ่านซึ่งอาจจะเป็นสถานีฐานหรือสถานีถ่ายทอดก็ได้ ทำหน้าที่นี้แทน สถานีถ่ายทอดแบบส่งผ่านสามารถใช้การจัดการการเข้าใช้ทรัพยากรแบบรวมศูนย์ได้เพียงอย่างเดียว

2.5.3.1.3 สถานีถ่ายทอดแบบแถบความถี่ร่วมและแบบต่างแถบความถี่ ในกรณีของสถานีถ่ายทอดแบบแถบความถี่ร่วม (In-Band Relay) ความถี่พาห้จะถูกแบ่งสรรให้ใช้ร่วมกันระหว่างการเชื่อมต่อของสถานีฐาน และการเชื่อมต่อของสถานีถ่ายทอดกับสถานีที่อยู่ในพื้นที่ครอบคลุม ซึ่งในกรณีสถานีถ่ายทอดแบบแถบความถี่ร่วมนี้สามารถใช้งานแถบสเปกตรัมความถี่ได้อย่างคุ้มค่า ส่วนในกรณีสถานีถ่ายทอดแบบต่างแถบความถี่ (Out-of-Band Relay) สถานีฐานใช้ความถี่พาห้ย่านหนึ่งสำหรับการเชื่อมต่อไปยังสถานีถ่ายทอดและสถานีลูกข่าย ส่วนสถานีถ่ายทอดใช้ความถี่พาห้ย่านหนึ่งสำหรับการเชื่อมต่อไปยังสถานีถ่ายทอดหรือสถานีลูกข่ายที่อยู่ภายใต้การควบคุม ซึ่งผู้ให้บริการเครือข่ายต้องใช้สเปกตรัมความถี่เพิ่มมากขึ้นในกรณีเลือกใช้สถานีถ่ายทอดแบบต่างแถบความถี่

2.5.3.1.4 การถอดรหัสสัญญาณแล้วส่งต่อ และการขยายสัญญาณแล้วส่งต่อ การทำงานของสถานีถ่ายทอดแบบขยายสัญญาณแล้วส่งต่อ (Amplified and Forward) นั้นสถานีถ่ายทอดจะทำหน้าที่เสมือนอุปกรณ์ทวนสัญญาณแบบอนาล็อก และสร้างสัญญาณที่ได้รับมาขึ้นใหม่ซึ่งก็คือการขยายสัญญาณนั่นเอง ซึ่งในกรณีนี้มีข้อเสียคือสัญญาณรบกวนจะถูกขยายขึ้นมาพร้อมสัญญาณข้อมูลด้วย ส่วนการทำงานของสถานีถ่ายทอดแบบถอดรหัสสัญญาณแล้วส่งต่อ (Decode and Forward) สถานีถ่ายทอดจะทำการสร้างสัญญาณใหม่โดยทำการถอดรหัสสัญญาณที่ได้รับมา แล้วเข้ารหัสใหม่ก่อนส่งออก ซึ่งกรณีนี้เหมาะกับการนำไปใช้งาน

2.5.3.2 รูปแบบการใช้งานสถานีถ่ายทอดสำหรับการวางแผนเครือข่าย

สถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อสามารถแบ่งออกเป็นสามแบบตามการนำไปประยุกต์ใช้งานในเครือข่าย คือสถานีถ่ายทอดแบบคงที่ (Fixed RS) สำหรับการใช้งานแบบภายนอกและภายในอาคาร สถานีถ่ายทอดแบบย้ายตำแหน่งได้ (Nomadic RS) สำหรับการใช้งานในพื้นที่ชั่วคราว และสถานีถ่ายทอดแบบเคลื่อนที่ (Mobile RS) สำหรับพื้นที่ให้บริการที่มีการเคลื่อนที่ สถานีถ่ายทอดทั้งสามประเภทสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพเครือข่ายรวมถึงขยายพื้นที่ครอบคลุมและเพิ่มวิสัยทัศน์ตามการประยุกต์ใช้งานในเครือข่าย แต่ในมุมมองของสถานีถ่ายทอดแบบเคลื่อนที่อาจยังเป็นไปได้ยากในการใช้งานเนื่องจากประเด็นของปริมาณสัญญาณแทรกสอดและประเด็นของการย้ายข้ามสถานีแม่ข่าย ดังนั้นในงานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้มุ่งประเด็นไปที่การวางแผนเครือข่ายในรูปแบบที่สถานีถ่ายทอดมีการติดตั้งโครงสร้างพื้นฐานแบบคงที่ ซึ่งสถานีถ่ายทอดแบบคงที่นี้สามารถใช้กับการวางแผนเครือข่ายของผู้ให้บริการที่ไม่ได้ให้บริการเครือข่ายมาก่อน (Greenfield Operator) หรือผู้ให้บริการที่ให้บริการเครือข่ายอยู่เดิมแล้ว (Mature Operator)

2.5.3.2.1 รูปแบบการใช้งานสถานีถ่ายทอดแบบคงที่ ในกรณีของสถานีถ่ายทอดแบบคงที่ ผู้ให้บริการเครือข่ายใช้สถานีถ่ายทอดในเครือข่ายเพื่อปรับปรุงพื้นที่ครอบคลุมปริมาณความจุ และวิสัยทัศน์ในพื้นที่ภายในเซลล์ซึ่งสถานีฐานไม่สามารถส่งสัญญาณครอบคลุมถึง หรือขยายพื้นที่ครอบคลุมให้มากขึ้นกว่าที่สถานีฐานจะส่งสัญญาณครอบคลุมถึงได้ ผู้ให้บริการเครือข่ายสามารถควบคุมพื้นที่ครอบคลุมและความจุของเครือข่าย รวมไปถึงการลดสัญญาณแทรกสอดในพื้นที่ให้บริการ สถานีถ่ายทอดสามารถติดตั้งตามขอบถนนเช่น เสาสูง หอคอย ยอดตึกหรือข้างตึก เสาไฟส่องสว่าง หรือที่อื่น ๆ และสามารถติดตั้งในทุกตำแหน่งที่สถานีฐานขนาดสามารถติดตั้งได้ สถานีถ่ายทอดสามารถใช้เป็นตัวเลือกในการปรับปรุงสัญญาณภายหลังการให้บริการ หรือใช้ในการเริ่มวางแผนเครือข่ายในพื้นที่ที่ยังไม่ได้ให้บริการ การใช้งานสถานีถ่ายทอดนั้นคล้ายคลึงกับการใช้งานสถานีฐานขนาดเล็ก แต่การใช้งานสถานีถ่ายทอดนั้นช่วยให้มีการใช้งานความจุของสถานีฐานอย่างมีประสิทธิภาพ สถานีถ่ายทอดอาจติดตั้งสายอากาศสองชุดคือสายอากาศแบบมีทิศทางเพื่อเชื่อมต่อในแนวเส้นสายคาบกับสถานีฐานและสายอากาศอีกชุดเพื่อ

เชื่อมต่อสถานีลูกข่าย หรือสถานีถ่ายทอดอาจทำการเชื่อมต่อแบบนอกเส้นสายตากับสถานีฐาน ซึ่งขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่ให้บริการการใช้งานสถานีถ่ายทอดเพื่อปรับปรุงคุณภาพและวิสัยความสามารถ ในอาคาร อุโมงค์ หรือใต้ดิน เช่นสถานีรถไฟใต้ดิน ดังนั้นการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานและ สถานีถ่ายทอดส่วนใหญ่เป็นแบบนอกแนวเส้นสายตา แต่กรณีอาคารสูงชุดสายอากาศของสถานี ถ่ายทอดสามารถติดตั้งนอกอาคารเพื่อเชื่อมต่อกับสถานีฐานได้ และอีกชุดหนึ่งติดตั้งภายในอาคาร เพื่อให้มีสัญญาณครอบคลุมแก่สถานีลูกข่ายที่อยู่ชั้นล่าง

2.5.3.2.2 รูปแบบการใช้งานสถานีถ่ายทอดแบบย้ายตำแหน่ง สถานีถ่ายทอดแบบย้ายตำแหน่งถูกนำมาใช้แบบชั่วคราวสำหรับการเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมหรือปริมาณ ความจุในพื้นที่ที่สถานีฐานหรือสถานีถ่ายทอดแบบคงที่ไม่สามารถให้บริการได้ ผู้ให้บริการ เครือข่ายจะติดตั้งสถานีถ่ายทอดแบบย้ายตำแหน่งเมื่อมีเหตุการณ์ที่ผู้ใช้งานเข้าไปใช้งานหนาแน่น ชั่วคราว และสามารถยกเลิกการใช้งานเมื่อเหตุการณ์เหล่านั้นเสร็จสิ้น การใช้งานแบบชั่วคราวได้ รวมถึงกรณีที่มีภัยธรรมชาติ หรือเหตุการณ์ใด ๆ ที่สถานีฐานหรือสถานีถ่ายทอดแบบคงที่ถูกทำลาย หรือเหตุการณ์พิเศษเช่น การจัดกีฬา และการแสดงนิทรรศการ โดยสถานีถ่ายทอดสามารถเชื่อมต่อ แบบในและนอกแนวเส้นสายตากับสถานีฐานได้

2.5.3.2.3 รูปแบบการใช้งานสถานีถ่ายทอดสำหรับการบุกเบิกวางแผน เครือข่าย สำหรับผู้ให้บริการที่บุกเบิกติดตั้งเครือข่ายแล้ว ในระยะแรกของการให้บริการเครือข่าย นั้นจำนวนของผู้ใช้งานและปริมาณการจราจร (Traffic) ของข้อมูลจะถูกประเมินว่าอยู่ในระดับต่ำ เครือข่ายที่ให้บริการในระยะแรกจึงมีข้อจำกัดเพียงเรื่องพื้นที่ครอบคลุม การวางแผนเครือข่าย ไวแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อจึงเป็นผลดีในสองเรื่องคือ สามารถใช้สเปกตรัมที่มี อยู่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถประหยัดงบประมาณของการสร้างเครือข่ายได้อย่างมาก เนื่องจากสถานีถ่ายทอดมีราคาต่ำกว่าสถานีฐานขนาดเล็กและไม่ต้องลงทุนเรื่องการเชื่อมต่อ ระหว่างสถานีฐานขนาดเล็กเหล่านี้ด้วย ในระยะถัดมาซึ่งอาจเป็นเวลาสามหรือสี่ปีหลังจาก ให้บริการระยะแรกนั้น ถ้าความจุของเครือข่ายที่ให้บริการอยู่ไม่เพียงพอ วิธีแก้ไขที่เป็นไปได้คือ การทดแทนสถานีถ่ายทอดด้วยการติดตั้งสถานีฐานโดยอาจติดตั้งสถานีฐานขนาดเล็กซึ่งผู้ให้บริการ สามารถทำได้ไม่ยาก

2.5.3.2.4 รูปแบบการใช้งานสถานีถ่ายทอดสำหรับพื้นที่ที่มีการให้บริการ อยู่ก่อนแล้ว ผู้ให้บริการที่ให้บริการเครือข่ายไวแมกซ์อยู่ก่อนแล้วสามารถใช้สถานีถ่ายทอดเพื่อ จัดการปรับปรุงเครือข่าย เช่นตำแหน่งภายในเซลล์ที่สัญญาณบอดเนื่องจากมีสิ่งกีดขวาง ใช้จัดการ กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณการจราจรของข้อมูล ใ้รับมือกับเหตุการณ์พิเศษที่เกิดขึ้นชั่วคราว และ ใช้ขยายพื้นที่ครอบคลุมภายในอาคารหรืออุโมงค์ สถานีถ่ายทอดอาจใช้ติดตั้งในพื้นที่ชนบทที่มีการ

ใช้งานเครือข่ายปริมาณน้อย ซึ่งการติดตั้งสถานีฐานอาจไม่คุ้มกับการลงทุน ซึ่งการใช้งานสถานีถ่ายทอดทำให้มีการใช้ปริมาณความจุของสถานีฐานอย่างคุ้มค่า

2.5.4 แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถี

ในการวางแผนเครือข่ายระบบสื่อสารไร้สายนั้นมีจุดประสงค์เพื่อให้บริการแก่ผู้ใช้บริการอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งระดับสัญญาณที่อุปกรณ์ลูกข่ายได้รับจากสถานีภาคส่งของเครือข่ายนั้นเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวแปรหนึ่งในการบ่งบอกประสิทธิภาพของการให้บริการเครือข่าย ดังนั้น แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถี (Path Loss Model) จึงเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยพยากรณ์การลดทอนของกำลังสัญญาณตามระยะทาง แต่ในการวิเคราะห์และจำลองค่าการลดทอนของสัญญาณเนื่องจากการสูญเสียกำลังตามแนววิถีในระบบจริงนั้นมีความซับซ้อนและยุ่งยาก เพราะต้องพิจารณาองค์ประกอบต่าง ๆ มากมาย โดยเฉพาะความแตกต่างของสภาพแวดล้อมที่สัญญาณได้ส่งผ่าน ยิ่งในกรณีของอุปกรณ์ลูกข่ายแบบเคลื่อนที่ได้ด้วยแล้วนั้น การคำนวณการสูญเสียกำลังตามแนววิถีในระบบให้ถูกต้องเสมอจึงทำได้ยาก

จากปัญหาการสูญเสียกำลังตามแนววิถีในระบบจริงที่ยากต่อการคำนวณนั้น ในทางปฏิบัติจึงมักอาศัยค่าการสูญเสียกำลังตามแนววิถีที่ประมาณจากการวัดในสภาพการใช้งานจริงมาใช้ในการจำลองการลดทอนของสัญญาณ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำแบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถีของมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด (Stanford University Interim Model : SUI Model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้รับการแนะนำจากกลุ่มความร่วมมือไอแมกซ์และใช้ในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบไอแมกซ์อย่างแพร่หลาย

จุดประสงค์ของการใช้แบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถีคือหาค่าการลดทอนที่แม่นยำเพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจวางแผนเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งแบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถีของมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ดมีคุณสมบัติที่ดีในการพยากรณ์การลดทอนเนื่องจากเป็นแบบจำลองที่ผ่านขั้นตอนการวิเคราะห์ให้ใกล้เคียงกับกฎของแบบรูปการแผ่กระจายของสัญญาณไมโครเวฟและมีตัวแปรรวมถึงแฟกเตอร์แก้ไข (Correction Factor) เพื่อปรับค่ากำลังการสูญเสียให้ถูกต้องมากที่สุด โดยแบบจำลองนี้ได้แบ่งสภาพพื้นที่ที่สัญญาณระหว่างสถานีภาคส่งและสถานีภาครับเป็นสามชนิดเพื่อให้การจำลองการสูญเสียกำลังใกล้เคียงกับระบบจริง คือ พื้นที่ชนิดที่ A แทนพื้นที่ภูเขาหรือมีต้นไม้ปกคลุมหนาแน่น พื้นที่ชนิดที่ B แทนพื้นที่ที่มีต้นไม้ปกคลุมปานกลาง และพื้นที่ชนิดที่ C แทนพื้นที่ที่มีต้นไม้เบาบางหรือพื้นที่โล่ง ซึ่งในหัวข้อนี้ได้อธิบายสมการของแบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถีของมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด ไว้ดังต่อไปนี้

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

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

$$n = a - b h_b + c / h_b \quad (2.3)$$

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

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

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

โดยที่	PL	=	ค่ากำลังการสูญเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมด
	A	=	การสูญเสียกำลังตามแนววิธีที่ระยะทางอ้างอิง d_0
	n	=	เอกซ์โพเนนตการสูญเสียเชิงวิถี (Path loss exponent)
	d	=	ระยะทาง (m.) ระหว่างสถานีภาคส่งกับสถานีลูกข่าย
	d_0	=	ระยะทางอ้างอิง (100 m.)
	X_f	=	แฟกเตอร์แก้ไขสำหรับค่าความถี่ของคลื่นพาห์ (dB)
	X_h	=	แฟกเตอร์แก้ไขสำหรับความสูงของสายอากาศของสถานีลูกข่าย (dB)
	s	=	แฟกเตอร์ของชาโดว์เฟดดิ้ง (Shadow fading factor) (dB)
	h_b	=	ความสูงของสายอากาศของสถานีภาคส่ง (m.)
	h_r	=	ความสูงของสายอากาศของสถานีลูกข่าย (m.)
	f	=	ค่าความถี่ของคลื่นพาห์ (MHz)

การหาค่ากำลังการสูญเสียทั้งหมดแสดงด้วยสมการ (2.1) ซึ่งเป็นผลรวมของการสูญเสียกำลังตามแนววิถีที่ระยะทางอ้างอิงดังสมการ (2.2) ค่าการสูญเสียกำลังตามระยะทางดังสมการ (2.3) และแฟกเตอร์แก้ไขซึ่งประกอบไปด้วยแฟกเตอร์สำหรับค่าความถี่พาห်ดังสมการ (2.4) แฟกเตอร์สำหรับค่าความถี่พาห်แยกตามชนิดของพื้นที่ดังสมการ (2.5) และ (2.6) รวมถึงแฟกเตอร์ของชาโดว์เฟดดิ้ง ซึ่งพารามิเตอร์ที่ใช้คำนวณได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับ SUI Model แบ่งตามชนิดของสภาพพื้นที่

พารามิเตอร์	สภาพพื้นที่		
	ชนิด A	ชนิด B	ชนิด 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

2.5.5 การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม (Linear Integer Programming) หมายถึงระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Value) ของวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ซึ่งอาจเป็นค่าสูงที่สุดหรือค่าต่ำที่สุด ภายใต้เงื่อนไขบางประการ โดยวัตถุประสงค์ต้องแสดงอยู่ในรูปสมการเส้นตรง แต่สำหรับเงื่อนไขนั้นสามารถอยู่ในรูปสมการหรืออสมการได้ และตัวแปรที่กำหนดต้องเป็นเลขจำนวนเต็ม ซึ่งอีกนัยหนึ่งอาจกล่าวได้ว่า การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มคือการโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Programming) ที่มีค่าตัวแปรที่กำหนดเป็นเลขจำนวนเต็ม ดังนั้นปัญหาใด ๆ ที่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง และต้องการค่าตัวแปรทั้งหมด หรือเฉพาะเจาะจงบางตัวเป็นเลขจำนวนเต็ม จะสามารถหาผลเฉลยด้วยระเบียบวิธีของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มนี้ได้ เช่นปัญหาเกี่ยวกับการจัดสรรทรัพยากรหรือปัจจัย ได้แก่ กำลังคน เครื่องจักร เวลา สถานที่ งบประมาณ ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดทั้งขนาด ปริมาณ หรือขอบเขตการใช้งาน โครงสร้างที่สำคัญของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มสามารถแบ่งออกเป็นสามส่วนสำคัญสามส่วนเช่นเดียวกับกำหนดการเชิงเส้นหรือโปรแกรมเชิงคณิตศาสตร์ (Mathematical Program) ดังนี้

ส่วนที่ 1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) เป็นส่วนที่แสดงถึงวัตถุประสงค์ของปัญหาว่าต้องการหาค่าที่สูงที่สุดหรือค่าที่ต่ำที่สุด เช่นวัตถุประสงค์ทางด้าน

อุตสาหกรรมมักจะเป็นการหาค่ากำไรสูงสุด หรือในกรณีของการขนส่ง วัตถุประสงค์มักจะเป็นค่าขนส่งที่ต่ำที่สุด ในแต่ละเรื่องฟังก์ชัน เป้าหมายจะต้องชัดเจนและเป็นทางคณิตศาสตร์ ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้จะต้องเป็นสมการคณิตศาสตร์ที่ชัดเจนและแสดงในรูปสมการเส้นตรงคือตัวแปรทุกตัวในสมการต้องมีเลขชี้กำลังเท่ากับ 1 เท่านั้น

ส่วนที่ 2 เงื่อนไข (Constraints) เป็นส่วนที่แสดงถึงขีดจำกัดที่มีอยู่ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตัวอย่างเช่น ทางอุตสาหกรรมอาจมีข้อจำกัดทางด้านกำลังคนหรือเครื่องจักรหรือทางการเงินอาจจำกัดงบประมาณสำหรับใช้จ่ายหรือลงทุนเป็นต้น ซึ่งจะเป็นข้อจำกัดของทรัพยากรที่มีอยู่นั้นเอง โดยเงื่อนไขสามารถแสดงในรูปของสมการหรือสมการเส้นตรงก็ได้

ส่วนที่ 3 ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) เป็นตัวแปรที่ถูกป้อนเข้าสู่สมการทั้งฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขเพื่อให้ได้ค่าที่เป็นผลเฉลยของปัญหา เป็นตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ และเมื่อป้อนเข้าสู่ระบบแล้วจะให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุด (Optimal Solution) ออกมา โดยตัวแปรเหล่านี้ต้องไม่มีค่าในทางลบ (Non-negative Value) และตัวแปรที่กำหนดต้องมีค่าเป็นจำนวนเต็ม

2.5.6 การหาคำตอบสำหรับโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม

2.5.6.1 วิธีกราฟ (Graphical Method) เป็นวิธีที่มีขั้นตอนการหาคำตอบไม่ซับซ้อน ใช้แก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นกรณีที่มี ตัวแปรตัดสินใจเพียงแค่ 2 ตัวแปร หรือกรณีมีตัวแปรมากกว่า 2 ตัวต้องทำการแก้สมการให้เหลือเพียง 2 ตัวแปรก่อน เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดที่สามารถทำให้เห็นภาพของการหาคำตอบ ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการวิเคราะห์และประยุกต์ใช้งานของการโปรแกรมเชิงเส้น

2.5.6.2 วิธีซิมเพล็กซ์ (Simplex Method) เป็นวิธีทางพีชคณิต ที่อาศัยหลักการของเมทริกซ์เข้าช่วยหาคำตอบ ทำให้สังเกตการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรได้ง่าย และสามารถเข้าใจแนวทางในการเปลี่ยนแปลงตัวแปรอย่างมีเหตุผล สามารถใช้แก้ปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มกรณีที่มีตัวแปรตัดสินใจมากกว่า 2 ตัวแปร วิธีการเริ่มจากการเปลี่ยนตัวแปร โดยดูให้มีผลต่อจุดมุ่งหมาย และเน้นให้เข้าสู่เป้าหมายได้เร็วที่สุด ผลลัพธ์ที่ได้จึงสามารถรับประกันว่าเป็นผลลัพธ์ที่ดีที่สุด

2.5.6.3 วิธีใช้คอมพิวเตอร์ (Computer Method) โดยมากระบบของปัญหาทางโปรแกรมเชิงเส้นจะมีตัวแปรซึ่งเป็นองค์ประกอบของระบบจำนวนซึ่งความซับซ้อนมาก การหาผลลัพธ์จึงใช้คอมพิวเตอร์ในการคำนวณ ปัจจุบันโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สามารถใช้เป็นเครื่องมือคำนวณหาคำตอบของปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นมีอยู่มากมาย ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำโปรแกรมประยุกต์เข้ามาคำนวณหาคำตอบของปัญหาโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มคือ ILOG OPL IDE ซึ่งรายละเอียดของโปรแกรมประยุกต์นี้ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

2.5.7 ระเบียบวิธีซิมเพล็กซ์

การหาคำตอบของปัญหาการโปรแกรมเชิงเส้นด้วยวิธีการกราฟจะสะดวกในกรณีที่มีตัวแปรไม่เกิน 2 ตัว หากตัวแปรเกิน 2 ตัวแปร การใช้กราฟค่อนข้างยุ่งยาก วิธีการที่ใช้แพร่หลายคือวิธีการซิมเพล็กซ์ซึ่งปรับปรุงโดย George Dantzig ในปีคริสต์ศักราช 1947 เป็นการทำซ้ำอย่างมีระบบ โดยเริ่มต้นจากจุดมุม เริ่มต้นเคลื่อนที่อย่างมีระบบไปยังจุดยอดมุมต่อไปที่ทำให้ค่าของฟังก์ชันเป้าหมายสูงสุดหรือต่ำสุด จุดยอดมุม แต่ละจุดจะเป็นคำตอบฐาน (Basic Solution) ตลอดจนเงื่อนไขการเปลี่ยนจุดกำหนดไว้ในตาราง วิธีการซิมเพล็กซ์จึงแสดงได้ด้วยตารางที่มีจำนวนนับตารางหนึ่งก็คือคำตอบของจุดยอดมุมหนึ่ง จากตารางสามารถพิจารณาได้ว่าจุดยอดมุมซึ่งเป็นคำตอบที่เป็นไปได้พื้นฐาน (Basic Feasible Solution) เป็นคำตอบที่ดีที่สุด (Optimal Solution) หรือไม่ ถ้าไม่เป็นจุดถัดไปควรจะเป็นจุดไหนซึ่งการแก้ปัญหาด้วยวิธีซิมเพล็กซ์ได้อธิบายลำดับขั้นตอนทั้งสิ้น 11 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) เขียนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ อสมการที่แสดงถึงข้อจำกัดของปัญหา
- 2) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ควรเป็นแบบหาค่าสูงสุด ถ้าเป็นแบบหาค่าต่ำสุดให้แปลงเป็นแบบหาค่าสูงสุดดังนี้ $\text{Minimize } Z = (\text{Maximize } Z)$ หรือ $\text{Minimize } Z = \text{Maximize } -Z$ แล้วเปลี่ยนอสมการเป็นสมการโดยการใส่ตัวแปรแบบเพิ่มค่า (Slack) หรือลดค่า (Surplus) เพื่อให้ได้สมการในรูปแบบมาตรฐานของกำหนดการเชิงเส้น

- 3) สร้างตารางซิมเพล็กซ์เริ่มต้น (Initial Simplex Table) และใส่ค่าต่าง ๆ ลงในตารางโดยตารางนี้เป็นตัวช่วยในการคำนวณตามกระบวนการซิมเพล็กซ์ และบอกถึงสิ่งต่อไปนี้

- ตัวแปรที่อยู่ในคำตอบ (ในสคัมภ์ตัวแปรมูลฐาน ที่ไม่ได้เป็นตัวแปรเพิ่ม)
- ค่าไรที่อยู่ในคำตอบ
- ค่าตัวแปรที่อยู่ในคำตอบที่ทำให้เกิดกำไรสูงสุด

ตัวแปรมูลฐาน (Basic Variable) หมายถึงตัวแปรที่มีสัมประสิทธิ์เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ เช่นจากตารางที่ 2.4 เมื่อพิจารณาในสคัมภ์ s_1 , s_2 และ s_3 จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรเพิ่มทำให้เกิด เมตริกซ์เอกลักษณ์ดังนี้

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นจึงใส่ s_1 , s_2 และ s_3 ไว้ในสคัมภ์ตัวแปรมูลฐานเมื่อทำตามวิธี

ซิมเพล็กซ์ หลังจากการนำตัวแปรอื่นแต่ละตัวเข้ามาเป็นตัวแปรมูลฐานแล้ว ตัวแปรทั้งหมดในสคัมภ์นี้จะต้องทำให้เมตริกซ์เอกลักษณะเสมอ

4) คำนวณ Z_j และ $Z_j - C_j$ ถ้าทุกค่าของ $Z_j - C_j \geq 0$ แสดงว่าได้ค่าสูงสุดแล้ว และหยุดการคำนวณได้ แต่ถ้ายังมีค่าที่ติดลบแสดงว่าค่าที่ได้ยังไม่ใช่ว่าดีที่สุด จึงต้องทำขั้นที่ 5 ต่อไป

5) เลือกตัวแปรที่จะนำเข้ามาเป็นตัวแปรมูลฐานโดยดูจากสคัมภ์ที่มีค่า $Z_j - C_j$ เป็นลบมากที่สุด เรียกสคัมภ์นี้ว่าสคัมภ์แกนหมุน (Pivot Column)

ตาราง 2.4 รูปแบบของตารางซิมเพล็กซ์

C_j	Coefficient Matrix			Slack Variable			Value of Basic variable	Basic Variables	Coefficient of Basic Variable	Minimum Ratio
	*	*	*	0	0	0				
X_j	x_1	x_2	x_3	s_1	s_2	s_3	X_B	Y_B	C_B	
	*	*	*	1	0	0	*	s_1	0	
	*	*	*	0	1	0	*	s_2	0	
	*	*	*	0	0	1	*	s_3	0	
$Z_j = \sum(X_j C_B)$										
$Z_j - C_j$										

6) เลือกตัวแปรที่จะนำออกไปให้คำนวณหาอัตราส่วน โดยนำค่าในสคัมภ์ X_B ตั้ง และหารด้วยค่าในสคัมภ์แกนหมุนที่สอดคล้องกันทุกแถว (Row) แล้วเลือกแถวที่มีค่าอัตราส่วนที่มีค่าเป็นบวกน้อยที่สุดเพื่อที่จะนำตัวแปรนั้นออกไป แถวที่มีค่าอัตราส่วนน้อยที่สุดนี้เรียกว่า แถวแกนหมุน (Pivot Row) และค่าที่อยู่ในตำแหน่งที่สคัมภ์แกนหมุนแถวแกนหมุนตัดกันเรียกว่าจุดหมุน (Pivot Element)

7) คำนวณหาค่าต่าง ๆ ของแถวแกนหมุนที่จะเข้ามาแทนที่ โดยคำนวณจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\text{ค่าในแถวแกนหมุนใหม่} = \text{ค่าในแถวแกนหมุนเดิม/จุดหมุน} \quad (2.7)$$

8) คำนวณหาค่าต่าง ๆ ของแถวอื่น ๆ ที่เหลือ โดยใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าในแถวอื่นค่าใหม่} &= \text{ค่าในแถวอื่นค่าเดิม} - (\text{ค่าในแถวแกนหมุนใหม่}) \\ &\times (\text{ค่าในสครัมภ์แกนหมุนที่อยู่ในแถวเดิม}) \end{aligned} \quad (2.8)$$

9) คำนวณหาค่าของ Z_j โดยใช้สูตร $Z_j = \sum(X_j C_B)$ และหาค่าของ $Z_j - C_j$ แต่ละตัว

10) ถ้าค่าของ $Z_j - C_j$ ยังมีค่าที่ติดลบอยู่ แสดงว่ายังไม่ได้ค่าที่ดีที่สุด ให้กลับไปทำตามขั้นที่ 5 อีก

11) ถ้าทุกค่าของ $Z_j - C_j \geq 0$ แสดงว่าได้ค่าสูงสุดแล้ว และหยุดการคำนวณได้

2.5.8 การวางแผนเครือข่ายไร้สายสำหรับเครือข่ายไวแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อ

2.5.8.1 กล่าวนำ

ผู้ให้บริการเครือข่ายไวแมกซ์นั้นต้องการลดงบประมาณในการลงทุนและสามารถให้บริการแก่ผู้ใช้งานได้อย่างดี การติดตั้งสถานีถ่ายทอดจึงมีประโยชน์ในแง่พื้นที่ครอบคลุมและความจุของเครือข่าย สถานีถ่ายทอดยังสามารถประยุกต์ใช้งานให้กับเครือข่ายได้หลายวิธี และเชื่อมต่อในแนวเส้นสายตาหรือนอกแนวเส้นสายตากับสถานีฐาน และสถานีลูกข่าย ในเครือข่ายไวแมกซ์แบบเดิม มีจุดประสงค์ของการวางแผนเครือข่ายคือการประเมินจำนวนสถานีฐานที่ต้องการติดตั้ง เพื่อให้เครือข่ายสามารถให้บริการพื้นที่ที่ครอบคลุมและความจุของเครือข่ายสำหรับพื้นที่ให้บริการได้ตามเป้าหมาย รวมถึงเป้าหมายในแง่ความสามารถในการรองรับจำนวนของผู้ใช้บริการ สำหรับการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อนั้น หมายถึงการพิจารณาและประเมินจำนวนของสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสมเพื่อรองรับความต้องการเช่นเดียวกับเครือข่ายที่มีการติดตั้งเพียงสถานีฐานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.5.8.2 การวิเคราะห์รูปแบบเซลล์

สำหรับเครือข่ายไวแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อนั้นได้ใช้การประเมินรัศมีครอบคลุมของสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด เพื่อสามารถบรรลุวัตถุประสงค์ในด้านความต้องการด้านพื้นที่ให้บริการและการให้บริการความจุของเครือข่ายแก่ผู้ใช้งานในระดับที่พึงพอใจ ผู้ใช้งานในเครือข่ายจะถูกสันนิษฐานว่ากระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ สำหรับเครือข่ายไวแมกซ์ที่ใช้งานสถานีถ่ายทอดนั้นมีประโยชน์กับงบประมาณในการลงทุนอย่างมาก อาจเรียกว่าสถานีถ่ายทอดเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับผู้ให้บริการเครือข่าย เนื่องจากสถานีถ่ายทอดไม่ต้องการสายลำเลียงสัญญาณ (Wired Backhaul) ซึ่งมีข้อดีในด้านการลดมูลค่าบริการลงทุน อย่างไรก็ตามหาก

การจราจรของข้อมูลในเครือข่ายมากขึ้น สถานีถ่ายทอดอาจถูกแทนด้วยสถานีฐาน ดังนั้นการวางแผนเครือข่ายต้องมองถึงการประเมินความจุของเครือข่ายที่รองรับในอนาคตกระบวนการวิเคราะห์ขนาดเซลล์ของเครือข่ายไวแมกซ์นั้นได้พิจารณาจากพื้นฐานการวิเคราะห์งบประมาณการเชื่อมต่อ (Link Budget) พร้อมด้วยการพิจารณาถึงความต้องการทางเทคนิค ลักษณะการแผ่กระจายสัญญาณและความต้องการด้านการตลาดซึ่งข้อมูลอินพุตสำหรับประเมินขนาดพื้นที่ครอบคลุมของเครือข่ายมีรายละเอียดดังนี้

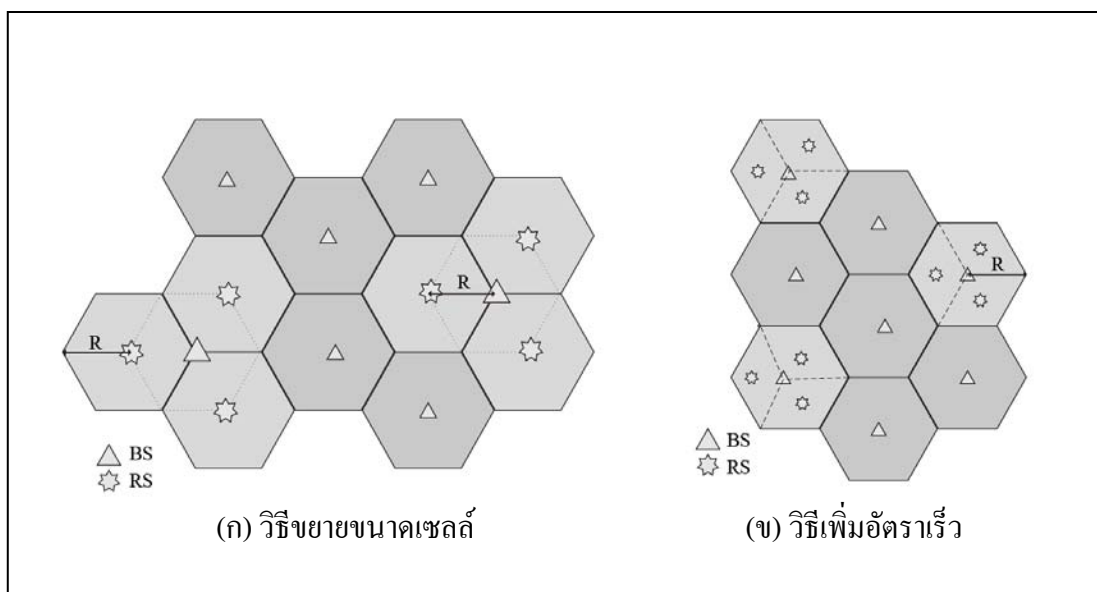
- พารามิเตอร์ด้านรายละเอียดของอุปกรณ์ : พารามิเตอร์ในด้านรายละเอียดของอุปกรณ์นั้นประกอบไปด้วย กำลังส่งของสถานีฐาน สถานีถ่ายทอดและสถานีลูกข่าย ค่าการลดทอนของท่อนำสัญญาณ กำลังขยายของสายอากาศ คุณลักษณะด้านการรองรับแบนด์วิดท์ รวมถึงความสูงของสถานีฐาน สถานีถ่ายทอดและสถานีลูกข่าย

- พารามิเตอร์ด้านรายละเอียดทางการตลาด : อินพุตทางการตลาดประกอบไปด้วยพื้นที่สำหรับให้บริการผู้ใช้งาน การคำนวณความต้องการการจราจรของข้อมูลต่อผู้ใช้งานหนึ่งรายสำหรับช่วงปีแรกและการประเมินการเติบโตของปริมาณการใช้งานในอีก 5 หรือ 10 ปีข้างหน้า รวมถึงการครอบคลุมของเซลล์และการรับประกันอัตราเร็วการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน

- คุณลักษณะการแผ่กระจายสัญญาณและความต้องการสเปกตรัม : การพยากรณ์สัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการนั้นจำเป็นต้องใช้แบบจำลองการสูญเสียตามแนววิถี (Path Loss Model) เพื่อคำนวณงบประมาณของการเชื่อมต่อระหว่างสถานีฐานกับสถานีถ่ายทอด สถานีฐานกับสถานีลูกข่าย และสถานีถ่ายทอดกับสถานีลูกข่าย โดยแบบจำลองที่ใช้ควรใกล้เคียงกับการสูญเสียในระบบจริง เพื่อความแม่นยำในการพยากรณ์ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำแบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถีของมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด ซึ่งมีค่าแฟกเตอร์แก้ไข ตามลักษณะพื้นที่การเชื่อมต่อ ทำให้การคำนวณงบประมาณการเชื่อมต่อใกล้เคียงกับระบบจริง

2.5.8.3 การวิเคราะห์พื้นที่ครอบคลุม

การเพิ่มพื้นที่ครอบคลุมเป็นจุดประสงค์พื้นฐานในการใช้งานสถานีถ่ายทอด ในการขยายพื้นที่ครอบคลุมแก่สถานีฐานนั้น สถานีถ่ายทอดจะถูกวางไว้ที่ปลายพิสัยของสัญญาณจากสถานีฐาน ซึ่งระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดจะขึ้นอยู่กับคุณภาพการเชื่อมต่อระหว่างกัน พร้อมกับพิจารณาระดับการซ้อนทับของพื้นที่ครอบคลุมที่เหมาะสมสำหรับการย้ายข้ามเซลล์ รวมถึงรัศมีเซลล์ของสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดด้วย สำหรับการวิเคราะห์ทางทฤษฎี ระยะทางระหว่างสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดถูกสมมติให้เท่ากับรัศมีเซลล์ของสถานีฐานที่เป็นแม่ข่าย ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งแสดงพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐานด้วยเส้นประและมีสถานีถ่ายทอดจำนวนสามสถานีที่มุมช่วยขยายพื้นที่ครอบคลุมเป็นสามเท่าจากเดิม (สมมติขนาดเซลล์ของสถานีถ่ายทอดเท่ากับสถานีฐาน)



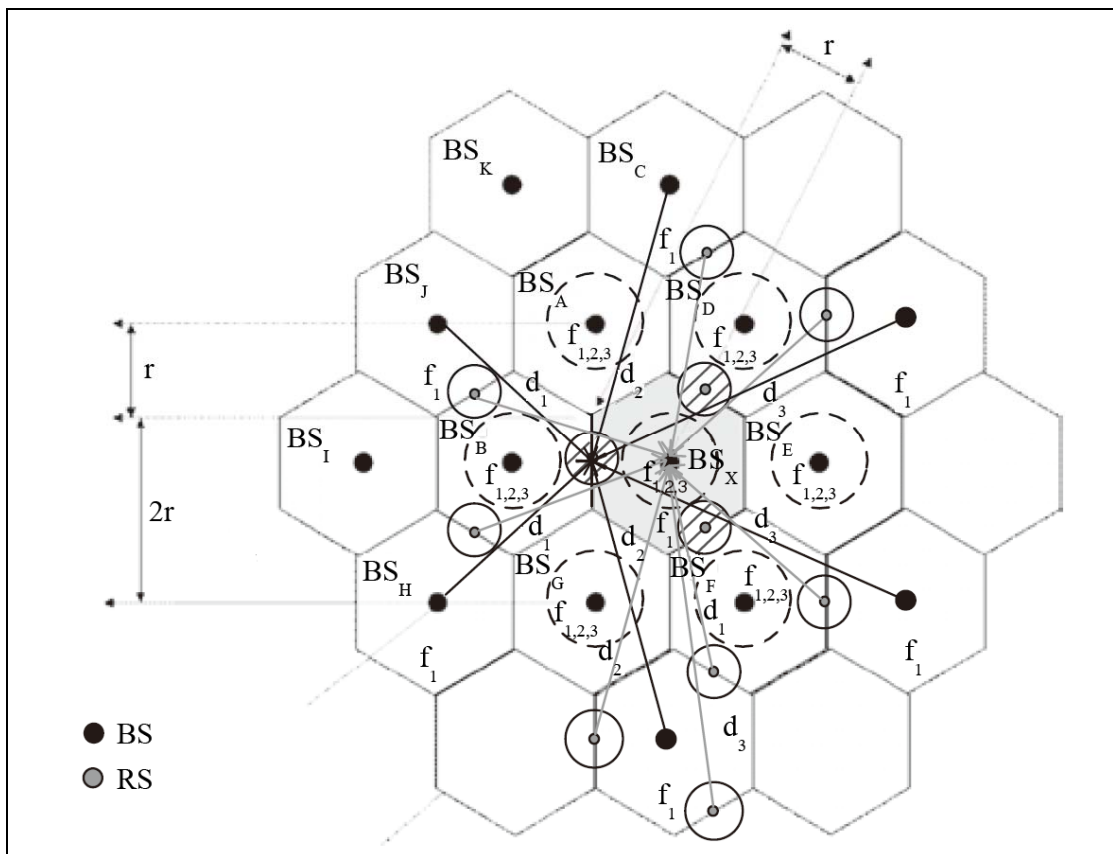
รูปที่ 2.2 วิธีขยายขนาดและเพิ่มอัตราเร็วในการให้บริการโดยใช้สถานีถ่ายทอด

ในการหาขนาดของรัศมีเซลล์สำหรับสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดสำหรับการจัดหมวดหมู่เพื่อวางแผนเครือข่ายนั้น การวิเคราะห์งบประมาณการเชื่อมต่อเป็นสิ่งจำเป็นต้องทำ งบประมาณการเชื่อมต่อนั้นได้ระบุถึงการสูญเสียกำลังตามแนววิถีระหว่างสถานีภาคส่ง และสถานีภาครับที่พิจารณา และได้บอกถึงการจำกัดระยะทางระหว่างสถานีฐานกับสถานีถ่ายทอดเพื่อรักษาสมดุลของการเชื่อมต่อทั้งขาขึ้นและขาลง การรักษาสมดุลของการเชื่อมต่อต้องการการคำนวณที่แม่นยำสำหรับการดูเพล็กซ์เต็ม (Full Duplex) เพื่อรักษาสมดุลการเชื่อมต่อตลอดเวลา งบประมาณการเชื่อมต่อเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทำก่อนสำหรับการวิเคราะห์ขนาดของเครือข่าย และเป็นส่วนสำคัญของคุณภาพเครือข่าย

2.5.8.4 การวิเคราะห์ความจุของเครือข่าย

การวัดขนาดความจุข้อมูลสำหรับเครือข่ายไวมแมกซ์แบบเดิมนั้นได้พิจารณาความต้องการปริมาณการจราจรและทรัพยากรที่เครือข่ายที่มีอยู่สำหรับตอบสนองความต้องการ การให้บริการไวมแมกซ์ในแบบต่าง ๆ พฤติกรรมการใช้งานของผู้ใช้และอัตราการทำดูเพล็กซ์ทางเวลาระหว่างขาขึ้นและขาลง และนำข้อมูลเหล่านี้ไปกำหนดจำนวนสถานีฐานที่ต้องการติดตั้งเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการความจุของผู้ใช้งาน ในการวัดขนาดความจุเบื้องต้นของระบบไวมแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อนั้นยังคงเหมือนกับเครือข่ายไวมแมกซ์แบบเดิม ความจุของเซลล์ทั้งหมดในเครือข่ายไวมแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อจะถูกคำนวณหาจำนวนสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดสำหรับรองรับปริมาณการใช้งานในพื้นที่ให้บริการ

สถานีถ่ายทอดสามารถขยายอัตราเร็วในเซลล์ได้ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.2 การวางสถานีถ่ายทอดในพื้นที่เซลล์ของสถานีฐานช่วยปรับปรุงอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณแทรกสอดและรบกวน (Signal to Interference and Noise Ratio : SNIR) และด้วยเหตุนี้จึงช่วยเพิ่มความจุในการเชื่อมต่อ และยังช่วยลดกำลังส่งระหว่างสถานีลูกข่ายกับเครือข่ายเนื่องจากการปรับปรุงคุณภาพสัญญาณได้อีกด้วย



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างเครือข่ายไวแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อสำหรับวิเคราะห์การแทรกสอดของสัญญาณ

2.5.8.5 การวิเคราะห์การแทรกสอดของสัญญาณ

ในหัวข้อนี้ได้กล่าวถึงการคำนวณการแทรกสอดของการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีลูกข่ายในเครือข่ายไวแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อ ซึ่งให้พื้นฐานวิธีการคำนวณเช่นเดียวกับการแทรกสอดระหว่างการเชื่อมต่อของสถานีฐานและสถานีลูกข่ายที่มีช่วงเชื่อมต่อเพียงช่วงเดียว

ในสมมติฐานได้พิจารณาว่าสถานีถ่ายทอดได้ใช้งานเพื่อการขยายพื้นที่ครอบคลุมและติดตั้งแบบคงที่ในเซลล์ของสถานีฐาน และแต่ละสถานีฐานได้เชื่อมต่อกับสถานีถ่ายทอดสามสถานีและสถานีถ่ายทอดทั้งสามแบ่งเวลาและทรัพยากรความถี่จากสถานีฐานมาใช้ และไม่มีการแทรกสอดภายในสถานีถ่ายทอดทั้งสามที่เชื่อมกับสถานีฐานร่วมกัน ดังนั้นการแทรกสอดจึงมีขึ้นจากเซลล์ข้างเคียง สมมติฐานยังได้ระบุให้สถานีถ่ายทอดถูกติดตั้งนอกพื้นที่ที่แบ่งไว้สำหรับใช้ความถี่ซ้ำ (Fractional Frequency Reuse : FFR) เครือข่ายมีค่าประสิทธิภาพการใช้ความถี่ซ้ำ (Effective Frequency Reuse) เท่ากับ 3 แบบแผนการใช้ความถี่ซ้ำ (Reuse Pattern) เท่ากับ 1 สายอากาศของสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดถูกระบุเป็นแบบรอบทิศทาง ซึ่งรูปแบบพื้นฐานของการวางตำแหน่งสถานีถ่ายทอดและสถานีฐานได้แสดงในรูปที่ 2.3

สัญญาณแทรกสอดถูกพิจารณาเป็นสัญญาณรบกวนที่เพิ่มขึ้นจากระดับสัญญาณรบกวนเชิงความร้อน (Thermal Noise) ซึ่งกำลังของสัญญาณแทรกสอดสามารถคำนวณได้ดังสมการ (2.9)

$$I = P_T G_T P_{coll} \left[\sum_{i=1}^N \frac{1}{PL_i} \times \cos^2 \theta_i \right] \quad (2.9)$$

โดยที่	I	=	กำลังของสัญญาณแทรกสอด
	P_T	=	กำลังส่งของสถานีภาคส่ง
	G_T	=	กำลังขยายของสายอากาศ
	P_{coll}	=	ค่าเฉลี่ยความน่าจะเป็นในการการชนกันของสัญญาณขาขึ้นและขาลง
	PL_i	=	การสูญเสียกำลังตามแนววิถี
	θ_i	=	ความกว้างมุมของสายอากาศแบบมีทิศทาง

บทที่ 3

เทคนิคการหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีสถานและสถานีถ่ายทอด สำหรับเครือข่ายไวแมกซ์ เพื่อการลงทุนอย่างมีประสิทธิภาพ

3.1 กล่าวนำ

ในการลงทุนใด ๆ การประหยัดงบประมาณการลงทุนเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อการไปสู่จุดคุ้มทุนและผลกำไรซึ่งเป็นเป้าหมายหลักของการลงทุนนั้น ๆ เช่นเดียวกันกับการลงทุนวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ การหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีสถานและสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสม โดยที่สามารถให้บริการได้ตามที่ได้ประกันคุณภาพกับผู้ใช้งานไว้แล้ว ควรต้องมีการออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้ได้จำนวนของสถานีสถานและสถานีถ่ายทอดน้อยที่สุด และส่งผลโดยตรงต่อการประหยัดงบประมาณการลงทุนสร้างเครือข่าย และทำให้ผู้ให้บริการสามารถจัดการงบประมาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งถูกพิสูจน์กันเป็นที่ยอมรับถึงประโยชน์และประยุกต์ใช้กับปัญหาต่าง ๆ เพื่อช่วยในการตัดสินใจหาคำตอบที่ดีและเหมาะสมที่สุด ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้้นำการโปรแกรมเชิงเส้นมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ให้เหมาะสมโดยลดจำนวนสถานีสถานและสถานีถ่ายทอดให้เหลือน้อยที่สุด ในขณะที่เดียวกันผู้ใช้งานทุกรายในพื้นที่ให้บริการจะยังสามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวโดยละเอียดถึงเทคนิคการวิเคราะห์การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (0-1 Integer Programming) โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 3.2 กล่าวถึงการนิยามปัญหาของการสร้างสมการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มในการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ที่ได้นิยามในวิทยานิพนธ์นี้ หัวข้อ 3.3 กล่าวถึงสมการที่ใช้ในการออกแบบรวมถึงปัจจัยต่าง ๆ และตัวอย่างที่นำมาพิจารณา หัวข้อ 3.4 กล่าวถึงการตั้งปัญหาเพื่อเป็นข้อมูลตั้งต้นสำหรับการทดลอง หัวข้อ 3.5 แสดงถึงโปรแกรมที่ใช้หาคำตอบสำหรับสมการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม หัวข้อ 3.6 เป็นการแสดงผลการประมวลผลเพื่อหาคำตอบของตัวแบบที่ได้สร้างขึ้น หัวข้อ 3.7 เป็นการนำเสนอสมการที่ได้ไปใช้ในการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริง และหัวข้อ 3.8 เป็นหัวข้อสรุปเนื้อหาที่ได้กล่าวในบทนี้

3.2 การนิยามปัญหา

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์ในการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ในส่วนไร้สาย เพื่อลดมูลค่าการลงทุนให้เหลือน้อยที่สุดแต่ยังคงคุณภาพการให้บริการ โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (0-1 integer programming) เลือกติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดเพื่อให้บริการไวแมกซ์โดยรับประกันสัญญาณและการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน

ในการเลือกติดตั้งสถานีฐาน (Base Station : BSs) และสถานีถ่ายทอด (Relay Station : RSs) นั้น ตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีฐาน (Candidate Base Station) และ ตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีถ่ายทอด (Candidate Relay Station) ถูกกำหนดขึ้นในพื้นที่ออกแบบในการกำหนดนั้นได้พิจารณาความเป็นไปได้ในการติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด เช่น ความยากง่ายในการเชื่อมระบบไฟฟ้ากำลังและระบบส่งสัญญาณ (Transmission Systems) ระหว่างสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดกับเครือข่ายหลัก (Core Network) นอกจากนั้นยังพิจารณาถึงเวลาสำหรับเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลเครือข่ายในการเข้าถึงอุปกรณ์เมื่อเกิดปัญหา หรืออาจพิจารณาจากตำแหน่งที่มีโครงสร้างพื้นฐานอยู่แล้วทำให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้ง่ายและรวดเร็ว เช่น สถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือสถานีวิทยุที่มีเสาสูงสำหรับส่งสัญญาณ ตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งเหล่านี้จะถูกนำเข้ากระบวนการคัดเลือกเพื่อใช้เป็นที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด เมื่อผ่านกระบวนการคัดเลือกแล้ว จะได้จำนวนของสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดที่มีงบประมาณในการติดตั้งน้อยที่สุด และยังสามารถรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้ทุกรายที่อยู่ในพื้นที่ให้บริการได้

สำหรับการรับประกันคุณภาพแก่ผู้ใช้บริการที่เข้ามาเชื่อมต่อกับเครือข่ายไวแมกซ์นั้น จะได้รับการประกันทั้งคุณภาพสัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการ และคุณภาพการให้บริการในตำแหน่งที่ถูกค่าส่วนใหญ่ใช้งานเป็นประจำ โดยการรับประกันสัญญาณครอบคลุมนั้นได้กำหนดจุดรับประกันสัญญาณครอบคลุม (Signal Test Points : STPs) ให้เป็นตำแหน่งที่ต้องได้รับสัญญาณจากเครือข่ายพอที่จะทำการเข้าใช้งานเครือข่ายได้ ตำแหน่งเหล่านี้ถูกกำหนดให้กระจายตัวในรูปแบบตาราง ทั่วพื้นที่ให้บริการเพื่อรับประกันว่าในเครือข่ายที่ออกแบบนั้น ได้รับประกันความแรงสัญญาณให้ผู้ใช้บริการสามารถเข้าถึงเครือข่ายไม่ว่าผู้ใช้บริการนั้นจะอยู่ตำแหน่งใด ๆ ในพื้นที่ให้บริการ ส่วนสถานที่ใด ๆ ก็ตามในพื้นที่ให้บริการที่มีผู้ใช้บริการอยู่รวมกันเป็นจำนวนมาก เช่น สถานที่ราชการ สถานศึกษา แหล่งท่องเที่ยว และ ที่พักอาศัย ได้ถูกกำหนดเป็นจุดรับประกันการให้บริการสำหรับผู้ใช้บริการ (Demand Points : DPs) ซึ่งจุดรับประกันการให้บริการนี้จะไม่เพียงรับประกันสัญญาณครอบคลุมถึง แต่ระดับสัญญาณต้องสูงพอสำหรับการเชื่อมต่อด้วยความเร็วในการรับส่งข้อมูลทางกายภาพ (Physical Data Rate) ระหว่างผู้ใช้บริการกับเครือข่ายเพื่อการใช้งานที่ดีและราบรื่น โดยการออกแบบได้กำหนดให้ต้องมีระดับสัญญาณสูงเพียงพอสำหรับทุกจุด

รับประกันสัญญาณครอบคลุมและจอร์ับประกันการให้บริการ เพื่อรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้บริการทุกราย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณาการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ในส่วนไร้สายโดยการเลือกตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด ที่เชื่อมต่อแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-hops Relay Network) ที่มีการกำหนดตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด โดยวัตถุประสงค์ของออกแบบคือเพื่อคัดเลือกจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดโดยรับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้บริการในพื้นที่ให้บริการซึ่งได้ทำการกำหนดปัจจัยในการวางแผนเครือข่ายหลาย ๆ ส่วนที่สอดคล้องกับอุปกรณ์และโครงสร้างพื้นฐานที่นำมาสร้างเครือข่ายไวแมกซ์ในวิทยานิพนธ์ดังนี้

- 1) สถานีฐาน และสถานีถ่ายทอดมีคุณสมบัติในการให้บริการแก่ผู้ใช้บริการเท่ากัน
- 2) ช่วงเชื่อมต่อ (Hops) ระหว่างผู้ใช้บริการกับเครือข่ายมีไม่เกิน 2 ช่วง คือ ผู้ใช้บริการแต่ละรายสามารถเชื่อมต่อกับสถานีฐานโดยตรง หรือสามารถเชื่อมต่อสถานีฐานโดยผ่านสถานีถ่ายทอดได้ 1 สถานี
- 3) ต้นทุนในการติดตั้งทุกสถานีฐานมีมูลค่าเท่ากัน และต้นทุนในการติดตั้งทุกสถานีถ่ายทอดมีมูลค่าเท่ากัน
- 4) แต่ละสถานีฐานมีความสามารถเพียงพอในการรองรับทุกสถานีถ่ายทอดรวมถึงผู้ใช้บริการทุกรายในพื้นที่ครอบคลุมของแต่ละสถานีฐานได้
- 5) แต่ละสถานีถ่ายทอดมีความสามารถเพียงพอในการรองรับผู้ใช้บริการทุกรายในพื้นที่ครอบคลุมของแต่ละสถานีถ่ายทอดได้

3.3 สมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีสำหรับวางแผนเครือข่าย

ในหัวข้อนี้ได้ทำการนำเสนอขั้นตอนการวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (0-1 Integer Programming) โดยแยกพิจารณาตามโครงสร้างของระเบียบวิธีการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี คือตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และเงื่อนไข

กระบวนการแก้ไขปัญหการออกแบบด้วยการใช้โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบไบนารีที่ใช้ในการแก้ไขปัญหของการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ โดยพิจารณาหาจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสมที่สุด จากตำแหน่งที่เป็นไปได้ทั้งหมด เพื่อรับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้บริการ และนอกจากนี้สมการดังกล่าวยังได้ทำการเลือกสร้างการเชื่อมต่อระหว่างจุดที่ตั้งสถานีฐานกับสถานีถ่ายทอดและจอร์ับประกันคุณภาพการให้บริการด้วย โดยผลลัพธ์จากการวางแผนเครือข่ายต้องอยู่ในเงื่อนไขทั้งหมดที่กำหนดไว้

การนิยามตัวแปร

เซต :	B	หมายถึงเซตของจุดที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีฐาน (BSs)
	R	หมายถึงเซตของจุดที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีถ่ายทอด (RSs)
	D	หมายถึงเซตของจุดที่รับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้ (DPs)
	T	หมายถึงเซตของจุดที่รับประกันการเข้าถึงเครือข่ายแก่ผู้ใช้ (STPs)
ค่าคงที่ :	F_j	หมายถึงมูลค่าในการลงทุนติดตั้งสถานีฐาน $j, j \in B$
	E_i	หมายถึงมูลค่าในการลงทุนติดตั้งสถานีถ่ายทอด $i, i \in R$
	P_t	หมายถึงค่าความแรงสัญญาณที่น้อยที่สุดสำหรับการเชื่อมต่อ STPs กับเครือข่าย
	P_d	หมายถึงค่าความแรงสัญญาณที่น้อยที่สุดสำหรับการเชื่อมต่อ DPs กับเครือข่าย
	P_r	หมายถึงค่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำสำหรับการเชื่อมต่อ RSs กับ BSs
	P_{hj}	หมายถึงค่าความแรงสัญญาณที่ STP h รับได้จาก BS $j, h \in T$ และ $j \in B$
	P_{hi}	หมายถึงค่าความแรงสัญญาณที่ STP h รับได้จาก RS $i, h \in T$ และ $i \in R$
	P_{gj}	หมายถึงค่าความแรงสัญญาณที่ DP g รับได้จาก BS $j, g \in D$ และ $j \in B$
	P_{gi}	หมายถึงค่าความแรงสัญญาณที่ DP g รับได้จาก RS $i, g \in D$ และ $i \in R$
	P_{ij}	หมายถึงค่าความแรงสัญญาณที่ RS i รับได้จาก BS $j, i \in R$ และ $j \in B$
ตัวแปรตัดสินใจ :	β_j	เป็นตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ในกรณีที่ $\beta_j = 1$ หมายถึงสถานีฐานถูกติดตั้งที่จุด j เมื่อ $j \in B$ และ $\beta_j = 0$ หมายถึงสถานีฐานไม่ได้ถูกติดตั้งที่จุด j
	γ_i	เป็นตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ในกรณีที่ $\gamma_i = 1$ หมายถึงสถานีถ่ายทอดถูกติดตั้งที่จุด i เมื่อ $i \in R$ และ $\gamma_i = 0$ หมายถึงสถานีถ่ายทอดไม่ได้ถูกติดตั้งที่จุด i
	u_{hj}	เป็นตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ในกรณีที่ $u_{hj} = 1$ หมายถึง STP ที่ h ทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐาน j โดยที่ $h \in T$ และ $j \in B$ และ $u_{hj} = 0$ หมายถึง STP ที่ h ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐาน j
	v_{hi}	เป็นตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ในกรณีที่ $v_{hi} = 1$ หมายถึง STP ที่ h ทำการเชื่อมต่อกับสถานีถ่ายทอด i โดยที่ $h \in T$ และ $i \in R$ และ $v_{hi} = 0$ หมายถึง STP ที่ h ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อกับสถานีถ่ายทอด i

- x_{gj} เป็นตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ในกรณีนี้ที่ $x_{gj} = 1$ หมายถึง DP ที่ g ทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐาน j โดยที่ $g \in D$ และ $j \in B$ และ $x_{gj} = 0$ หมายถึง DP ที่ g ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐาน j
- y_{gi} เป็นตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ในกรณีนี้ที่ $y_{gi} = 1$ หมายถึง DP ที่ g ทำการเชื่อมต่อกับสถานีถ่ายทอด i โดยที่ $g \in D$ และ $i \in R$ และ $y_{gi} = 0$ หมายถึง DP ที่ g ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อกับสถานีถ่ายทอด i
- w_{ij} เป็นตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ในกรณีนี้ที่ $w_{ij} = 1$ หมายถึงสถานีถ่ายทอด i ทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐาน j โดยที่ $i \in R$ และ $j \in B$ และ $w_{ij} = 0$ หมายถึงสถานีถ่ายทอด i ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐาน j

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการวางแผนเครือข่ายสำหรับสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี:

$$\text{Minimize } \sum_{j=1}^b F_j \beta_j + \sum_{i=1}^r E_i \gamma_i \quad (3.1)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์นี้หมายถึงการลดมูลค่าในการลงทุนสร้างเครือข่ายซึ่งประกอบไปด้วยผลรวมของมูลค่าการติดตั้งสถานีฐานและผลรวมของมูลค่าการติดตั้งสถานีถ่ายทอด ซึ่งพิจารณาเพียงสถานีที่ติดตั้งเท่านั้น

สมการเงื่อนไขในการวางแผนเครือข่ายในรูปสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีถูกแบ่งเป็นสามกลุ่ม ดังนี้ 1) กลุ่มเงื่อนไขสำหรับการรับประกันสัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการ 2) เงื่อนไขสำหรับการรับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน และ 3) เงื่อนไขการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐาน ซึ่งผลลัพธ์จากการวางแผนเครือข่ายต้องได้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ทั้งหมด ซึ่งเงื่อนไขทั้งสามกลุ่มของสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีสำหรับวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์เพื่อการลงทุนที่มีประสิทธิภาพจะได้อธิบายดังต่อไปนี้

เงื่อนไขสำหรับการรับประกันสัญญาครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการ:

$$\sum_{j=1}^b u_{hj} + \sum_{i=1}^r v_{hi} \geq 1, \forall h \in T \quad (3.2)$$

$$u_{hj} \leq \beta_j, \forall h \in T, j \in B \quad (3.3)$$

$$v_{hi} \leq \gamma_i, \forall h \in T, i \in R \quad (3.4)$$

$$u_{hj}(P_{hj} - P_T) \geq 0, \forall h \in T, j \in B \quad (3.5)$$

$$v_{hi}(P_{hi} - P_T) \geq 0, \forall h \in T, i \in R \quad (3.6)$$

เซตของสมการเงื่อนไขสำหรับการรับประกันสัญญาครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการข้างต้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ สมการที่ (3.2) แสดงการรับประกันว่าทุก ๆ ตำแหน่งรับประกันพื้นที่ครอบคลุม (STPs) ต้องสามารถทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐานหรือสถานีถ่ายทอดอย่างน้อย 1 โหนด เพื่อรับรองว่า ผู้ใช้งานสามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายได้ตลอดเวลาไม่ว่าจะอยู่ที่ใดในพื้นที่ให้บริการ สมการที่ (3.3) แสดงการรับประกันว่า สถานีฐานที่ทำการเชื่อมต่อกับตำแหน่งรับประกันพื้นที่ครอบคลุม (STPs) ต้องเป็นสถานีฐานที่ถูกติดตั้งเท่านั้น สมการที่ (3.4) แสดงการรับประกันว่า สถานีถ่ายทอดที่ทำการเชื่อมต่อกับตำแหน่งรับประกันพื้นที่ครอบคลุม (STPs) ต้องเป็นสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งเท่านั้น สมการที่ (3.5) แสดงการรับประกันว่า สถานีฐานจะทำการเชื่อมต่อกับตำแหน่งรับประกันพื้นที่ครอบคลุม (STPs) ได้นั้นระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสถานีฐานต้องมีความมากกว่าค่าระดับสัญญาณขั้นต่ำที่กำหนดไว้สำหรับการเชื่อมต่อ และสมการที่ (3.6) แสดงการรับประกันว่า สถานีถ่ายทอดจะทำการเชื่อมต่อกับตำแหน่งรับประกันพื้นที่ครอบคลุม (STPs) ได้นั้นระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสถานีถ่ายทอดต้องมีความมากกว่าค่าระดับสัญญาณขั้นต่ำที่กำหนดไว้สำหรับการเชื่อมต่อ

เงื่อนไขสำหรับการรับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน:

$$\sum_{j=1}^b x_{gj} + \sum_{i=1}^r y_{gi} \geq 1, \forall g \in D \quad (3.7)$$

$$x_{gj} \leq \beta_j, \forall g \in D, j \in B \quad (3.8)$$

$$y_{gi} \leq \gamma_i, \forall g \in D, i \in R \quad (3.9)$$

$$x_{gj}(P_{gj} - P_T) \geq 0, \forall g \in D, j \in B \quad (3.10)$$

$$y_{gi}(P_{gi} - P_T) \geq 0, \forall g \in D, i \in R \quad (3.11)$$

เซตของสมการเงื่อนไขสำหรับการรับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้งานข้างต้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ สมการที่ (3.7) แสดงการรับประกันว่าทุก ๆ ตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) ต้องสามารถทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐานหรือสถานีถ่ายทอดอย่างน้อย 1 โหนดเพื่อรับรองว่า เมื่อผู้ใช้งาน เข้ามาใช้บริการเครือข่าย ณ จุดที่รับประกันการบริการ จะได้รับบริการด้วยอัตราเร็วทางกายภาพที่มีคุณภาพสำหรับการประยุกต์ใช้งาน สมการที่ (3.8) แสดงการรับประกันว่า สถานีฐานที่ทำการเชื่อมต่อกับตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) ต้องเป็นสถานีฐานที่ถูกติดตั้งเท่านั้น สมการที่ (3.9) แสดงการรับประกันว่า สถานีถ่ายทอดที่ทำการเชื่อมต่อกับตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) ต้องเป็นสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งเท่านั้น สมการที่ (3.10) แสดงการรับประกันว่า สถานีฐานจะทำการเชื่อมต่อกับตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) ได้นั้นระดับความแรงของสัญญาณที่ได้จากสถานีฐานต้องมีค่ามากกว่าค่าระดับสัญญาณขั้นต่ำที่กำหนดไว้สำหรับการเชื่อมต่อ และสมการที่ (3.11) แสดงการรับประกันว่า สถานีถ่ายทอดจะทำการเชื่อมต่อกับตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) ได้นั้นระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสถานีถ่ายทอดต้องมีค่ามากกว่าค่าระดับสัญญาณขั้นต่ำที่กำหนดไว้สำหรับการเชื่อมต่อ

เงื่อนไขการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐาน:

$$\sum_{j=1}^b w_{ij} = \gamma_i, \quad \forall i \in R \quad (3.12)$$

$$w_{ij} \leq \beta_j, \quad \forall i \in R, j \in B \quad (3.13)$$

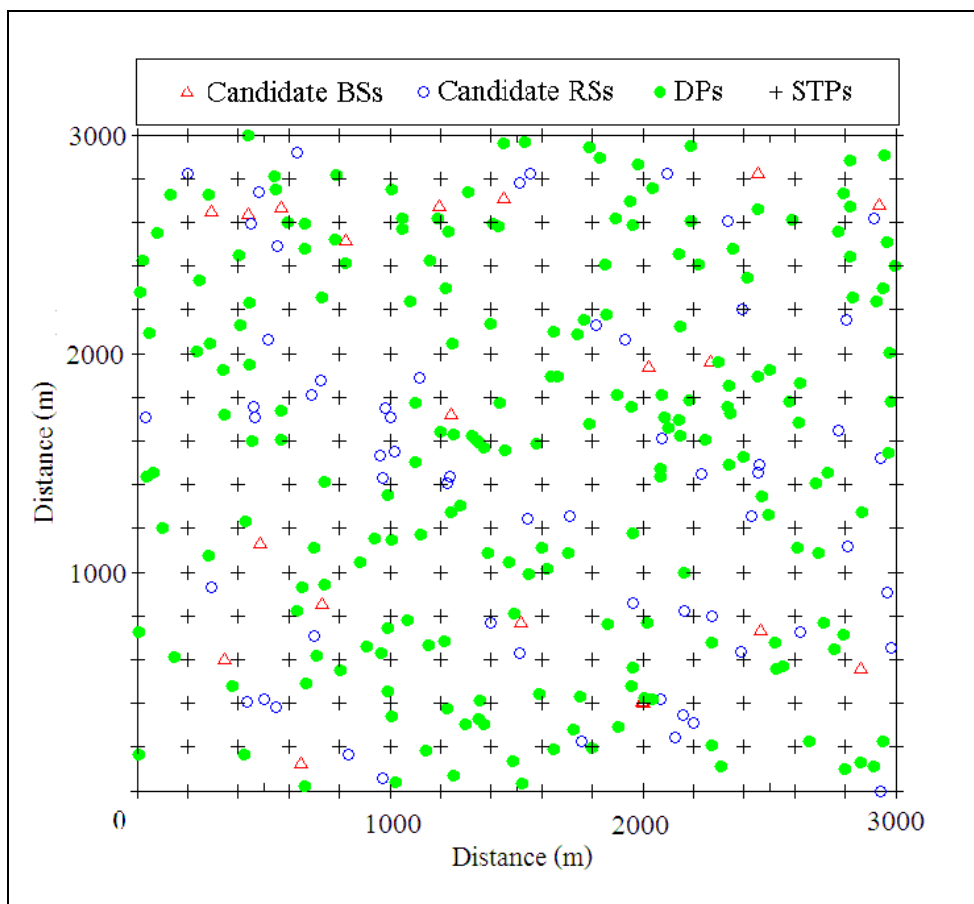
$$w_{ij}(P_{ij} - P_T) \geq 0, \quad j \in B, i \in R \quad (3.14)$$

เซตของสมการเงื่อนไขสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐานสามารถอธิบายได้ดังนี้ สมการที่ (3.12) แสดงการรับประกันว่าทุกๆ สถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งนั้นต้องสามารถเชื่อมต่อกับสถานีฐาน เพื่อให้สถานีถ่ายทอดเป็นโหนดกลางระหว่างผู้ใช้บริการกับเครือข่ายได้ สมการที่ (3.13) แสดงการรับประกันว่า สถานีฐานที่ทำการเชื่อมต่อกับสถานีถ่ายทอด ต้องเป็นสถานีฐานที่ถูกติดตั้งเท่านั้น สมการที่ (3.14) แสดงการรับประกันว่า สถานีฐานจะทำการเชื่อมต่อกับสถานีถ่ายทอด ได้นั้นระดับความแรงของสัญญาณที่สถานีถ่ายทอดรับได้จากสถานีฐานต้องมีความมากกว่าค่าระดับสัญญาณขั้นต่ำที่กำหนดไว้สำหรับการเชื่อมต่อ

3.4 การตั้งปัญหาสำหรับการทดลองหาคำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด

จากหัวข้อที่ 3.3 ได้แสดงให้เห็นถึงสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถใช้สำหรับการแก้ปัญหาการวางแผนเครือข่ายโดยการหาจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด ในส่วนของหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึงการตั้งปัญหาเพื่อนำสมการดังกล่าวมาทดสอบเพื่อหาคำตอบและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง

จากการจำลองพื้นที่ให้บริการขนาด 9 ตารางกิโลเมตร จำนวนตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดคือ 20 และ 60 จุดตามลำดับ รวมถึงจุดที่รับประกันการบริการแก่ผู้ใช้งานทั้งหมด 200 จุด ซึ่งตำแหน่งเหล่านี้ได้มาจากการสุ่มแบบมีแบบแผน (Uniform Random) ทั้งหมด ส่วนจุดที่รับประกันสัญญาณครอบคลุมทั้งสิ้น 256 จุดถูกกำหนดให้กระจายในรูปแบบตารางทั่วพื้นที่ให้บริการ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ข้อมูลตั้งต้นสำหรับการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์

สำหรับการวางแผนเครือข่ายจากข้อมูลตั้งต้นในรูปที่ 3.1 ได้กำหนดพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการพยากรณ์ระดับสัญญาณที่ตำแหน่งรับประกันพื้นที่ครอบคลุม (STPs) และตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) ได้รับจากเครือข่ายเพื่อใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นสำหรับการวางแผนเครือข่ายในแบบต่าง ๆ และพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่จำเป็นสำหรับสมการคณิตศาสตร์เพื่อการหาคำตอบของปัญหาการวางแผนเครือข่ายดังแสดงในตารางที่ 3.1

อัตราเร็วทางกายภาพระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานกับสถานีฐานหรือสถานีถ่ายทอดของเครือข่ายไวแมกซ์นั้นแปรผันตามระดับสัญญาณที่อุปกรณ์ผู้ใช้งานสามารถรับได้และวิธีการมอดูเลต ดังนั้นอัตราเร็วทางกายภาพที่ตำแหน่งรับประกันพื้นที่ครอบคลุม (STPs) และตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) ต้องการตามตารางที่ 3.1 สามารถเทียบได้จากตารางที่ 3.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูเลต อัตราเร็วทางกายภาพ และระดับสัญญาณขั้นต่ำที่อุปกรณ์ผู้ใช้งานควรรับได้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองร่วมกับข้อมูลตั้งต้นสำหรับการคำนวณ

พารามิเตอร์	ค่า
ความสูงของเสาสัญญาณที่ติดตั้งสายอากาศของแต่ละ BSs และ RSs	60 m
ความสูงสายอากาศของอุปกรณ์ผู้ใช้งาน	2 m
กำลังส่งจากแต่ละ BSs และ RSs	35 dBm
กำลังขยายในสายอากาศ ของแต่ละ BSs และ RSs	16 dBi
กำลังขยายในสายอากาศของอุปกรณ์ผู้ใช้งาน	2 dBi
ความถี่ของสัญญาณพาห์	2.5 GHz
ประเภทของลักษณะภูมิประเทศ (อ้างอิงจาก SUI model)	C
ความกว้างของช่องสัญญาณ	3.5 MHz
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับ DPs	12.71 Mbps
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับ STPs	5.64 Mbps
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 1 สถานีฐาน	120,000 \$
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 1 สถานีถ่ายทอด	48,000 \$

ตารางที่ 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูเลต อัตราเร็วทางกายภาพและระดับสัญญาณขั้นต่ำในการรักษาอัตราเร็วทางกายภาพ

วิธีการมอดูเลต	อัตราเร็วทางกายภาพ (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

พารามิเตอร์และข้อมูลตั้งต้นในหัวข้อนี้ได้ถูกนำเข้าสู่กระบวนการวางแผนเครือข่ายในส่วนไร้สายของไวแมกซ์เพื่อหาจำนวนและตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดด้วย

วิธีการออกแบบต่าง ๆ กัน แล้วทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการออกแบบ ซึ่งการทดลองวางแผนเครือข่ายได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 3.6

3.5 การหาคำตอบสำหรับสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี

สำหรับโปรแกรมประยุกต์ (Application Program) ที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดในปัจจุบันมีมากมาย ซึ่งผู้วิจัยได้คุ้นเคยกับการใช้โปรแกรม ILOG OPL IDE เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ง่าย มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับอย่างแพร่หลาย สำหรับแก้ปัญหาคำตอบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี ในโปรแกรม ILOG OPL IDE มีฟังก์ชันของการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยวิธีซิมเพล็กซ์อัลกอริทึม (Simplex Algorithms) ดังนั้นจึงเป็นเรื่องง่ายที่ผู้วิจัยจะนำไปใช้ในการหาคำหนดสำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดสำหรับเครือข่ายไวแมกซ์ โดยรายละเอียดของหน้าต่างโปรแกรม ILOG OPL IDE สามารถอธิบายได้ในรูปที่ 3.2

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

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

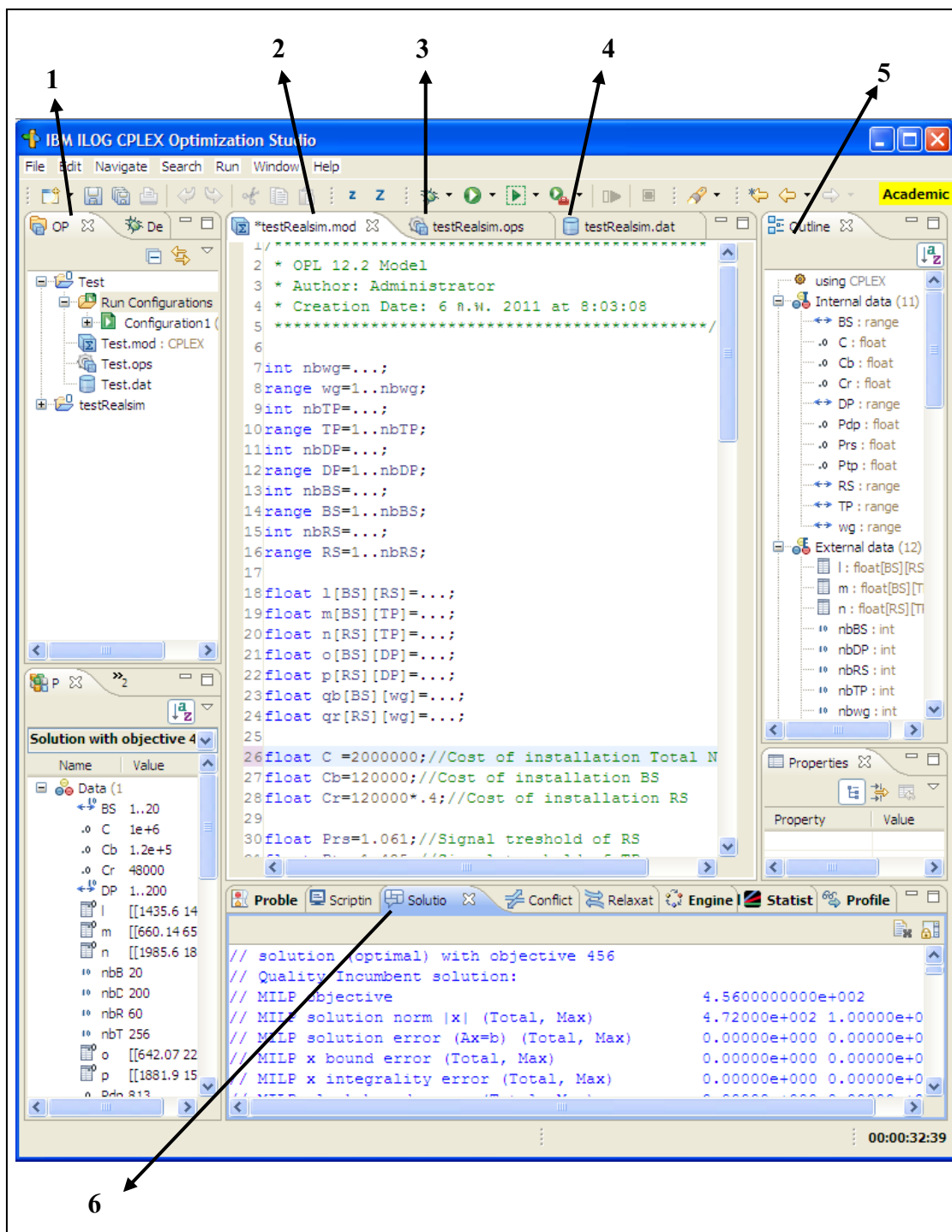
หมายเลข 3 (Data File Editing Area) แสดงหน้าต่างสำหรับใส่ข้อมูลที่เป็นตัวแปร ทั้งที่อยู่ในรูปของตัวแปรค่าเดียว และในรูปของเมตริกซ์ (Matrix) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกเรียกใช้ในการคำนวณโดยคำสั่งในโมเดลไฟล์

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

หมายเลข 5 (Outline View) แสดงโครงสร้างของข้อมูลที่อยู่ในหน้าต่างของ โมเดลไฟล์ คาด้าไฟล์ และ เซตติงไฟล์ และจัดเรียงข้อมูลให้แสดงในรูปแบบรายการเพื่อง่ายต่อการตรวจสอบและค้นหา

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

ตัวอย่างคำสั่งของโปรแกรม ILOG OPL IDE ที่แสดงต่อไปนี้เป็นการแปลงสมการคณิตศาสตร์ของการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีจากหัวข้อที่ 3.3 เพื่อคำนวณหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการวางแผนเครือข่ายดังนี้



รูปที่ 3.2 หน้าต่างโปรแกรม IBM ILOG OPL IDE

ตารางที่ 3.3 แสดงการแปลงสมการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีเป็นคำสั่งในโปรแกรม

ILOG OPL IDE

สมการจากหัวข้อ 3.3	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;}

จากการที่ได้อธิบายรายละเอียดโปรแกรมมาพอสมควร ILOG OPL IDE ถือว่าเป็นเครื่องมือที่ใช้งานง่ายและสามารถเข้าใจง่ายในการหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับสมการคณิตศาสตร์ ในรูปแบบการ

โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี แต่อย่างไรก็ตามผู้วิจัยยังต้องศึกษาหลักการและการบวนการใช้เครื่องมืออย่างละเอียดใน ในคู่มือสำหรับอ้างอิง ไม่ว่าจะเป็นการเขียนตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไข ทั้งนี้เพื่อให้เกิดความถูกต้องของคำตอบที่ดีที่สุดตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

3.6 การดำเนินการทดลองหาดำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับการติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด

ในหัวข้อนี้ได้้นำพารามิเตอร์และข้อมูลตั้งต้นสำหรับการทดลองวางแผนเครือข่ายจากหัวข้อที่ 3.4 มาทำการหาดำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดโดยมีจุดประสงค์เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเครือข่ายและรับประกันการให้บริการกับผู้ใช้งาน ซึ่งใช้วิธีการวางแผนเครือข่ายต่างกันคือ การใช้หลักการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี การใช้วิธีกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานให้กระจายตัวเท่ากัน และการใช้วิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน เพื่อนำผลการทดลองวางแผนเครือข่ายมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกัน และหาวิธีการวางแผนเครือข่ายที่เหมาะสมกับปัญหาการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ที่สุด

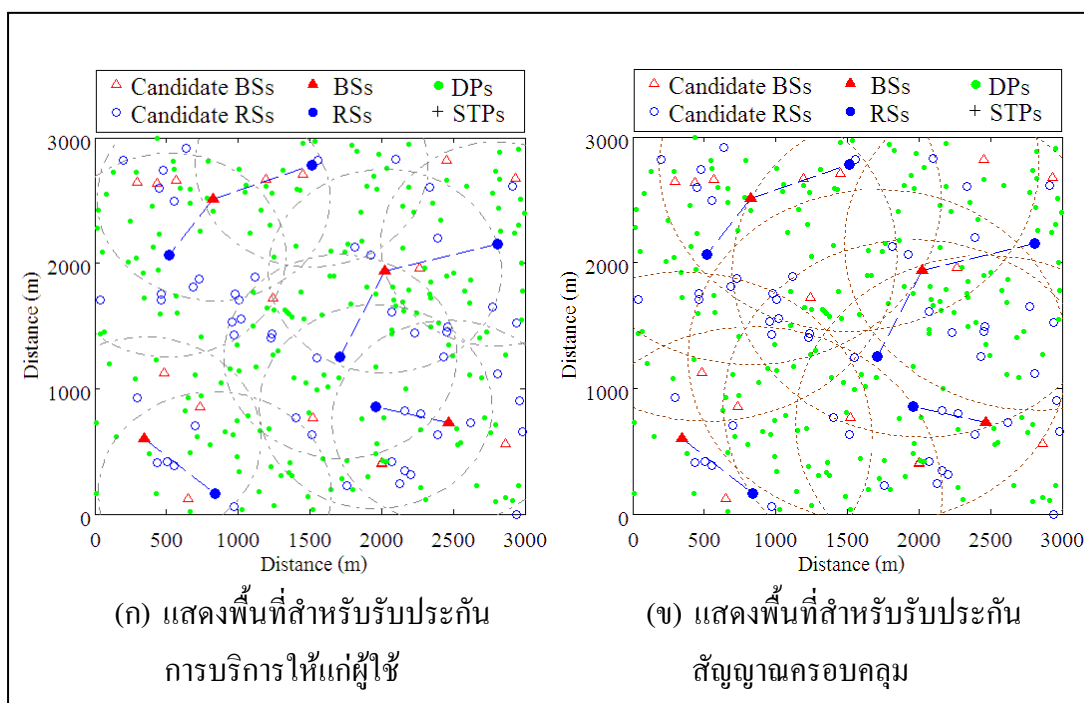
สำหรับสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมประยุกต์ ILOG OPL IDE โดยมี CPLEX 5.2 optimization solver ซึ่งได้กล่าวในหัวข้อที่ 3.5 เป็นเครื่องมือในการหาคำตอบ และใช้คอมพิวเตอร์รุ่น Intel Centrino Core 2 Duo Processor 1.83 GHz ขนาด 2 GB RAM ในการประมวลผล ในส่วนของการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์โดยใช้วิธีกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานให้กระจายตัวเท่ากันทั่วพื้นที่ให้บริการ และวิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน ได้กำหนดจำนวนสถานีฐานในแต่ละกรณีต่างกัน คือ 4 6 10 และ 20 สถานีฐานตามลำดับ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นและเปรียบเทียบผลกับการวางแผนเครือข่ายโดยใช้สมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี ส่วนเครื่องมือที่ใช้ช่วยวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายคือโปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ง่ายมีประสิทธิภาพและนิยมอย่างแพร่หลาย

3.6.1 การทดลองหาดำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดโดยสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี

สำหรับการทดสอบหาดำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดโดยใช้หลักการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีที่กล่าวในหัวข้อนี้ได้ใช้โปรแกรมประยุกต์ ILOG OPL IDE โดยมี CPLEX 5.2 optimization solver เป็นเครื่องมือในการหาคำตอบ โดยการเปลี่ยนสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทำการพิจารณา ให้เป็นคำสั่งทางคอมพิวเตอร์ที่จะนำไปประมวลผลเพื่อค้นหา

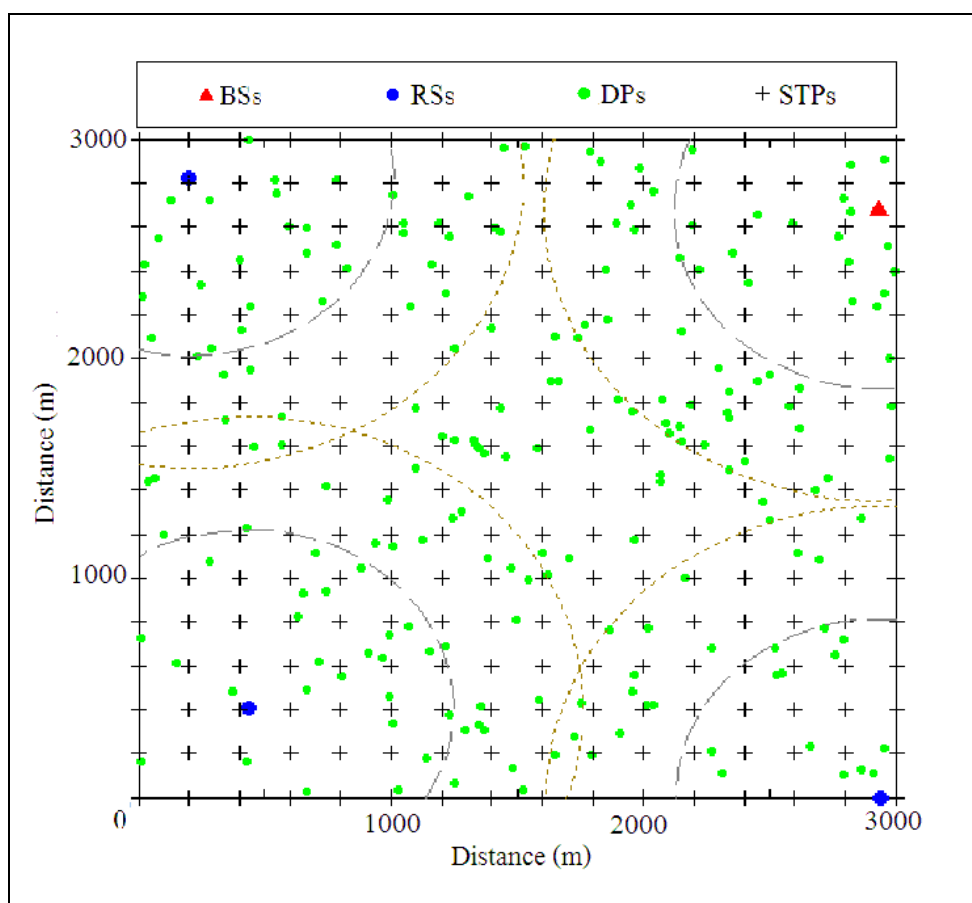
คำตอบที่ดีที่สุด จากข้อมูลตั้งต้นที่ได้้นำการกำหนดฟังก์ชันของตำแหน่งต่างๆ และพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับการวางแผนเครือข่ายจากหัวข้อที่ 3.4 ทดลองวางแผนเครือข่ายโดยนำสมการคณิตศาสตร์จากหัวข้อที่ 3.3 ทำการทดลองเปรียบเทียบกับวางแผนเครือข่ายโดยสมการจากปริทัศน์วรรณกรรม ซึ่งทั้งสองสมการเป็นสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี แต่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไขต่างกัน ซึ่งการทดลองและผลการทดลองได้อธิบายไว้ในหัวข้อต่อไป

3.6.1.1 การวางแผนเครือข่ายโดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อลดมูลค่าการลงทุน ในหัวข้อนี้กล่าวถึงการวางแผนเครือข่ายโดยนำสมการปัญหาการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด (Base Station and Relay Station Placement Problem : BRPP) โดยนำสมการในหัวข้อที่ 3.3 ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อลดงบประมาณในการลงทุนติดตั้งเครือข่าย และเงื่อนไขคือรับประกันความแรงสัญญาณให้เพียงพอสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างเครือข่ายกับผู้ใช้ โดยการออกแบบใช้ข้อมูลตั้งต้นจากหัวข้อ 3.4 ที่มีจำนวนตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดคือ 20 และ 60 ตำแหน่งตามลำดับ หลังจากใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำการคำนวณเพื่อหาตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดเพื่อให้ผลตรงตามวัตถุประสงค์ คือ การติดตั้งสถานีฐานจำนวน 4 สถานี และสถานีถ่ายทอดจำนวน 6 สถานี ดังรูปที่ 3.3

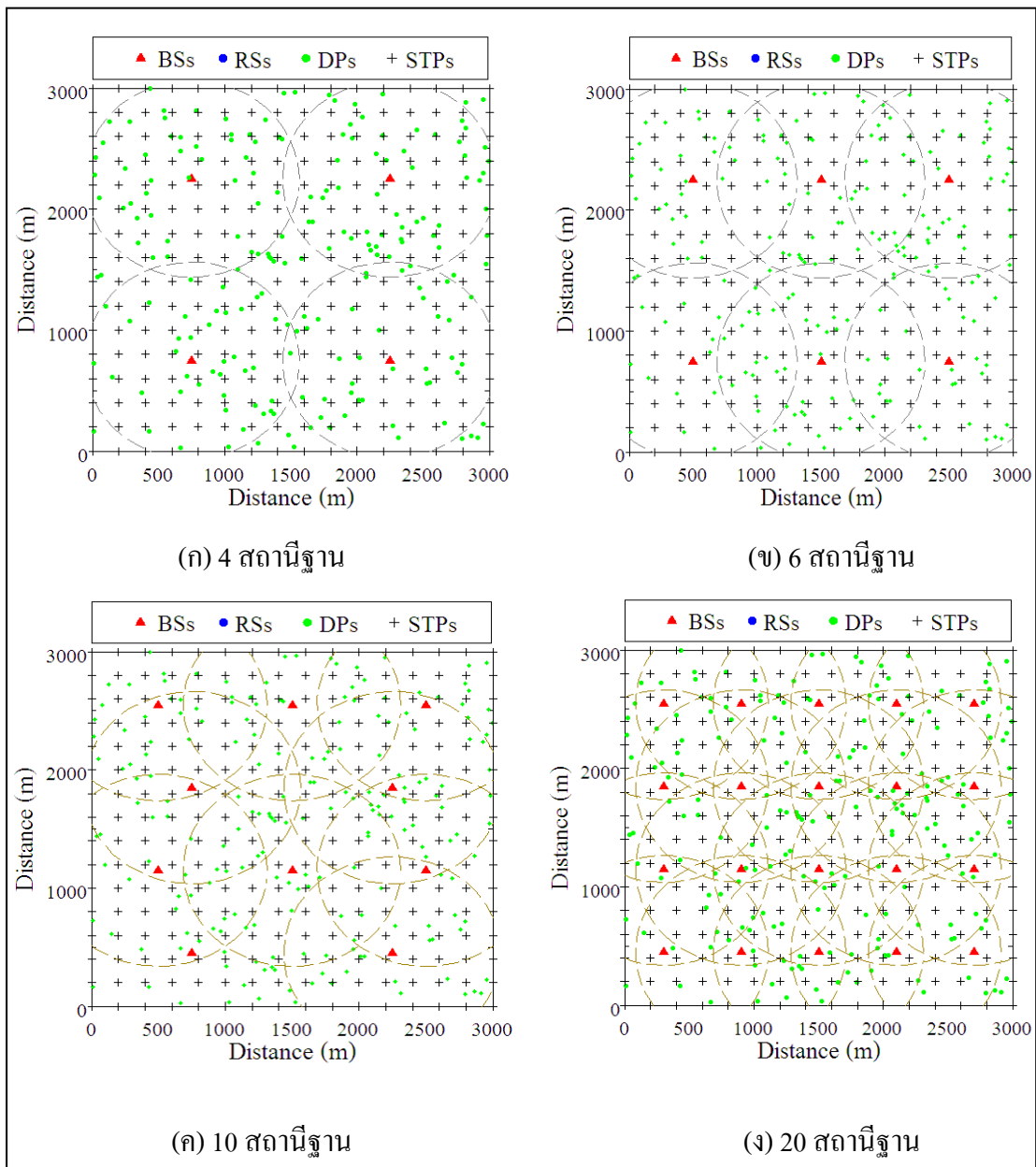


รูปที่ 3.3 ผลการวางแผนเครือข่ายจากสมการปัญหาการหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด (BRPP)

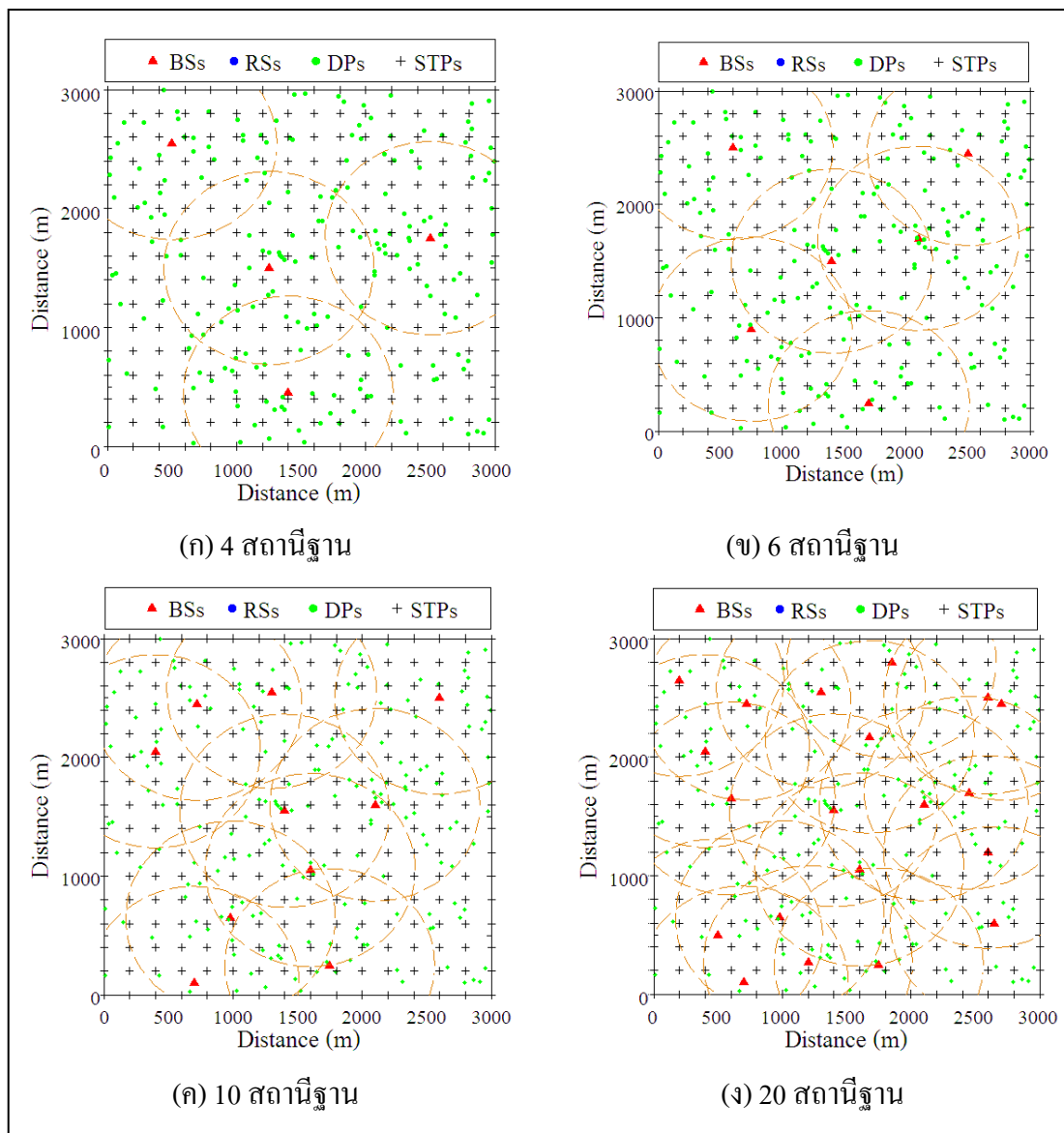
3.6.1.2 การวางแผนเครือข่ายโดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อลดมูลค่าการลงทุนและลดกำลังส่งจากสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด ในหัวข้อนี้กล่าวถึงการวางแผนเครือข่ายโดยนำสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีที่มีการถ่วงน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Weight Objective Function : WOF) จากปริทัศน์วรรณกรรมมาทดสอบหาดำเนินการติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด สมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์ในการลดงบประมาณในการลงทุนติดตั้งเครือข่ายและลดกำลังส่งจากสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด โดยถ่วงน้ำหนักพจน์ของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่อยู่ในส่วนของกำลังส่ง เพื่อให้สามารถทำการคำนวณร่วมกันกับงบประมาณการลงทุนได้ การทดลองวางแผนเครือข่ายได้ใช้ข้อมูลตั้งต้นจากหัวข้อที่ 3.4 เช่นเดียวกับหัวข้อก่อนหน้านี้ ซึ่งผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือติดตั้งสถานีฐาน 1 สถานีและสถานีถ่ายทอด 3 สถานี เพื่อให้ผลการออกแบบตรงตามวัตถุประสงค์ ดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ผลการวางแผนเครือข่ายแบบถ่วงน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (WOF)



รูปที่ 3.5 ผลการวางแผนเครือข่ายโดยวิธีกำหนดที่ตั้งสถานีฐานให้กระจายตัวเท่ากัน (UB)



รูปที่ 3.6 ผลการวางแผนเครือข่ายโดยวิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน (EA)

3.6.2 การทดสอบวางแผนเครือข่ายโดยกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน ให้กระจายตัวเท่ากัน

การทดลองวางแผนเครือข่ายโดยกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานแบบกระจายตัวเท่ากัน (Uniform Base Stations method :UB method) เพื่อนำผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองในหัวข้อ 3.4.1 จึงได้ใช้ข้อมูลตั้งต้นในส่วนของตำแหน่งรับประกันพื้นที่ครอบคลุม (STPs) และตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) ชุดเดียวกัน ซึ่งจำนวนและตำแหน่งของสถานีฐานที่ติดตั้งสำหรับหัวข้อนี้มีทั้งสิ้น 4 แบบ คือ 4 6 10 และ 20 สถานีฐาน ซึ่งใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณสัญญาณครอบคลุมของการทดลองแต่ละแบบ ซึ่งได้ผลต่างกันดังรูปที่ 3.5

3.6.3 การทดสอบวางแผนเครือข่ายโดยใช้วิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน

การวางแผนเครือข่ายโดยใช้วิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน (Expert Approximation method : EA method) เป็นวิธีที่บริษัทผู้ให้บริการโทรศัพท์ระบบเซลลูลาร์นิยมใช้ในการวางแผนเครือข่ายจริง ซึ่งวิธีนี้สามารถควบคุมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีฐานได้ง่าย โดยการระบุจำนวนสถานีฐานที่ต้องการติดตั้ง ซึ่งการวางแผนเครือข่ายได้พิจารณากำหนดที่ตั้งสถานีฐานจากบริเวณที่มีตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) อยู่หนาแน่น และจำนวนของสถานีฐานได้อ้างอิงจากหัวข้อ 3.4.2 คือ 4 6 10 และ 20 สถานีฐาน ทำการหาค่าความแรงสัญญาณตำแหน่งรับประกันพื้นที่ครอบคลุม (STPs) และตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) รับได้จากเครือข่าย โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งผลของการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ด้วยวิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน (EA) แสดงในรูปที่ 3.6

3.6.4 วิเคราะห์ผลการวางแผนเครือข่าย

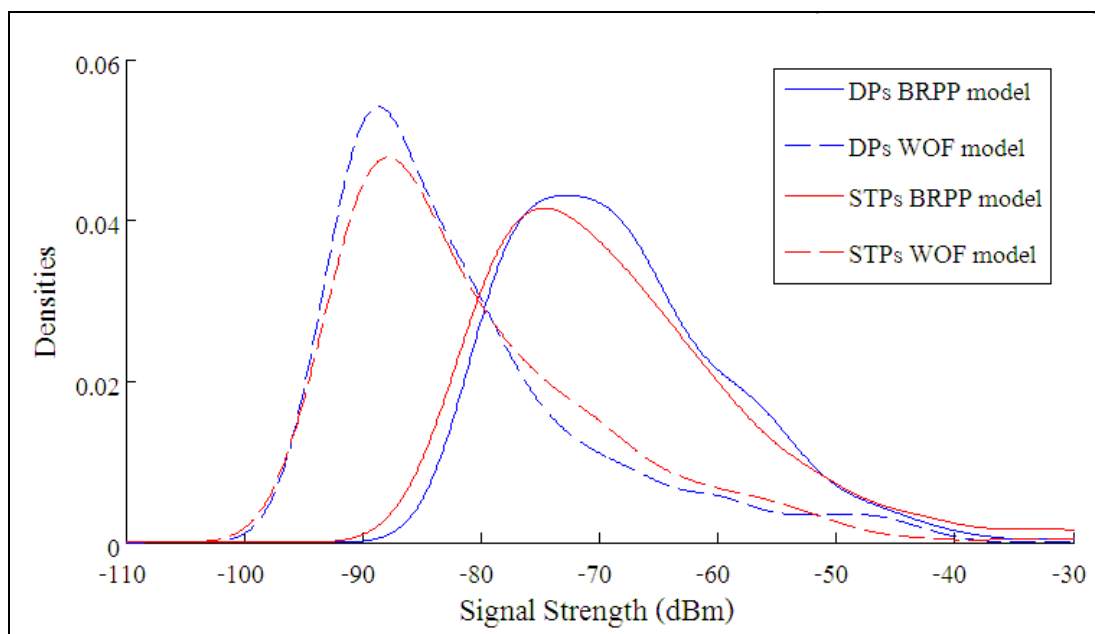
ในหัวข้อนี้ได้้นำผลการวางแผนเครือข่ายโดยใช้สมการคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี ทั้งจากสมการปัญหาการติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด (BRPP) และแบบถ่วงน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (WOF) ในหัวข้อที่ 3.6.1 มาเปรียบเทียบกับและได้นำผลของการวางแผนเครือข่ายจากสมการปัญหาการติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด (BRPP) ในหัวข้อ 3.6.1.1 เทียบกับผลการวางแผนเครือข่ายโดยใช้วิธีกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน (UB) ในหัวข้อที่ 3.6.2 และเทียบกับผลการวางแผนเครือข่ายโดยใช้วิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน (EA) ในหัวข้อที่ 3.6.3 ซึ่งการวิเคราะห์ผลการวางแผนเครือข่ายที่ใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มทั้งสองแบบได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.6.4.1 และ การวิเคราะห์ผลการใช้สมการคณิตศาสตร์โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีเทียบกับทั้งวิธีกำหนดและคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.6.4.2

3.6.4.1 วิเคราะห์ผลการทดสอบการวางแผนเครือข่ายโดยสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (BRPP เทียบกับ WOF)

สมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีของการวางแผนเครือข่ายในหัวข้อ 3.6.1.1 (BRPP) กับ 3.6.1.2 (WOF) มีส่วนที่ต่างกันหลัก ๆ สองส่วนคือ (1.) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์และเงื่อนไข โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของหัวข้อ 3.6.1.1 (BRPP) คือการลดงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่าย ทั้งส่วนของสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด ส่วนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของหัวข้อ 3.6.1.2 (WOF) คือการลดงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่าย และลดกำลังส่งจากสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดโดยใช้พารามิเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (2.) เงื่อนไขของหัวข้อ 3.6.1.1 (BRPP) มีการบังคับให้ความแรงสัญญาณสำหรับทุกตำแหน่งรับประกันคุณภาพการให้บริการ (DPs และ STPs) รับได้จากเครือข่ายต้องมีค่ามากกว่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำที่กำหนดไว้ แต่เงื่อนไขของหัวข้อ 3.6.1.2 (WOF) ไม่ได้กำหนดค่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำไว้ ทำให้ผลการวางแผนเครือข่ายแสดงให้เห็นว่าการวางแผนเครือข่ายโดยใช้สมการคณิตศาสตร์จากหัวข้อ 3.6.1.2 (WOF) ใช้งบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่ายน้อยกว่า แต่การวางแผนเครือข่ายโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ของหัวข้อ 3.6.1.1 (BRPP) สามารถรับประกันอัตราเร็วทางกายภาพ ที่มีประสิทธิภาพให้แก่ผู้ใช้บริการทั่วพื้นที่ให้บริการและมากกว่าการวางแผนเครือข่ายโดยใช้สมการคณิตศาสตร์แบบหัวข้อ 3.6.1.2 (WOF) ถึงร้อยละ 60 และสามารถรับประกันสัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการทั้งหมดซึ่งมากกว่าถึงร้อยละ 12 ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.4 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์โดยใช้สมการคณิตศาสตร์โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี

พารามิเตอร์	BRPP model	WOF model
งบประมาณในการลงทุน (10^6 \$)	0.768	0.264
จำนวนสถานีฐานที่ใช้	4	1
จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้	6	3
จำนวน DPs ที่เครือข่ายรองรับ	200	80
จำนวน STPs ที่เครือข่ายรองรับ	256	226
การรับประกันการให้บริการอัตราเร็วทางกายภาพ	100%	40%
การรับประกันการสัญญาณครอบคลุม	100%	88.28%



รูปที่ 3.7 แสดงความหนาแน่นของสัญญาณที่รับจากเครือข่ายที่ตำแหน่ง DP's และ STP's ของ BRPP model เทียบกับ WOF model

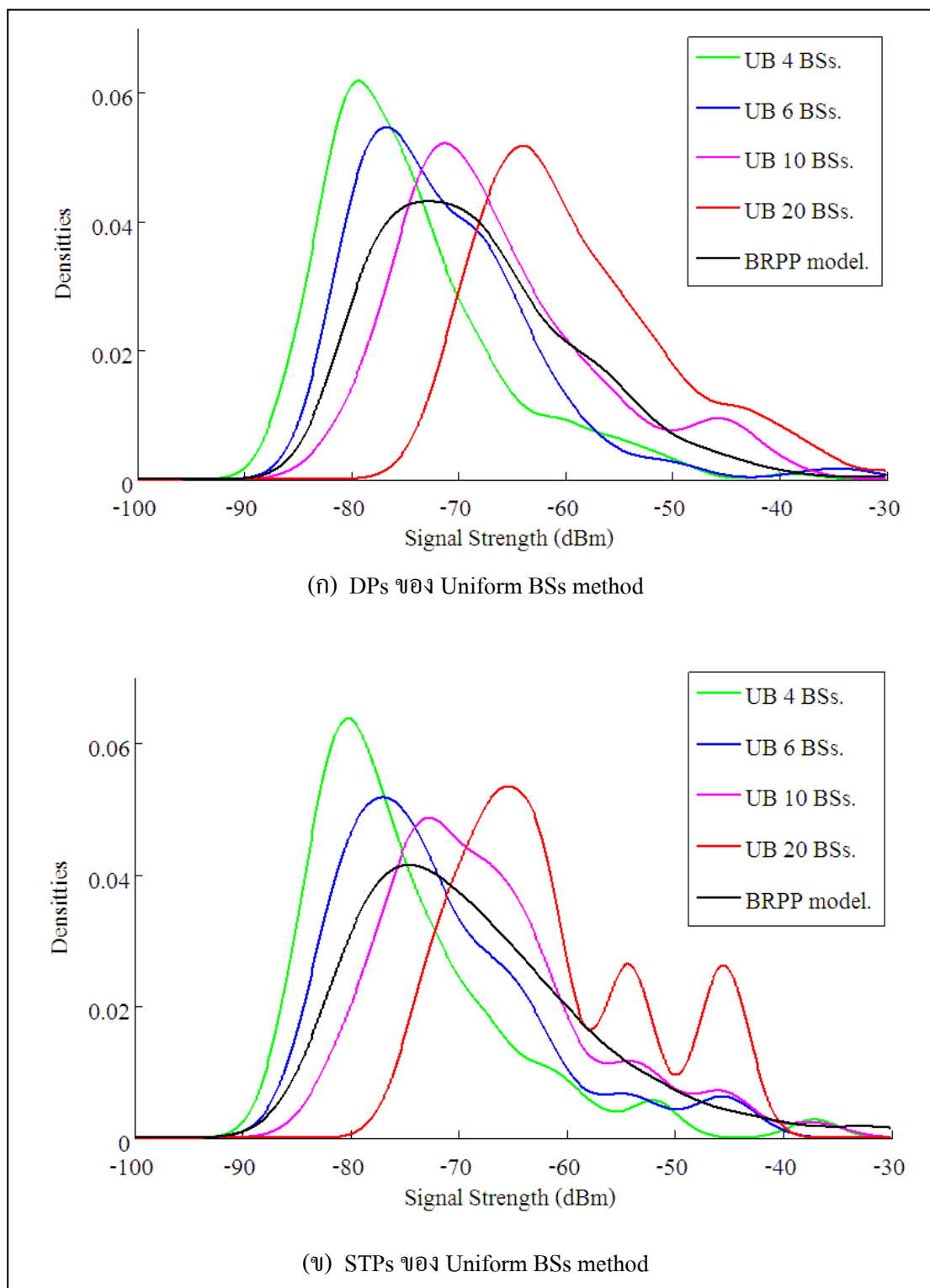
3.6.4.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบการวางแผนเครือข่ายโดยสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีเทียบกับวิธีกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน (BRPP เทียบกับ BU และ EA)

จากการเปรียบเทียบการวางแผนเครือข่ายทั้งสามวิธีพบว่า วิธีที่สามารถรับประกันทั้งสัญญาณครอบคลุมและการให้บริการอัตราเร็วทางกายภาพทั่วทั้งเครือข่ายโดยใช้งบประมาณในการลงทุนติดตั้งเครือข่ายน้อยที่สุดคือการออกแบบในหัวข้อ 3.6.1.1 เนื่องจากมีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดทดแทนการติดตั้งสถานีฐาน และได้ใช้สมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีสำหรับการหาคำตอบที่เหมาะสม ซึ่งโปรแกรม ILOG OPL IDE ที่ใช้เป็นเครื่องมือในการหาคำตอบนั้น ใช้ขั้นตอนวิธีแบบซิมเพล็กซ์อัลกอริทึม ซึ่งเป็นวิธีที่รับประกันได้ว่าผลการออกแบบที่ได้จะเป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ส่วนการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีกระจายสถานีให้เท่ากัน (UB) นั้นการรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้จะแปรผันตามจำนวนสถานีฐานที่ติดตั้ง และคุณภาพการให้บริการของการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน (EA) นั้นขึ้นอยู่กับทั้งจำนวนสถานีฐานที่ติดตั้ง และความแม่นยำในการคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน

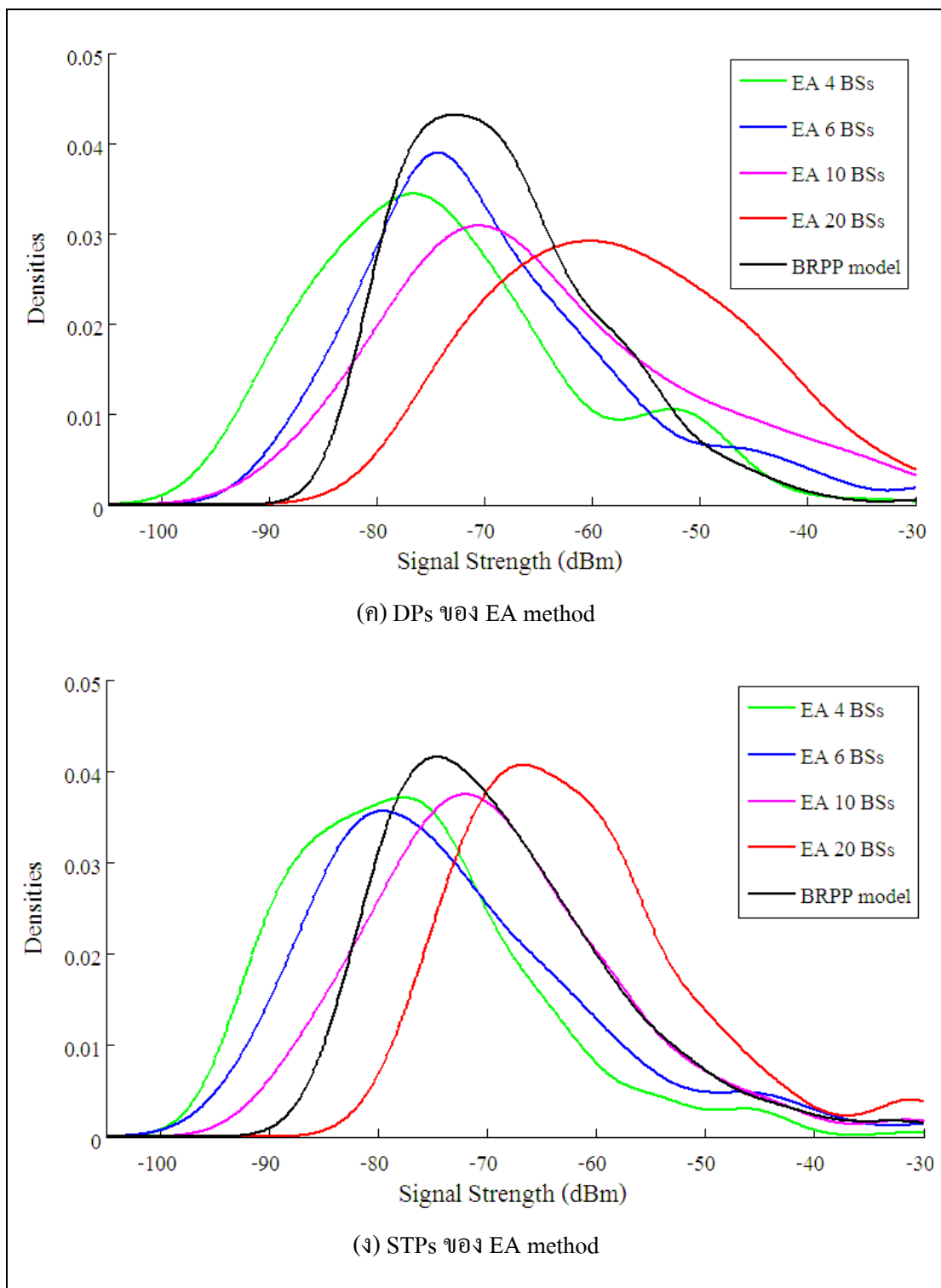
ตารางที่ 3.5 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์โดยใช้วิธีกำหนดที่ตั้ง
สถานีฐาน

พารามิเตอร์	BRPP model	Uniform Base Stations				Expert Approximation			
		Method				Method			
		4 BSs	6 BSs	10 BSs	20 BSs	4 BSs	6 BSs	10 BSs	20 BSs
งบประมาณในการลงทุน (10^6 \$)	0.768	0.48	0.72	1.20	2.40	0.48	0.72	1.20	2.40
จำนวนสถานีฐาน	4	4	6	10	20	4	6	10	20
จำนวนสถานีถ่ายทอด	6	-	-	-	-	-	-	-	-
จำนวน DP's ที่เครือข่ายรองรับ	200	173	194	199	200	146	176	183	200
จำนวน STP's ที่เครือข่ายรองรับ	256	256	256	256	256	241	250	256	256
การรับประกันการให้บริการอัตราเร็ว ทางกายภาพ (%)	100	86.5	97.0	100	100	73	88	91.5	100
การรับประกันการสัญญาณครอบคลุม (%)	100	100	100	100	100	94.1	97.7	100	100

ความแรงสัญญาณที่แต่ละตำแหน่งรับประกันพื้นที่ครอบคลุม (STPs) และตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) รับได้จากเครือข่ายสามารถอธิบายด้วยรูปที่ 3.8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแรงสัญญาณที่รับได้นั้นแปรผันตามจำนวนสถานีฐาน เมื่อจำนวนสถานีฐานมากมีผลให้สามารถรับสัญญาณจากเครือข่ายได้ในระดับที่สูง สำหรับการวางแผนเครือข่ายโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีได้ให้ผลการออกแบบคือใช้สถานีฐาน 4 สถานีและสถานีถ่ายทอด 6 สถานี รวมเป็น 10 สถานี ซึ่งไม่ได้ให้ความแรงสัญญาณที่ดีที่สุดตำแหน่งรับประกันคุณภาพการให้บริการ (STPs และ DPs) แต่ด้วยเงื่อนไขจากสมการทางคณิตศาสตร์ที่กำหนดให้ทุกตำแหน่งต้องได้รับความแรงสัญญาณจากเครือข่ายมากกว่าความแรงขั้นต่ำที่กำหนดไว้ ทำให้เส้นกราฟความหนาแน่นของสัญญาณที่รับได้จากผลการออกแบบโดยใช้การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีเริ่มเพิ่มขึ้นหลังจากค่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำซึ่งหมายถึงความสามารถในการรับประกันคุณภาพการให้บริการได้ทั้งหมดทั่วพื้นที่ให้บริการ



รูปที่ 3.8 แสดงความหนาแน่นของสัญญาณที่รับได้จากเครือข่ายที่วางแผนเครือข่าย
ด้วยวิธี BRPP model เทียบกับ UB method และ EA method

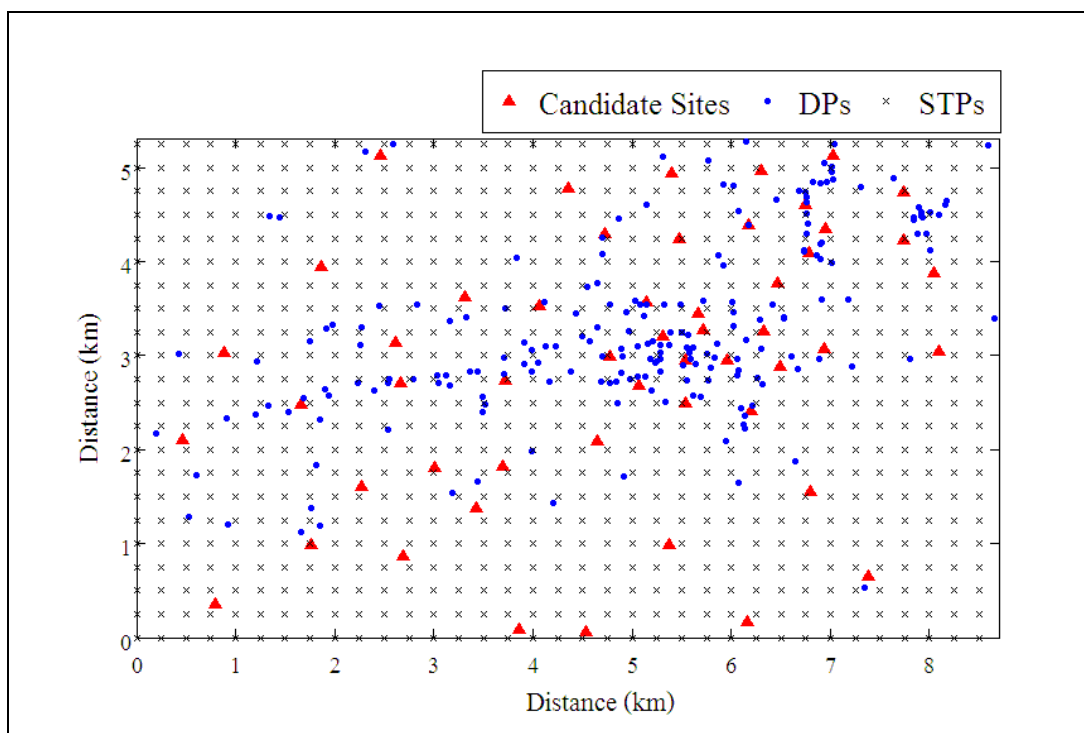


รูปที่ 3.8 แสดงความหนาแน่นของสัญญาณที่รับได้จากเครือข่ายที่วางแผนเครือข่าย
ด้วยวิธี BRPP model เทียบกับ UB method และ EA method (ต่อ)

3.7 การวางแผนเครือข่ายในพื้นที่ให้บริการจริง

จากการวิเคราะห์ผลการออกแบบในหัวข้อที่ 3.6 แสดงให้เห็นว่า การวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในหัวข้อที่ 3.3 สามารถคงประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่ายให้เหลือน้อยที่สุดโดยรับประกันการให้บริการอัตราเร็วทางกายภาพและสัญญาณครอบคลุมแก่ผู้ใช้งานในเครือข่ายทั้งหมด ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้นำสมการทางคณิตศาสตร์จากหัวข้อที่ 3.3 มาทดลองวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริง

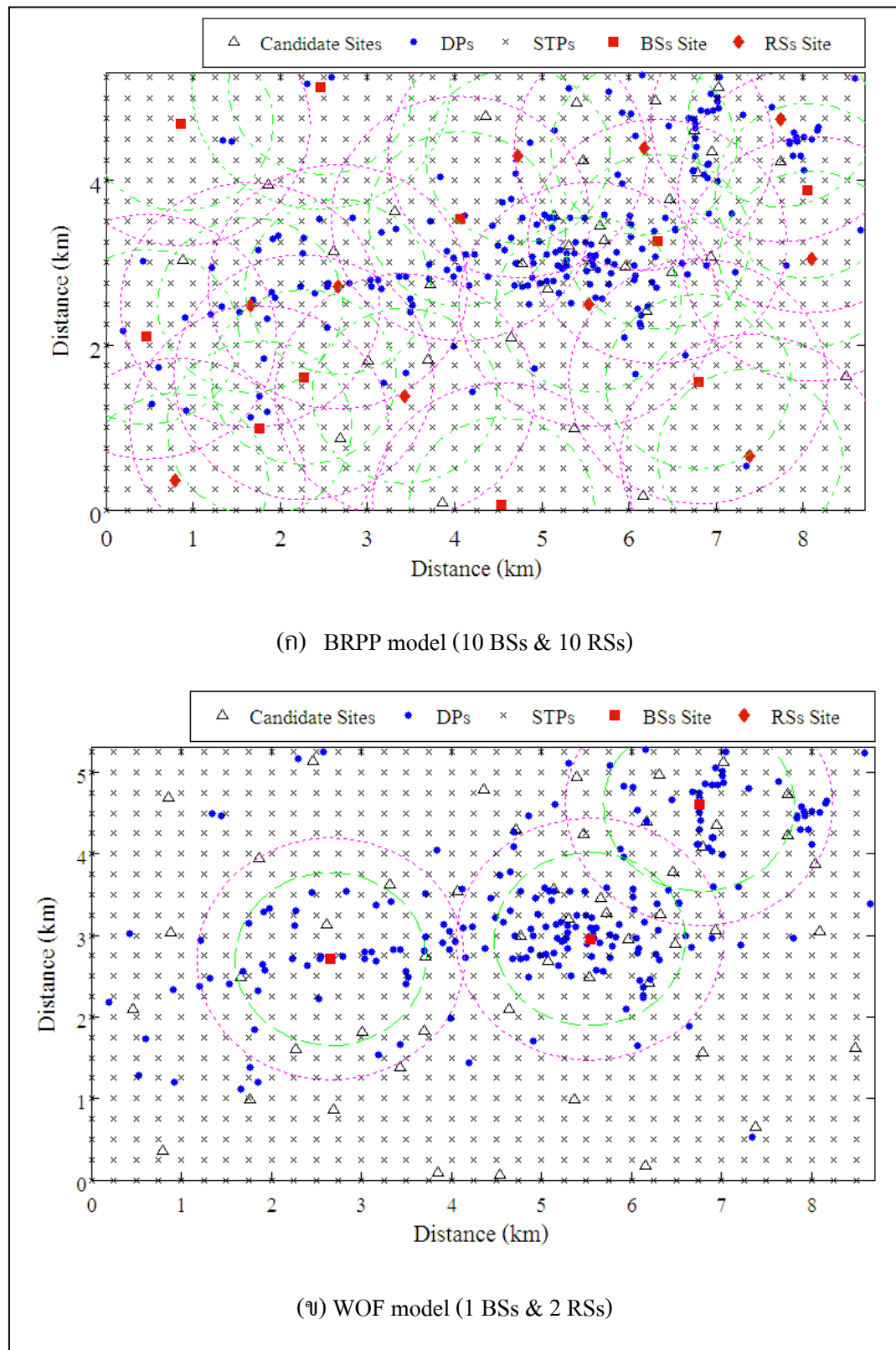
พื้นที่จริงที่เลือกทำการออกแบบคือตัวเมืองนครราชสีมา ซึ่งขณะนี้ยังไม่มีบริการแบบบรอดแบนด์ไร้สายใด ๆ ในพื้นที่กว้างระดับมาโครเซลล์ (Macro Cellular Area) มาก่อน ในพื้นที่ 46 ตารางกิโลเมตรของเขตตัวเมือง ได้พิจารณาตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีฐาน (Candidate BSs) และสถานีถ่ายทอด (Candidate RSs) คือสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบจีเอสเอ็ม ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานพร้อมอยู่แล้ว ได้แก่เสาสัญญาณ ระบบไฟฟ้ากำลัง และระบบเครือข่ายใยแก้วนำแสง ทำให้สามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานเหล่านี้ และสามารถติดตั้งอุปกรณ์เครือข่ายไวแมกซ์ได้ง่ายและรวดเร็ว จำนวนสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบจีเอสเอ็ม ที่พิจารณาสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ไวแมกซ์มีจำนวน 55 ตำแหน่งซึ่งสามารถติดตั้งทั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดได้ สำหรับตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) ที่รับประกันการให้บริการได้คัดเลือกจากสถานที่ที่มีผู้ใช้บริการอยู่รวมกันจำนวนมาก เช่นสถานที่ราชการ สถานศึกษา แหล่งท่องเที่ยว และที่พักอาศัย ซึ่งในการทดลองได้พิจารณาตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) จำนวน 207 ตำแหน่ง และสำหรับการรับประกันสัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่บริการนั้น ได้กำหนดตำแหน่งรับประกันพื้นที่ครอบคลุม (STPs) กระจายตัวในรูปแบบตารางห่างกันช่วงละ 250 เมตร ทำให้ในพื้นที่ให้บริการมีตำแหน่งรับประกันพื้นที่ครอบคลุม (STPs) จำนวน 770 ตำแหน่ง ซึ่งแผนที่เขตเทศบาลเมืองนครราชสีมาแสดงในรูปที่ 3.9 และข้อมูลตั้งต้นสำหรับวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ในเขตเมืองนครราชสีมาได้แสดงในรูปที่ 3.10 และรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ประกอบการวางแผนเครือข่ายได้แสดงในตารางที่ 3.5



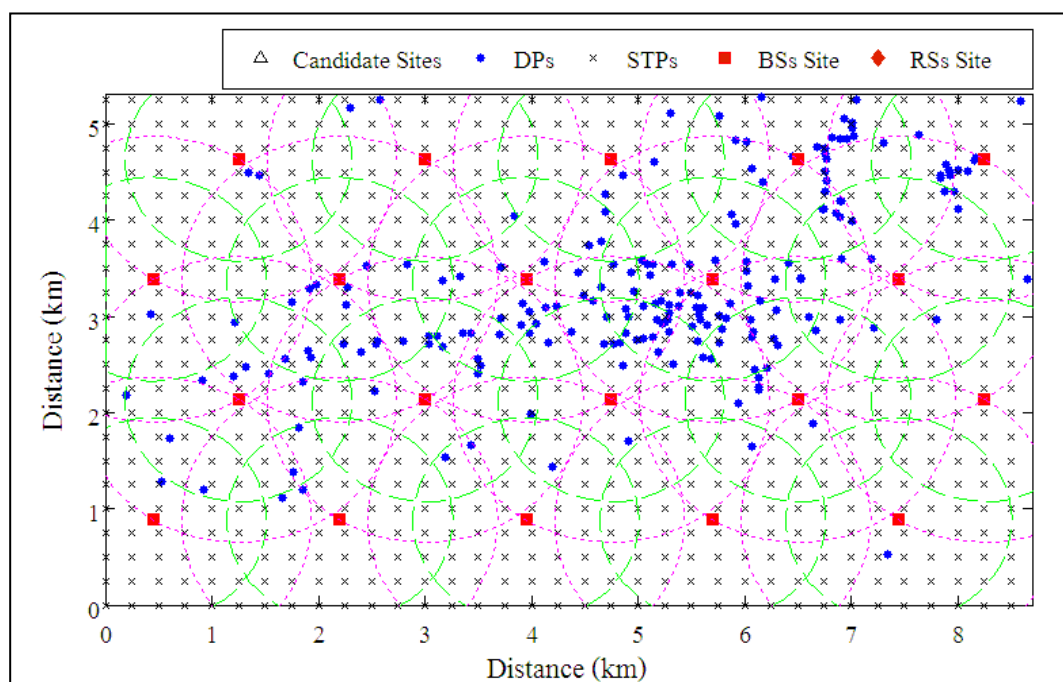
รูปที่ 3.10 ข้อมูลตั้งต้นสำหรับการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ในพื้นที่ให้บริการจริง

ตารางที่ 3.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์เขตในเมืองนครราชสีมา

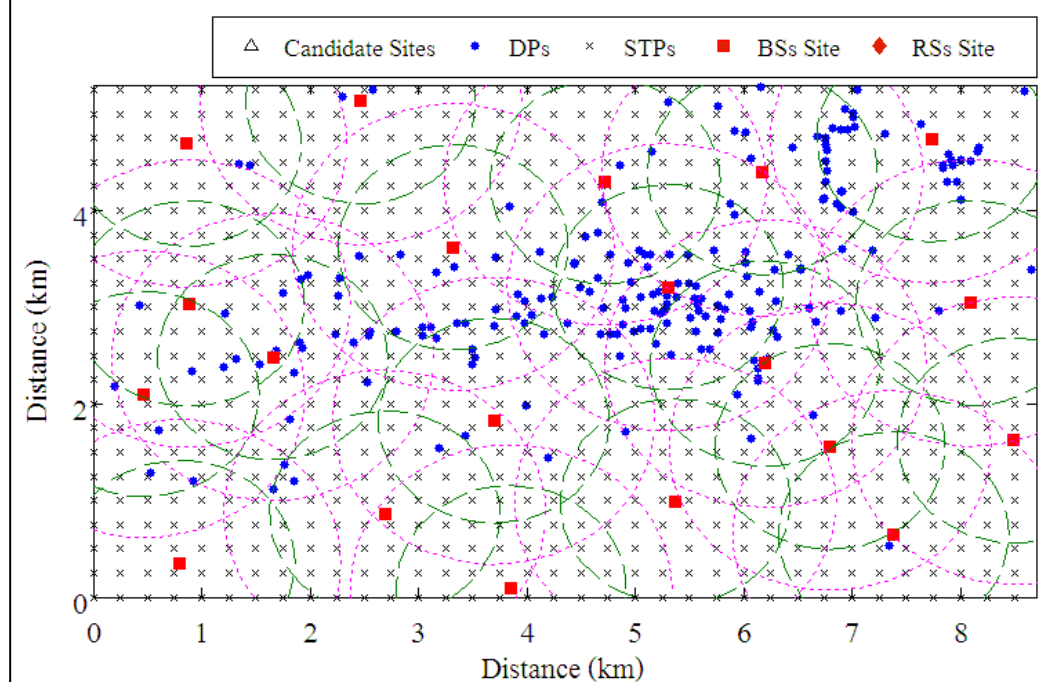
พารามิเตอร์	ค่า
ความสูงของเสาสัญญาณที่ติดตั้งสายอากาศของแต่ละ BSs และ RSs	30 m
ความสูงสายอากาศของอุปกรณ์ผู้ใช้งาน	2 m
กำลังส่งจากแต่ละ BSs และ RSs	35 dBm
กำลังขยายในสายอากาศ ของแต่ละ BSs และ RSs	16 dBi
กำลังขยายในสายอากาศของอุปกรณ์ผู้ใช้งาน	2 dBi
ความถี่ของสัญญาณพาห์	2.5 GHz
ประเภทของลักษณะภูมิประเทศ (อ้างอิงจาก SUI model)	A
ความกว้างของช่องสัญญาณ	3.5 MHz
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับ DPs	5.64 Mbps
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับ STPs	2.12 Mbps
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 1 สถานีฐาน	120,000 \$
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 1 สถานีถ่ายทอด	48,000 \$



รูปที่ 3.11 แสดงผลการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่ให้บริการจริง



(ก) UB method (20 BSs)



(ง) EA model (20 BSs)

รูปที่ 3.11 แสดงผลการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริง (ต่อ)

เมื่อนำข้อมูลตั้งต้นในรูปที่ 3.10 และพารามิเตอร์ในตารางที่ 3.5 ทำการคำนวณด้วยสมการคณิตศาสตร์โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีของวิธีในหัวข้อ 3.6.1.1 (BRPP model) ด้วยโปรแกรม ILOG OPL IDE พบว่าจากจำนวนตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับการติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดทั้งสิ้น 55 ตำแหน่ง เมื่อผ่านกระบวนการวางแผนเครือข่ายแล้วได้ตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐานจำนวน 10 ตำแหน่ง และตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวน 10 ตำแหน่ง รวมเป็น 20 ตำแหน่งเพื่อรับประกันคุณภาพการให้บริการ ทั้งหมด 100% ซึ่งหมายความว่าสามารถรับประกันการให้บริการและสัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการได้ทั้งหมด และเมื่อนำข้อมูลตั้งต้นเดียวกันทำการวางแผนเครือข่ายด้วยสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีของวิธีในหัวข้อ 3.6.1.2 (WOF model) จะได้จำนวนสถานีฐานสำหรับติดตั้ง 1 สถานีฐาน และ 2 สถานีถ่ายทอด ซึ่งไม่สามารถรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้ได้ทั้งหมดในพื้นที่ออกแบบ ส่วนการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีกำหนดตำแหน่งสถานีฐานทั้งแบบกระจายตัวเท่ากัน (UB method) และแบบคาดคะเนตำแหน่ง (EA method) จำนวนของสถานีฐานในแต่ละวิธีกำหนดไว้ที่ 20 สถานี เพื่อเทียบกับจำนวนสถานีที่เป็นผลลัพธ์ของการวางแผนเครือข่ายด้วยโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีในหัวข้อ 3.6.1.1 (BRPP model) ผลการวางแผนเครือข่ายนั้นให้คุณภาพการให้บริการที่ดี แต่การที่ไม่ติดตั้งสถานีถ่ายทอดทำให้งบประมาณการลงทุนเครือข่ายสูงกว่า และการวางแผนเครือข่ายโดยไม่ใช้ระเบียบวิธีทางคณิตศาสตร์ใด ๆ ทำให้ไม่ได้ผลตามวัตถุประสงค์ ซึ่งผลการวางแผนเครือข่ายทั้ง 4 วิธีที่กล่าวมาแสดงในรูปที่ 3.10

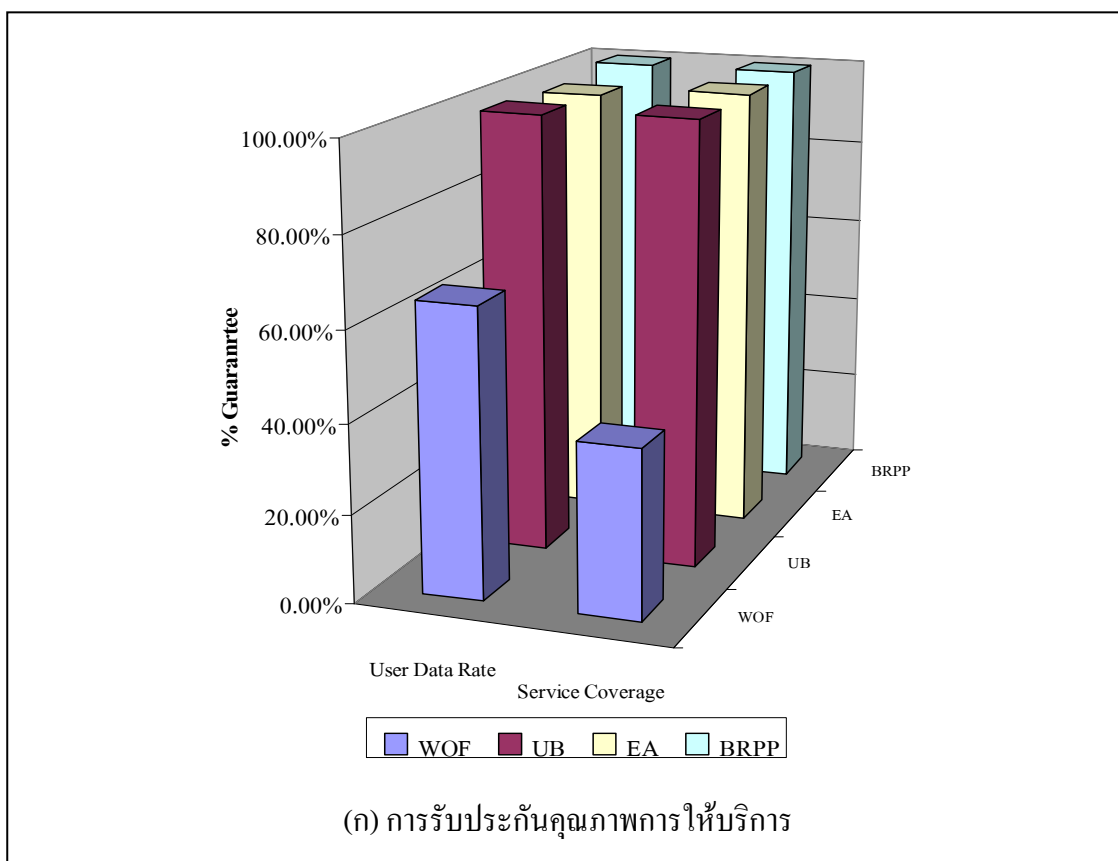
เมื่อเปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายพบว่า วิธีวางแผนเครือข่ายที่ประหยัดและให้การรับประกันคุณภาพแก่ผู้ใช้งานสูงที่สุดคือการนำการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีจากหัวข้อ 3.6.1.1 (BRPP model) เนื่องจากมีเงื่อนไขที่บังคับให้ผู้ใช้งานต้องได้รับสัญญาณครอบคลุมและรับประกันอัตราเร็วทางกายภาพที่มีประสิทธิภาพ ส่วนการวางแผนเครือข่ายแบบกำหนดเอง (EA และ UB method) สามารถให้ผลดีใกล้เคียงกับการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี แต่งบประมาณในการติดตั้งอุปกรณ์สูงกว่า และยังไม่สามารถรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่พื้นที่ให้บริการทั้งหมด ดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 การเปรียบเทียบผลการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ในพื้นที่จริง

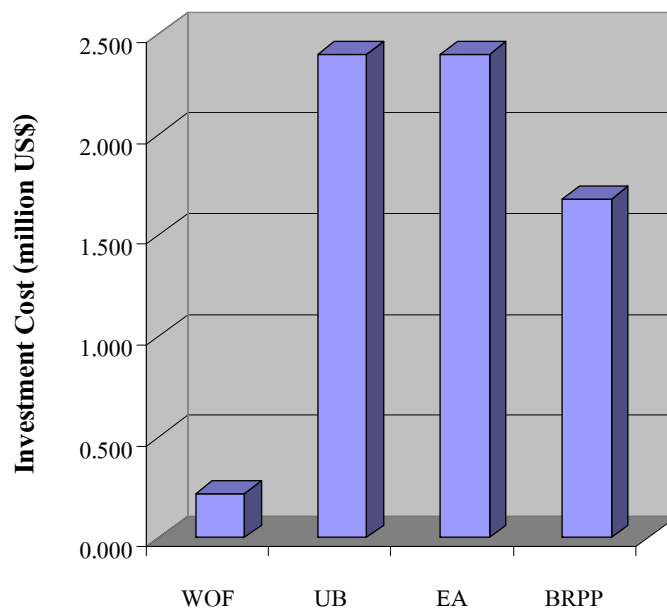
พารามิเตอร์	WOF	BRPP	EA	UB
งบประมาณในการลงทุน (10^6 \$)	0.22	1.68	2.40	2.40
จำนวนสถานีฐานที่ใช้	1	10	20	20
จำนวนสถานีถ่ายทอดที่ใช้	2	10	0	0

ตารางที่ 3.7 พารามิเตอร์ที่เป็นผลลัพธ์จากการออกแบบในพื้นที่จริง (ต่อ)

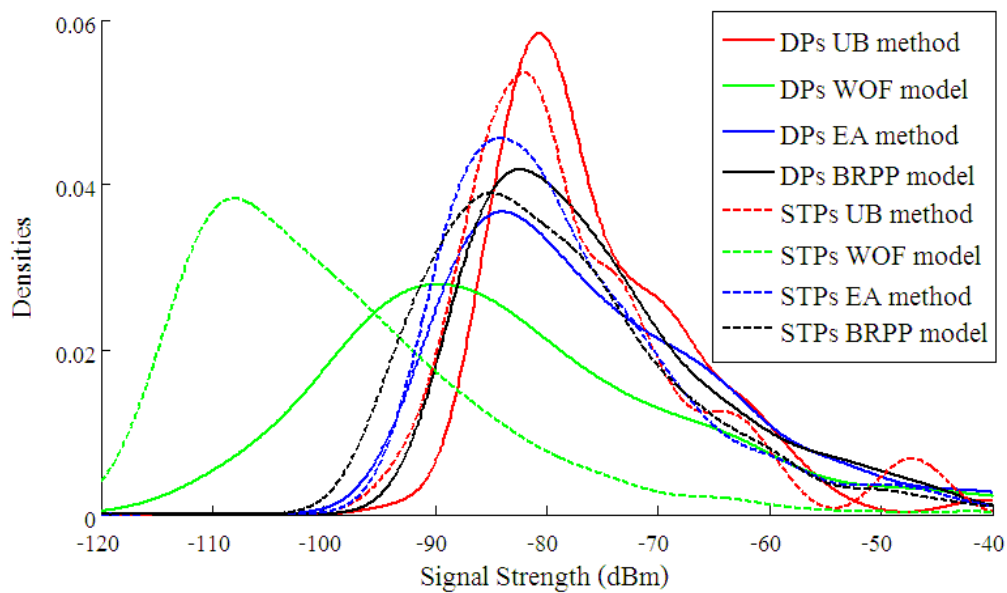
พารามิเตอร์	WOF	BRPP	EA	UB
จำนวน DPs ที่เครือข่ายรองรับ	134	207	204	206
จำนวน STPs ที่เครือข่ายรองรับ	289	770	770	770
การรับประกันการให้บริการ อัตราเร็วทางกายภาพ	65%	100%	98.5%	99.5%
การรับประกันการสัญญาณครอบคลุม	38%	100%	100%	100%



รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่ให้บริการจริง



(ข) งบประมาณในการลงทุน



(ค) ความหนาแน่นของความแรงสัญญาณที่รับได้จากเครือข่าย

รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่ให้บริการจริง (ต่อ)

3.8 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการวางแผนเครือข่ายในส่วนไร้สายของเครือข่ายไวแมกซ์โดยหาตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด และกำหนดตำแหน่งสำหรับรับประกันความแรงสัญญาณออกเป็นสองระดับคือ ตำแหน่งที่รับประกันคุณภาพการให้บริการ (DPs) และตำแหน่งที่รับประกันสัญญาณครอบคลุม (STPs) โดยจุดประสงค์ของการวางแผนเครือข่ายคือพยายามลดมูลค่าในการติดตั้งเครือข่ายให้เหลือน้อยที่สุด และรับประกันความแรงสัญญาณให้กับตำแหน่งรับประกันคุณภาพการให้บริการ (DPs และ STPs) ทั่วพื้นที่ให้บริการ สำหรับการทดลองได้ทำการกำหนดข้อมูลตั้งต้นด้วยการสุ่มอย่างมีแบบแผน (Uniform Random) และวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีที่แตกต่างกันสี่แบบคือ ใช้สมการคณิตศาสตร์การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ไบนารีที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อลดงบประมาณการลงทุน ใช้สมการคณิตศาสตร์การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ไบนารีที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อลดงบประมาณการลงทุนพร้อมกับลดกำลังส่งจากเครือข่าย การกำหนดตำแหน่งสถานีฐานให้กระจายตัวเท่าๆ กัน และ การคาดคะเนที่ตั้งสถานีฐาน ซึ่งจากการเปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายทั้งสามแบบนี้ วิธีที่ใช้สมการคณิตศาสตร์การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ไบนารีให้ผลการวางแผนที่ตรงกับวัตถุประสงค์ที่สุด และได้นำสมการคณิตศาสตร์การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็ม ไบนารีทำการวางทดลองแผนเครือข่ายในพื้นที่ให้บริการจริงซึ่งสามารถวางแผนเครือข่ายได้ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้

บทที่ 4

เทคนิคการหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีสถานและสถานีถ่ายทอด สำหรับเครือข่ายไวแมกซ์เพื่อการให้บริการอย่างมีประสิทธิภาพ ภายใต้งบประมาณจำกัด

4.1 กล่าวนำ

ในการวางแผนเครือข่ายนั้น งบประมาณเป็นสิ่งสำคัญที่ผู้ให้บริการเครือข่ายต้องพิจารณา สำหรับการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีงบประมาณสำหรับลงทุนติดตั้งเครือข่ายจำกัด ผู้วางแผนเครือข่ายต้องทำการวางแผนเครือข่ายอย่างรอบคอบเพื่อให้งบประมาณที่ลงทุนติดตั้งเครือข่ายคุ้มค่าที่สุด การวางแผนเครือข่ายอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อให้เครือข่ายสามารถรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้ ทั้งในด้านการรับประกันสัญญาณครอบคลุม และการรับประกันอัตราเร็วในการให้บริการภายใต้งบประมาณที่จำกัดจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับผู้ให้บริการเครือข่าย เพื่อให้งบประมาณที่ลงทุนไปคุ้มค่าที่สุด และนำกำไรกลับมาสู่ผู้ให้บริการเครือข่ายมากที่สุด

สำหรับเนื้อหาในบทนี้ได้้นำการโปรแกรมเชิงเส้นซึ่งเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ถูกพิสูจน์จนเป็นที่ยอมรับถึงประโยชน์และการประยุกต์ใช้กับปัญหาต่างๆ เพื่อช่วยในการตัดสินใจหาคำตอบที่ดีที่สุด มาประยุกต์ใช้กับปัญหาเช่นเดียวกับบทที่ 3 โดยพยายามหาตำแหน่งติดตั้งสถานีสถานและสถานีถ่ายทอดให้สามารถรับประกันอัตราเร็วในการให้บริการและสัญญาณครอบคลุมมากที่สุด ภายใต้งบประมาณที่จำกัด

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวโดยละเอียดถึงเทคนิคการวิเคราะห์สมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (0-1 Integer Programming) โดยแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยดังนี้ หัวข้อ 4.2 กล่าวถึงการนิยามปัญหาของการสร้างสมการคณิตศาสตร์โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มในการออกแบบเครือข่ายไวแมกซ์ตามจุดประสงค์ของบทนี้ หัวข้อ 4.3 กล่าวถึงสมการที่ใช้ในการวางแผนเครือข่ายรวมถึงปัจจัยต่าง ๆ และตัวอย่างที่นำมาพิจารณา หัวข้อ 4.4 ได้กล่าวถึงการตั้งปัญหาเพื่อเป็นข้อมูลตั้งต้นสำหรับการทดลอง หัวข้อ 4.5 เป็นการแสดงการประมวลผลเพื่อหาคำตอบของสมการคณิตศาสตร์ที่ได้สร้างขึ้น หัวข้อ 4.6 เป็นการนำสมการที่ได้ไปใช้ในการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริง และ หัวข้อ 4.7 เป็นหัวข้อสรุปเนื้อหาที่ได้กล่าวในบทนี้

4.2 การนิยามปัญหา

เนื้อหาวิทยานิพนธ์ในบทนี้มีวัตถุประสงค์ต่างจากบทที่ 3 คือต้องการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ในส่วนไร้สาย เพื่อเพิ่มการรับประกันคุณภาพการให้บริการให้แก่ผู้ใช้งานจำนวนมากที่สุดภายใต้งบประมาณการลงทุนที่จำกัด โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (0-1 Integer Programming) เลือกติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดเพื่อให้บริการไวแมกซ์ โดยพยายามเพิ่มการรับประกันสัญญาณและอัตราเร็วในการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน

ในการเลือกติดตั้งสถานีฐาน (Base Station : BSs) และสถานีถ่ายทอด (Relay Station : RSs) นั้น ตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีฐาน (Candidate Base Station) และตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีถ่ายทอด (Candidate Relay Station) ถูกกำหนดขึ้นในพื้นที่ที่ต้องการวางแผนเครือข่าย ในการกำหนดนั้นได้พิจารณาความเป็นไปได้ในการติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด เช่น ความยากง่ายในการเชื่อมระบบไฟฟ้ากำลังและระบบส่งสัญญาณ (Transmission Systems) ระหว่างสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดเข้ากับเครือข่ายหลัก (Core Network) นอกจากนั้นยังพิจารณาถึงระยะเวลาสำหรับเจ้าหน้าที่ผู้ดูแลเครือข่ายในการเข้าถึงอุปกรณ์เมื่อเกิดปัญหา หรืออาจพิจารณาจากสถานที่ที่มีโครงสร้างพื้นฐานอยู่แล้วทำให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้ง่ายและรวดเร็ว เช่น สถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือสถานีวิทยุที่มีเสาสูงสำหรับส่งสัญญาณ ตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งเหล่านี้จะถูกนำเข้ากระบวนการคัดเลือกเพื่อใช้เป็นที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด เมื่อผ่านกระบวนการคัดเลือกแล้ว จะได้จำนวนของสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดที่สามารถรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้ที่อยู่ในพื้นที่ให้บริการได้มากที่สุดภายใต้งบประมาณในการติดตั้งเครือข่ายที่จำกัด

สำหรับการรับประกันคุณภาพแก่ผู้ใช้บริการที่เข้ามาใช้บริการภายใต้เครือข่ายไวแมกซ์นั้น การวางแผนเครือข่ายได้พยายามให้ผู้ใช้บริการได้รับการประกันทั้งคุณภาพสัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการ และคุณภาพการให้บริการในตำแหน่งที่ถูกค่าส่วนใหญ่ใช้งานเป็นประจำให้มากที่สุดเท่าที่งบประมาณการลงทุนติดตั้งเครือข่ายจะอำนวย โดยการรับประกันสัญญาณครอบคลุมนั้นได้กำหนดจุดรับประกันสัญญาณครอบคลุม (Signal Test Points : STPs) ให้เป็นตำแหน่งที่ต้องได้รับสัญญาณจากเครือข่ายพอที่จะทำการเข้าใช้งานเครือข่ายได้ ตำแหน่งเหล่านี้ถูกกำหนดให้กระจายตัวในรูปแบบตาราง ทั่วพื้นที่ให้บริการเพื่อรับประกันว่าในเครือข่ายที่ออกแบบนั้น ได้รับประกันความแรงสัญญาณให้ผู้ใช้บริการสามารถเข้าถึงเครือข่ายไม่ว่าผู้ใช้บริการนั้นจะอยู่ตำแหน่งใด ๆ ในพื้นที่ให้บริการ ส่วนสถานที่ใด ๆ ก็ตามในพื้นที่ให้บริการที่มีผู้ใช้บริการอยู่จำนวนมาก เช่น สถานีราชการ สถานศึกษา แหล่งท่องเที่ยว และที่พักอาศัย ได้ถูกกำหนดเป็นจุดรับประกันการให้บริการสำหรับผู้ใช้บริการ (Demand Points : DP) ซึ่งจุดรับประกันการให้บริการนี้ไม่เพียงรับประกันสัญญาณครอบคลุมถึง แต่ระดับสัญญาณยังต้องสูงเพียงพอสำหรับการเชื่อมต่อ

ด้วยความเร็วในการรับส่งข้อมูลทางกายภาพ (Physical Data Rate) ระหว่างผู้ใช้บริการกับเครือข่าย เพื่อการใช้งานอย่างราบรื่น โดยการวางแผนเครือข่ายได้พยายามให้ระดับสัญญาณเพียงพอสำหรับ จดรับประกันสัญญาณครอบคลุมและจดรับประกันการให้บริการ เพื่อรับประกันคุณภาพการ ให้บริการแก่ผู้ใช้บริการให้มากที่สุด

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้พิจารณาการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ในส่วนไร้สายโดยการ เลือกตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด ที่เชื่อมต่อแบบหลายช่วงเชื่อมต่อ (Multi-hops Relay Network) ที่มีการกำหนดตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด โดยวัตถุประสงค์ของออกแบบคือเพื่อคัดเลือกจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งของสถานีฐานและสถานี ถ่ายทอดเพื่อให้สามารถรับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้บริการได้มากที่สุด ภายใต้งบประมาณที่ จำกัด ในพื้นที่ให้บริการซึ่งได้ทำการกำหนดปัจจัยในการวางแผนเครือข่ายหลาย ๆ ส่วนที่ สอดคล้องกับอุปกรณ์และโครงสร้างพื้นฐานที่นำมาสร้างเครือข่ายไวแมกซ์ในวิทยานิพนธ์ ดังนี้

1. งบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่ายมีจำกัด
2. สถานีฐาน และสถานีถ่ายทอดมีคุณสมบัติในการให้บริการแก่ผู้ใช้บริการเท่ากัน
3. ช่วงเชื่อมต่อ (Hops) ระหว่างผู้ใช้บริการกับเครือข่ายมีไม่เกิน 2 ช่วง คือ ผู้ใช้บริการ แต่ละรายสามารถเชื่อมต่อกับสถานีฐานโดยตรง หรือสามารถเชื่อมต่อสถานีฐานโดยผ่านสถานี ถ่ายทอดได้ 1 สถานี
4. ต้นทุนในการติดตั้งทุกสถานีฐานมีมูลค่าเท่ากัน และต้นทุนในการติดตั้งทุกสถานี ถ่ายทอดมีมูลค่าเท่ากัน
5. แต่ละสถานีฐานมีความสามารถเพียงพอในการรองรับทุกสถานีถ่ายทอดรวมถึง ผู้ใช้บริการทุกรายในพื้นที่ครอบคลุมของแต่ละสถานีฐานได้
6. แต่ละสถานีถ่ายทอดมีความสามารถเพียงพอในการรองรับผู้ใช้บริการทุกรายในพื้นที่ ครอบคลุมของแต่ละสถานีถ่ายทอดได้

4.3 สมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีสำหรับวางแผนเครือข่าย

ในหัวข้อนี้จะทำการนำเสนอขั้นตอนการวิเคราะห์ปัญหาเพื่อสร้างสมการคณิตศาสตร์แบบ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (0-1 Integer Programming) โดยแยกพิจารณาตามโครงสร้าง ของระเบียบวิธีโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี คือตัวแปรตัดสินใจ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และ เงื่อนไข

กระบวนการแก้ไขปัญหการออกแบบด้วยการใช้โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มแบบไบนารี ที่ใช้ในการแก้ไขปัญหของการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ โดยพิจารณาหาจำนวนและตำแหน่งที่ตั้ง สถานีฐานและสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสมที่สุดภายใต้งบประมาณจำกัด โดยเลือกจากตำแหน่งที่ตั้งที่

เป็นไปได้ทั้งหมด เพื่อรับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้บริการให้มากที่สุด และนอกจากนี้สมการดังกล่าวยังได้ทำการเลือกสร้างการเชื่อมต่อระหว่างตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานกับสถานีถ่ายทอดและจุดรับประกันคุณภาพการให้บริการด้วย โดยผลลัพธ์จากการวางแผนเครือข่ายต้องอยู่ในเงื่อนไขทั้งหมดที่กำหนดไว้

การนิยามตัวแปร

เซต :	B	หมายถึงเซตของจุดที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีฐาน (BSs)
	R	หมายถึงเซตของจุดที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีถ่ายทอด (RSs)
	D	หมายถึงเซตของจุดที่รับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้ (DPs)
	T	หมายถึงเซตของจุดที่รับประกันการเข้าถึงเครือข่ายแก่ผู้ใช้ (STPs)
ค่าคงที่ :	C	หมายถึงมูลค่าในการลงทุนติดตั้งเครือข่ายทั้งหมด
	F_j	หมายถึงมูลค่าในการลงทุนติดตั้งสถานีฐาน $j, j \in B$
	E_i	หมายถึงมูลค่าในการลงทุนติดตั้งสถานีถ่ายทอด $i, i \in R$
	P_t	หมายถึงค่าความแรงสัญญาณที่น้อยที่สุดสำหรับการเชื่อมต่อ STPs
	P_d	หมายถึงค่าความแรงสัญญาณที่น้อยที่สุดสำหรับการเชื่อมต่อ DPs
	P_r	หมายถึงค่าความแรงสัญญาณขั้นต่ำสำหรับการเชื่อมต่อ RSs กับ BSs
	P_{hj}	หมายถึงค่าความแรงสัญญาณที่ STP h รับได้จาก BS $j, h \in T$ และ $j \in B$
	P_{hi}	หมายถึงค่าความแรงสัญญาณที่ STP h รับได้จาก RS $i, h \in T$ และ $i \in R$
	P_{gj}	หมายถึงค่าความแรงสัญญาณที่ DP g รับได้จาก BS $j, g \in D$ และ $j \in B$
	P_{gi}	หมายถึงค่าความแรงสัญญาณที่ DP g รับได้จาก RS $i, g \in D$ และ $i \in R$
	P_{ij}	หมายถึงค่าความแรงสัญญาณที่ RS i รับได้จาก BS $j, i \in R$ และ $j \in B$

ตัวแปรตัดสินใจ :	β_j	เป็นตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ในกรณีที่ $\beta_j = 1$ หมายถึงสถานีฐานถูกติดตั้งที่จุด j เมื่อ $j \in B$ และ $\beta_j = 0$ หมายถึงสถานีฐานไม่ได้ถูกติดตั้งที่จุด j
	γ_i	เป็นตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ในกรณีที่ $\gamma_i = 1$ หมายถึงสถานีถ่ายทอดถูกติดตั้งที่จุด i เมื่อ $i \in R$ และ $\gamma_i = 0$ หมายถึงสถานีถ่ายทอดไม่ได้ถูกติดตั้งที่จุด i
	u_{hj}	เป็นตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ในกรณีที่ $u_{hj} = 1$ หมายถึง STP ที่ h ทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐาน j โดยที่ $h \in T$ และ $j \in B$ และ $u_{hj} = 0$ หมายถึง STP ที่ h ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐาน j

- v_{hi} เป็นตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ในกรณีที่ $v_{hi} = 1$ หมายถึง STP ที่ h ทำการเชื่อมต่อกับสถานีถ่ายทอด i โดยที่ $h \in T$ และ $i \in R$ และ $v_{hi} = 0$ หมายถึง STP ที่ h ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อกับสถานีถ่ายทอด i
- x_{gj} เป็นตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ในกรณีที่ $x_{gj} = 1$ หมายถึง DP ที่ g ทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐาน j โดยที่ $g \in D$ และ $j \in B$ และ $x_{gj} = 0$ หมายถึง DP ที่ g ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐาน j
- y_{gi} เป็นตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ในกรณีที่ $y_{gi} = 1$ หมายถึง DP ที่ g ทำการเชื่อมต่อกับสถานีถ่ายทอด i โดยที่ $g \in D$ และ $i \in R$ และ $y_{gi} = 0$ หมายถึง DP ที่ g ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อกับสถานีถ่ายทอด i
- w_{ij} เป็นตัวแปรไบนารี $\{0, 1\}$ ในกรณีที่ $w_{ij} = 1$ หมายถึงสถานีถ่ายทอด i ทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐาน j โดยที่ $i \in R$ และ $j \in B$ และ $w_{ij} = 0$ หมายถึงสถานีถ่ายทอด i ไม่ได้ทำการเชื่อมต่อกับสถานีฐาน j

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการวางแผนเครือข่ายสำหรับสมการคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี:

$$\text{Maximize } \sum_{h=1}^t (u_{hj} + v_{hi}) + \sum_{g=1}^d (x_{gj} + y_{gi}) \quad (4.1)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์จากสมการ (4.1) หมายถึงการพยายามเพิ่มตำแหน่งสำหรับรับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน ซึ่งประกอบไปด้วยตำแหน่งรับประกันสัญญาณครอบคลุม (STPs) และตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) แต่การพยายามเพิ่มตำแหน่งสำหรับรับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้งานนั้นยังต้องผ่านเงื่อนไขสำหรับการให้บริการทั้งเงื่อนไขด้านงบประมาณและเงื่อนไขด้านเกณฑ์ความแรงของสัญญาณในการเชื่อมต่อซึ่งจะได้อธิบายต่อไป

สมการเงื่อนไขในการออกแบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีถูกแบ่งออกเป็นสี่กลุ่มคือ เงื่อนไขสำหรับการจำกัดงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่าย เงื่อนไขสำหรับการรับประกันสัญญาณครอบคลุมในพื้นที่ให้บริการ เงื่อนไขสำหรับการรับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน และเงื่อนไขการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐาน ซึ่งผลลัพธ์จากการออกแบบต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ทั้งหมด

1. เงื่อนไขสำหรับการจำกัดงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่าย

$$\sum_{j=1}^b F_j \beta_j + \sum_{i=1}^r E_i \gamma_i \leq C \quad , j \in B, i \in R \quad (4.2)$$

สมการเงื่อนไขสำหรับการจำกัดงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่าย (4.2) หมายถึง ผลรวมของงบประมาณในการติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดต้องน้อยกว่าหรือพอดีกับงบประมาณที่ตั้งไว้

2. เงื่อนไขสำหรับการรับประกันสัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการ

$$\sum_{j=1}^b u_{hj} + \sum_{i=1}^r v_{hi} \leq 1 \quad , \forall h \in T \quad (4.3)$$

$$u_{hj} \leq \beta_j \quad , \forall h \in T, j \in B \quad (4.4)$$

$$v_{hi} \leq \gamma_i \quad , \forall h \in T, i \in R \quad (4.5)$$

$$u_{hj}(P_{hj} - P_d) \geq 0 \quad , \forall h \in T, j \in B \quad (4.6)$$

$$v_{hi}(P_{hi} - P_d) \geq 0 \quad , \forall h \in T, i \in R \quad (4.7)$$

เซตของสมการเงื่อนไขสำหรับการรับประกันสัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการข้างต้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ สมการที่ (4.3) แสดงการรับประกันว่าแต่ละตำแหน่งรับประกันสัญญาณครอบคลุม (STPs) สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายโดยการรับสัญญาณจากสถานีฐาน โดยตรงหรือว่ารับสัญญาณจากเครือข่ายผ่านสถานีถ่ายทอด ซึ่งแต่ละการเชื่อมต่อไปยังเครือข่าย จะถูกนำไปรวมในพจน์ของสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับคำนวณหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถรับประกันพื้นที่ให้บริการแก่ผู้ใช้งานได้จำนวนมากที่สุด สมการที่ (4.4) แสดงการรับประกันว่า สถานีฐานที่ทำการเชื่อมต่อกับตำแหน่งรับประกันสัญญาณครอบคลุม (STPs) ต้องเป็นสถานีฐานที่ถูกติดตั้งเท่านั้น สมการที่ (4.5) แสดงการรับประกันว่า

สถานีถ่ายทอดที่ทำการเชื่อมต่อกับตำแหน่งรับประกันสัญญาณครอบคลุม (STPs) ต้องเป็นสถานีถ่ายทอดที่ถูกติดตั้งเท่านั้น สมการที่ (4.6) แสดงการรับประกันว่า สถานีฐานจะทำการเชื่อมต่อกับตำแหน่งรับประกันสัญญาณครอบคลุม (STPs) ได้นั้นระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสถานีฐานต้องมีย่านมากกว่าค่าระดับสัญญาณขั้นต่ำที่กำหนดไว้สำหรับการเชื่อมต่อ และสมการที่ (4.7) แสดงการรับประกันว่า สถานีถ่ายทอดจะทำการเชื่อมต่อกับตำแหน่งรับประกันสัญญาณครอบคลุม (STPs) ได้นั้นระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสถานีถ่ายทอดต้องมีย่านมากกว่าค่าระดับสัญญาณขั้นต่ำที่กำหนดไว้สำหรับการเชื่อมต่อ

3. เงื่อนไขสำหรับการรับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน

$$\sum_{j=1}^b x_{gj} + \sum_{i=1}^r y_{gi} \leq 1, \forall g \in D \quad (4.8)$$

$$x_{gj} \leq \beta_j, \forall g \in D, j \in B \quad (4.9)$$

$$y_{gi} \leq \gamma_i, \forall g \in D, i \in R \quad (4.10)$$

$$x_{gj}(P_{gj} - P_t) \geq 0, \forall g \in D, j \in B \quad (4.11)$$

$$y_{gi}(P_{gi} - P_t) \geq 0, \forall g \in D, i \in R \quad (4.12)$$

เซตของสมการเงื่อนไขสำหรับการรับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้งานข้างต้นสามารถอธิบายได้ดังนี้ สมการที่ (4.8) แสดงการรับประกันว่า แต่ละตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่ายโดยการรับสัญญาณจากสถานีฐาน โดยตรงหรือว่ารับสัญญาณจากเครือข่ายผ่านสถานีถ่ายทอด ซึ่งแต่ละการเชื่อมต่อไปยังเครือข่ายจะถูกนำไปรวมในพจน์ของสมการฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อคำนวณหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสม เพื่อให้เครือข่ายที่วางแผนนั้นสามารถรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้งานได้เป็นจำนวนมากที่สุด สมการที่ (4.9) แสดงการรับประกันว่า สถานีฐานที่ทำการเชื่อมต่อกับตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) ต้องเป็นสถานีฐานที่ถูกติดตั้งเท่านั้น สมการที่ (4.10) แสดงการรับประกันว่า สถานีถ่ายทอดที่ทำการเชื่อมต่อต้องเป็นสถานีที่ถูกติดตั้งเท่านั้น สมการที่ (4.11)

แสดงการรับประกันว่า สถานีฐานจะทำการเชื่อมต่อกับตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) ได้นั้นระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสถานีฐานต้องมามีค่ามากกว่าค่าระดับสัญญาณขั้นต่ำที่กำหนดไว้สำหรับการเชื่อมต่อ และสมการที่ (4.12) แสดงการรับประกันว่า สถานีถ่ายทอด จะทำการเชื่อมต่อกับตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) ได้นั้นระดับความแรงของสัญญาณที่รับได้จากสถานีถ่ายทอดต้องมากกว่าเกณฑ์ที่กำหนดไว้สำหรับการเชื่อมต่อ

4. เงื่อนไขการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐาน

$$\sum_{j=1}^b w_{ij} = \gamma_i, \quad \forall i \in R \quad (4.13)$$

$$w_{ij} \leq \beta_j, \quad \forall i \in R, j \in B \quad (4.14)$$

$$w_{ij}(P_{ij} - P_r) \geq 0, \quad j \in B, i \in R \quad (4.15)$$

เซตของสมการเงื่อนไขสำหรับการเชื่อมต่อระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีฐานสามารถอธิบายได้ดังนี้ สมการที่ (4.13) แสดงการรับประกันว่าทุกๆ สถานีถ่ายทอดที่ติดตั้งนั้นต้องสามารถเชื่อมต่อกับสถานีฐาน เพื่อให้สถานีถ่ายทอดเป็นโหนดกลางระหว่างผู้ใช้บริการกับเครือข่ายได้ สมการที่ (4.14) แสดงการรับประกันว่า สถานีฐานที่ทำการเชื่อมต่อกับสถานีถ่ายทอด ต้องเป็นสถานีฐานที่ถูกติดตั้งเท่านั้น สมการที่ (4.15) แสดงการรับประกันว่า สถานีฐานจะทำการเชื่อมต่อกับสถานีถ่ายทอด ได้นั้นระดับความแรงของสัญญาณที่สถานีถ่ายทอดรับได้จากสถานีฐานต้องมามีค่ามากกว่าค่าระดับสัญญาณขั้นต่ำที่กำหนดไว้สำหรับการเชื่อมต่อ

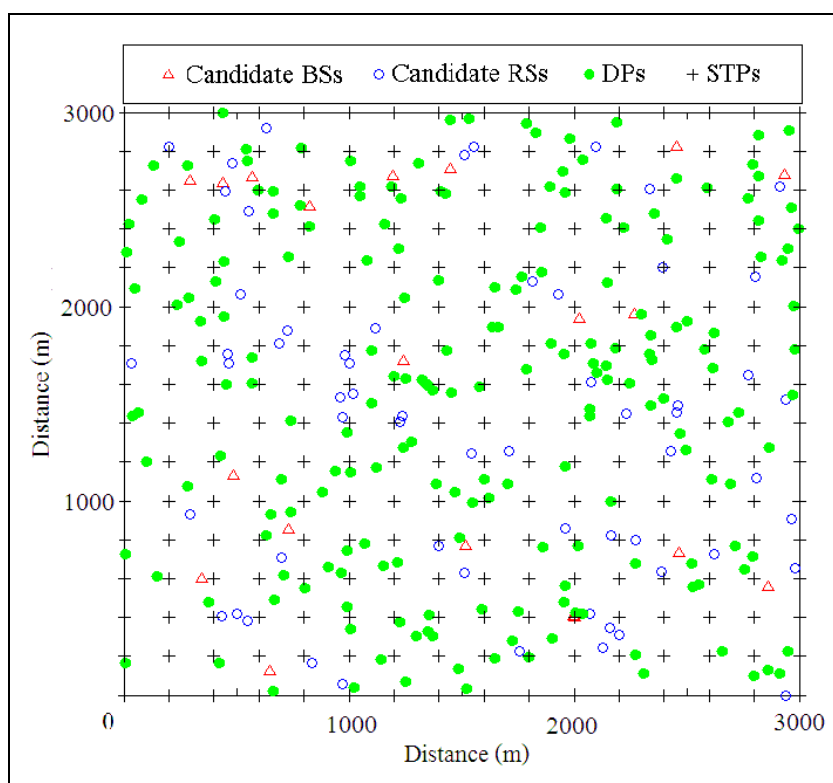
4.4 การตั้งปัญหาการทดลองหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด

ในหัวข้อที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงสมการทางคณิตศาสตร์ที่สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการวางแผนเครือข่ายโดยการหาจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด ภายใต้งบประมาณจำกัด ในส่วนของหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึงการตั้งปัญหาเพื่อนำสมการดังกล่าวมาทดสอบเพื่อหาคำตอบและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลอง

การทดลองในหัวข้อนี้ได้ทำการจำลองพื้นที่ที่เหมือนกับการทดลองในบทที่ 3 โดยมีพื้นที่ให้บริการขนาด 9 ตารางกิโลเมตร จำนวนของตำแหน่งที่เป็นไปได้สำหรับเลือกติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดคือ 20 และ 60 จุดตามลำดับ รวมถึงจุดที่รับประกันการบริการแก่ผู้ใช้งาน

ทั้งหมด 200 จุด ส่วนจุดที่รับประกันสัญญาณครอบคลุม 256 จุดกระจายตัวในรูปแบบตารางทั่วพื้นที่ให้บริการ ดังแสดงในรูปที่ 4.1

สำหรับการวางแผนเครือข่ายจากข้อมูลตั้งต้นในรูปที่ 4.1 ได้กำหนดพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการพยากรณ์ระดับสัญญาณที่ตำแหน่งรับประกันคุณภาพการให้บริการ (STPs และ DPs) ได้รับจากเครือข่ายเพื่อใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นสำหรับการวางแผนเครือข่ายในแบบต่าง ๆ และพารามิเตอร์อื่น ๆ ที่จำเป็นสำหรับสมการคณิตศาสตร์ในการหาคำตอบ ดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ข้อมูลตั้งต้นสำหรับการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์

ตารางที่ 4.1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองร่วมกับข้อมูลตั้งต้นสำหรับการคำนวณ

พารามิเตอร์	ค่า
ความสูงของเสาสัญญาณที่ติดตั้งสายอากาศของแต่ละ BSs และ RSs	60 m
ความสูงสายอากาศของอุปกรณ์ผู้ใช้งาน	2 m
กำลังส่งจากแต่ละ BSs และ RSs	35 dBm
กำลังขยายในสายอากาศ ของแต่ละ BSs และ RSs	16 dBi

ตารางที่ 4.1 ค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองร่วมกับข้อมูลตั้งต้นสำหรับการคำนวณ (ต่อ)

พารามิเตอร์	ค่า
กำลังขยายในสายอากาศของอุปกรณ์ผู้ใช้งาน	2 dBi
ความถี่ของสัญญาณพาห้	2.5 GHz
ประเภทของลักษณะภูมิประเทศ (อ้างอิงจาก SUI model)	C
ความกว้างของช่องสัญญาณ	3.5 MHz
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับ DPs	12.71 Mbps
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับ STPs	5.64 Mbps
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 1 สถานีฐาน	120,000 \$
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 1 สถานีถ่ายทอด	48,000 \$

อัตราเร็วทางกายภาพระหว่างอุปกรณ์ของผู้ใช้งานกับสถานีฐานหรือสถานีถ่ายทอดของเครือข่ายไวมัคซ์นั้นแปรผันตามระดับสัญญาณที่อุปกรณ์ผู้ใช้งานสามารถรับได้และวิธีการมอดูเลต ดังนั้นอัตราเร็วทางกายภาพที่ตำแหน่งรับประกันคุณภาพการให้บริการ (STPs และ DPs) ต้องการตามตารางที่ 4.1 สามารถเทียบได้จากตารางที่ 3.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างวิธีการมอดูเลต อัตราเร็วทางกายภาพ และระดับสัญญาณขั้นต่ำที่อุปกรณ์ผู้ใช้งานควรรับได้

พารามิเตอร์และข้อมูลตั้งต้นในหัวข้อนี้ได้ถูกนำเข้าสู่กระบวนการวางแผนเครือข่ายในส่วนไร้สายของไวมัคซ์ร่วมกับสมการที่ (4.1) ถึงสมการที่ (4.15) เพื่อหาจำนวนและตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดด้วยวิธีการวางแผนเครือข่ายต่างกัน แล้วเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลการออกแบบ ซึ่งได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 4.5

4.5 การหาคำตอบสำหรับสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี

โปรแกรมประยุกต์ (Application Program) ที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดสำหรับการทดลองในบทนี้คือ ILOG OPL IDE เช่นเดียวกับการทดลองในบทที่ 3 สำหรับการแก้ปัญหาสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีนั้น ในโปรแกรม ILOG OPL IDE มีฟังก์ชันของการหาคำตอบด้วยวิธีซิมเพล็กซ์อัลกอริทึม (Simplex Algorithms) ซึ่งรับประกันว่าคำตอบที่ได้ เป็นคำตอบที่ดีที่สุด ดังนั้นจึงสามารถนำไปใช้ในการหาคำหนดตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดสำหรับเครือข่ายไวมัคซ์ได้

ตัวอย่างคำสั่งของโปรแกรม ILOG OPL IDE ที่แสดงในตารางที่ 4.2 เป็นการแปลงสมการคณิตศาสตร์จากหัวข้อที่ 4.3 เพื่อคำนวณหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการวางแผนเครือข่าย

ตารางที่ 4.2 แสดงการแปลงสมการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีเป็นคำสั่งในโปรแกรม

ILOG OPL IDE

สมการจากหัวข้อ 4.3	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
	Maximize
สมการ(4.1)	sum(h in TP) sum(j in BS) u[j][h]+ sum(h in TP) sum(j in RS) v[j][h] +sum(g in DP) sum(j in BS) x[j][g]+ sum(g in DP) sum(i in RS) y[i][g];
เงื่อนไข	subject to
สมการ(4.2)	ct1:{ sum(j in BS) B[j]*Cb+ sum(i in RS) r[i]*Cr <= C ;
สมการ(4.3)	ct2:forall (h in TP) sum(j in BS) u[j][h]+ sum(i in RS) v[i][h] >= 1;
สมการ(4.4)	ct3:forall (h in TP) forall (j in BS) u[j][h]<=B[j];
สมการ(4.5)	ct4:forall (h in TP) forall (i in RS) v[i][h]<=r[i];
สมการ(4.6)	ct5:forall (h in TP) forall (j in BS) u[j][h]*(m[j][h]-Ptp)>=0;
สมการ(4.7)	ct6:forall (h in TP) forall (i in RS) v[i][h]*(n[i][h]-Ptp)>=0;
สมการ(4.8)	ct7:forall (g in DP) sum(j in BS) x[j][g]+ sum(i in RS) y[i][g] >= 1;
สมการ(4.9)	ct8:forall (g in DP) forall (j in BS) x[j][g]<=B[j];
สมการ(4.10)	ct9:forall (g in DP) forall (i in RS) y[i][g]<=r[i];
สมการ(4.11)	ct10:forall (j in BS) forall (g in DP) x[j][g]*(o[j][g]-Pdp)>=0;
สมการ(4.12)	ct11:forall (i in RS) forall (g in DP) y[i][g]*(p[i][g]-Pdp)>=0;
สมการ(4.13)	ct12:forall (i in RS) sum (j in BS) w[j][i]==r[i];
สมการ(4.14)	ct13:forall (j in BS) forall (i in RS) w[j][i]<=B[j];
สมการ(4.15)	ct14:forall (j in BS) forall (i in RS) w[j][i]*(l[j][i]-Prs)>=0;}

4.6 การดำเนินการทดลองวางแผนเครือข่ายสำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานี

ถ่ายทอดภายใต้การจำกัดงบประมาณลงทุน

ในหัวข้อนี้ได้นำพารามิเตอร์และข้อมูลตั้งต้นสำหรับการทดลองวางแผนเครือข่ายจากหัวข้อที่ 4.4 มาทำการหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดโดยมีจุดประสงค์เพื่อรับประกันการให้บริการกับผู้ใช้งานให้ได้มากที่สุดภายใต้งบประมาณที่จำกัด ซึ่งได้กำหนดงบประมาณในการลงทุนไว้ต่างกัน แล้วนำผลการทดลองวางแผนเครือข่ายที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบผลในการจำกัดงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่ายที่มีต่อคุณภาพการให้บริการ

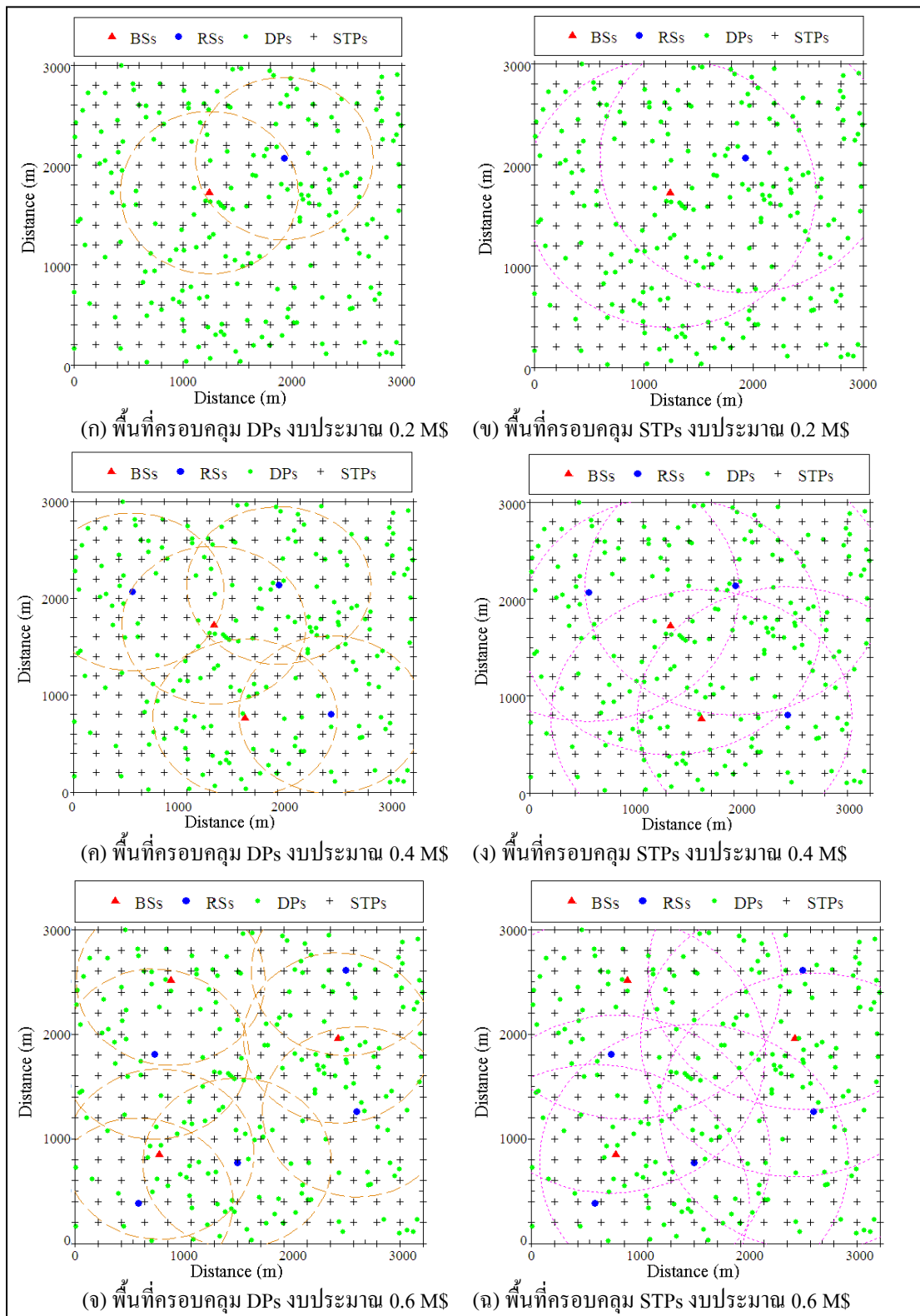
สำหรับสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรมประยุกต์ ILOG OPL IDE โดยมี CPLEX 5.2 optimization solver ซึ่งได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.5 เป็นเครื่องมือในการหาคำตอบ และใช้คอมพิวเตอร์รุ่น Intel Atom Processor 1.6 GHz ขนาด 1.5 GB RAM ในการประมวลผล ในส่วนของการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ โดยใช้วิธีกำหนดงบประมาณในการลงทุนไว้ 5 แบบคือ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 ล้านเหรียญสหรัฐ เพื่อสังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น ส่วนเครื่องมือที่ใช้ช่วยวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายคือ โปรแกรม MATLAB ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ง่ายมีประสิทธิภาพและนิยมอย่างแพร่หลาย

4.6.1 การทดลองวางแผนเครือข่ายสำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดโดยใช้

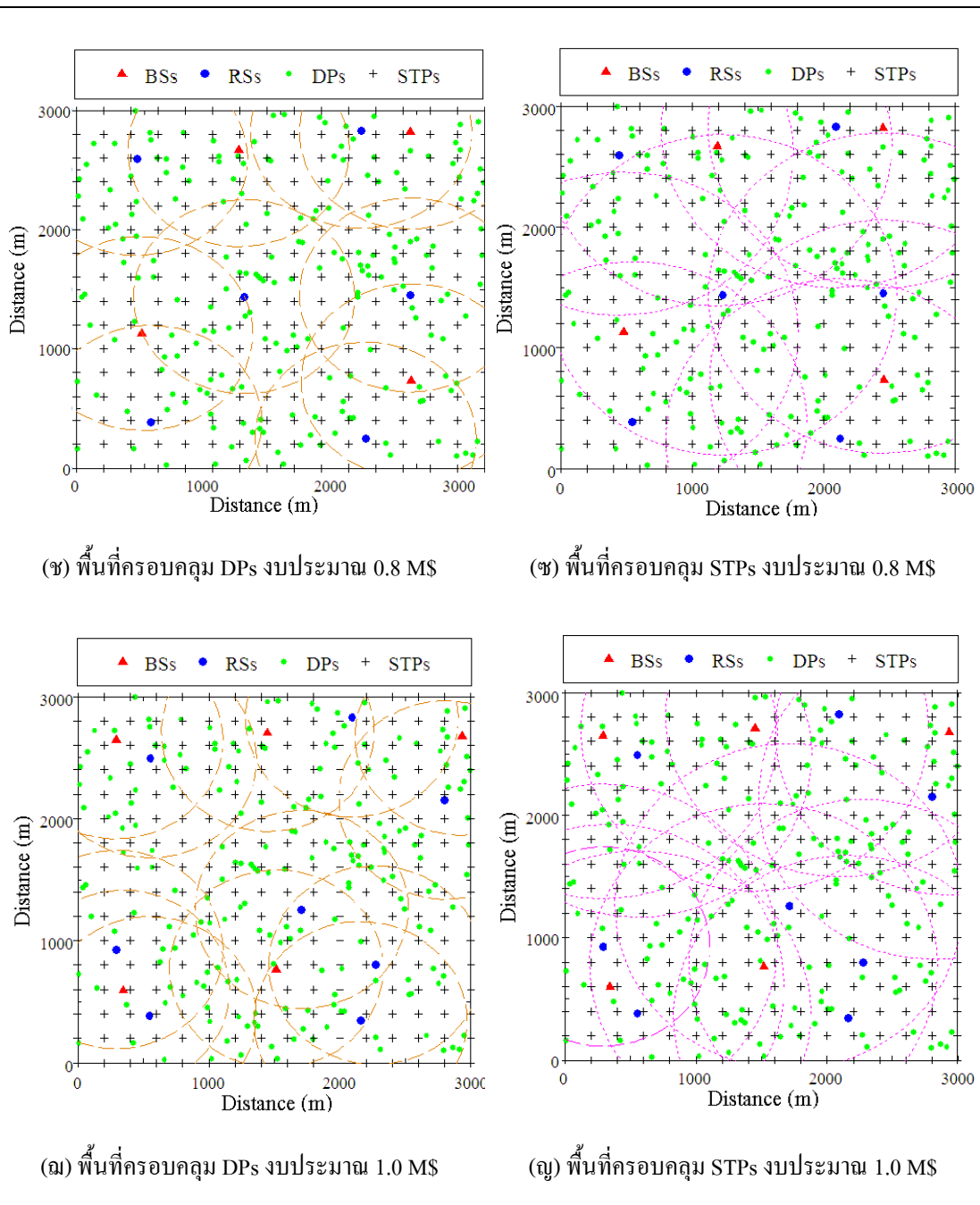
สมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีภายใต้งบประมาณที่จำกัด

สำหรับปัญหาการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มการรับประกันคุณภาพการให้บริการภายใต้งบประมาณจำกัดในหัวข้อนี้ถูกให้ชื่อว่า Maximize Quality of Service (MQoS model) การทดสอบหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดโดยใช้หลักการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีที่กล่าวในหัวข้อนี้ ได้ใช้โปรแกรมประยุกต์ ILOG OPL IDE โดยการเปลี่ยนสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทำการพิจารณา ให้เป็นคำสั่งทางคอมพิวเตอร์ที่จะนำไปประมวลผลเพื่อค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งได้นำข้อมูลตั้งต้นที่ได้กำหนดพิกัดของตำแหน่งต่าง ๆ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวางแผนเครือข่ายในหัวข้อที่ 4.4 ร่วมกับงบประมาณที่กำหนดไว้ต่างกัน 5 แบบ ได้ทำการวางแผนเครือข่ายโดยนำสมการจากหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งการทดลองและผลการทดลองได้อธิบายไว้ในหัวข้อต่อไป

และเมื่อนำผลการวางแผนเครือข่ายโดยใช้สมการคณิตศาสตร์แบบการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี ภายใต้การจำกัดงบประมาณการลงทุน 5 แบบคือ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 ล้านเหรียญสหรัฐ มาเปรียบเทียบกัน ซึ่งผลการวางแผนเครือข่ายในด้านของงบประมาณที่ใช้จริง จำนวนสถานีที่ติดตั้งรวมไปถึงความสามารถในการรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้งานได้แสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.2 ผลการวางแผนเครือข่ายด้วยสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี
เมื่อกำหนดงบประมาณในการลงทุนต่างกัน

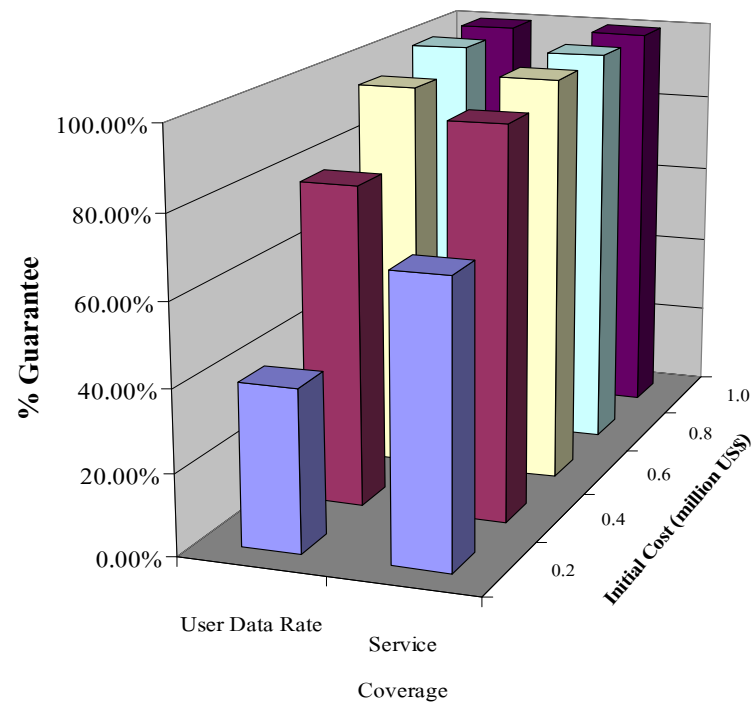


รูปที่ 4.2 ผลการวางแผนเครือข่ายด้วยสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี
เมื่อกำหนดงบประมาณในการลงทุนต่างกัน (ต่อ)

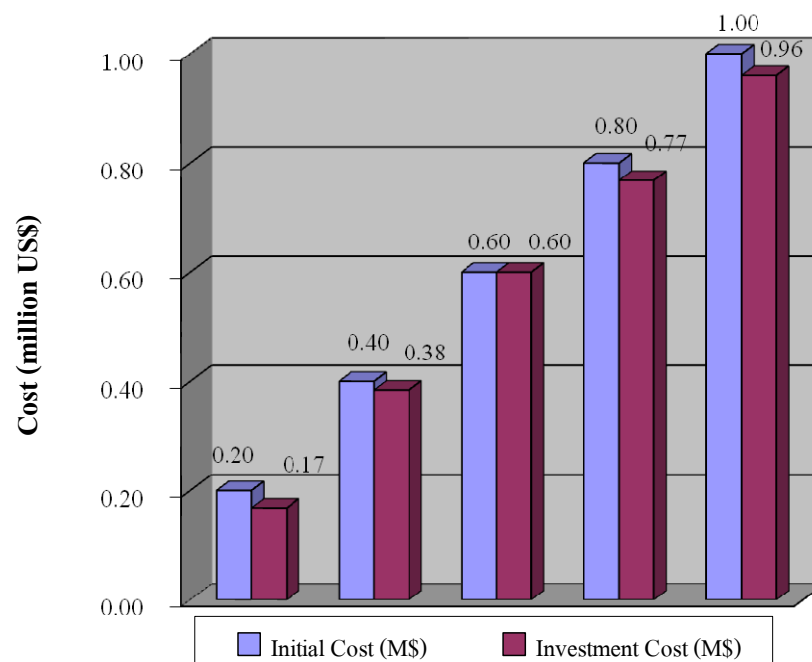
เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์โดยการจำกัดงบประมาณการลงทุนต่างกัน ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ความสามารถสำหรับรับประกันคุณภาพการให้บริการ ทั้งในด้านอัตราเร็วทางกายภาพ และสัญญาณครอบคลุมนั้น แปรผันตามงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่าย สำหรับมูลค่างบประมาณที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดคือ 0.768 ล้านเหรียญสหรัฐฯ โดยติดตั้งสถานีฐานจำนวน 4 สถานี และติดตั้งสถานีถ่ายทอดจำนวน 6 สถานีเพื่อรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้งานทั่วทั้งเครือข่าย ซึ่งตรงกับ การทดลองวางแผนเครือข่ายโดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อลดมูลค่าการลงทุน (Base Station and Relay Station Placement Problem : BRPP model) ในหัวข้อที่ 3.6.1.1 และเมื่อเทียบกับการวางแผนเครือข่ายโดยกำหนดงบประมาณในการลงทุนสูงกว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดซึ่งอัตราส่วนร้อยละของการรับประกันอัตราเร็วการให้บริการและสัญญาณครอบคลุมจะมีค่าสูงที่สุดอยู่แล้ว นั้นจะเห็นได้ว่าเป็นการสิ้นเปลืองงบประมาณ เนื่องจากผลการวางแผนเครือข่ายนั้นจะได้จำนวนสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดมากเกินไปจนจำเป็นสำหรับรับประกันคุณภาพการให้บริการได้ทั่วพื้นที่ให้บริการทั้งหมด

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ภายใต้งบประมาณจำกัดโดยใช้สมการคณิตศาสตร์การโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี

พารามิเตอร์	ค่า				
งบประมาณตั้งต้น (10^6 US\$)	0.200	0.400	0.600	0.800	1.000
งบลงทุนที่ใช้จริง (10^6 US\$)	0.168	0.384	0.600	0.768	0.960
จำนวนสถานีฐาน (BSs)	1	2	3	4	6
จำนวนสถานีถ่ายทอด (RSs)	1	3	5	6	5
จำนวน DP's ที่เครือข่ายรองรับ	79	157	191	200	200
จำนวน STPs ที่เครือข่ายรองรับ	176	244	255	256	256
การรับประกันอัตราเร็วทางกายภาพ	39.50%	78.50%	95.50%	100.00%	100.00%
การรับประกันการสัญญาณครอบคลุม	68.75%	95.31%	99.61%	100.00%	100.00%

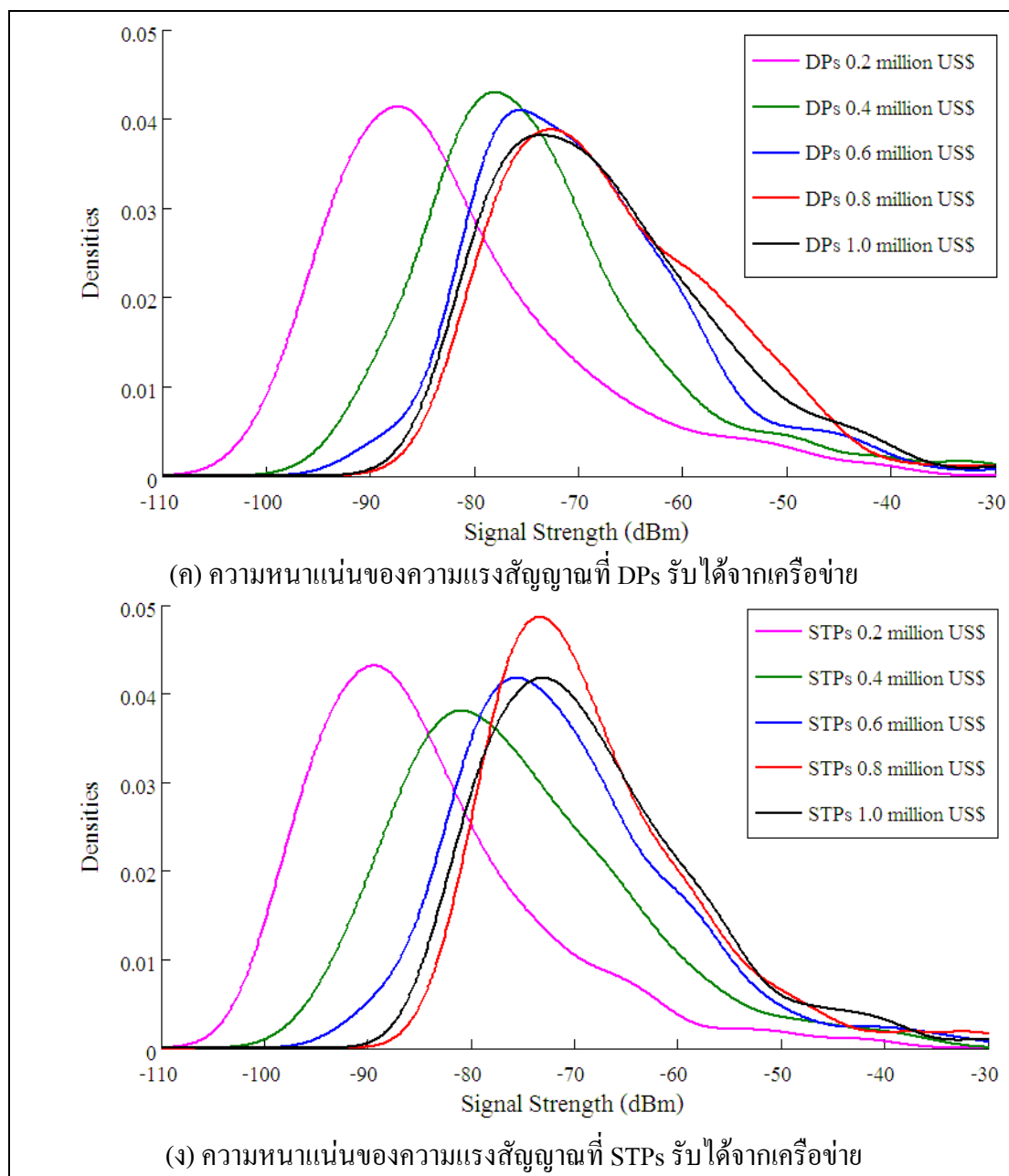


(ก) การรับประกันคุณภาพการให้บริการ



(ข) งบประมาณในการลงทุน

รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายด้วยสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี ภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน



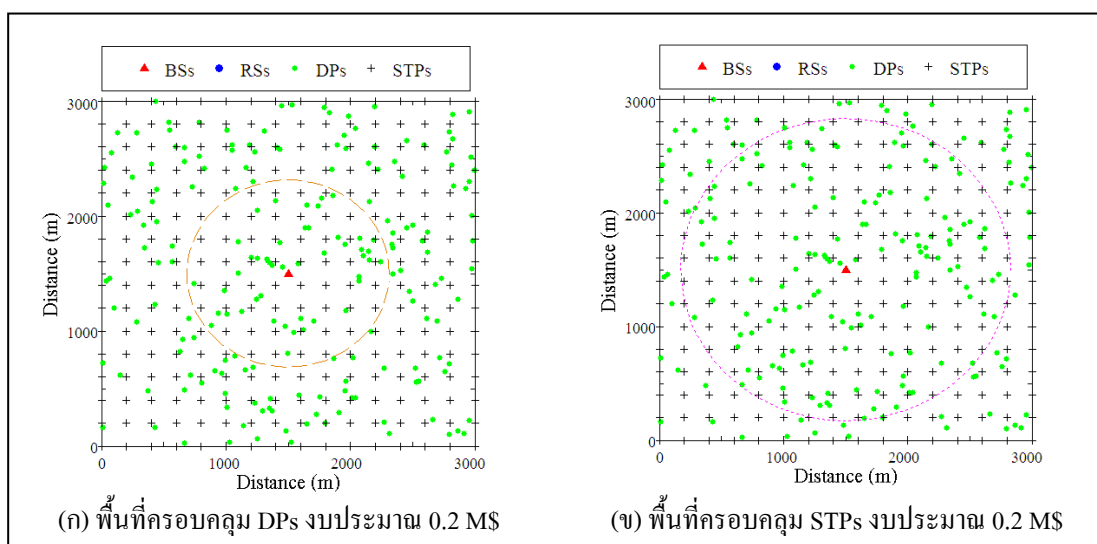
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายด้วยสมการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี ภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน (ต่อ)

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองสามารถแสดงได้ว่า ความสามารถในการรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้นั้น แปรผันตามงบประมาณการลงทุนดังรูปที่ 4.3 (ก) และสามารถรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้งานได้ทั่วพื้นที่ศึกษาเมื่อใช้งบประมาณลงทุนตั้งแต่ 0.8 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ ขึ้นไป ซึ่งผลจากการวางแผนเครือข่ายในห้วงนี้ไม่มีการใช้งบประมาณ

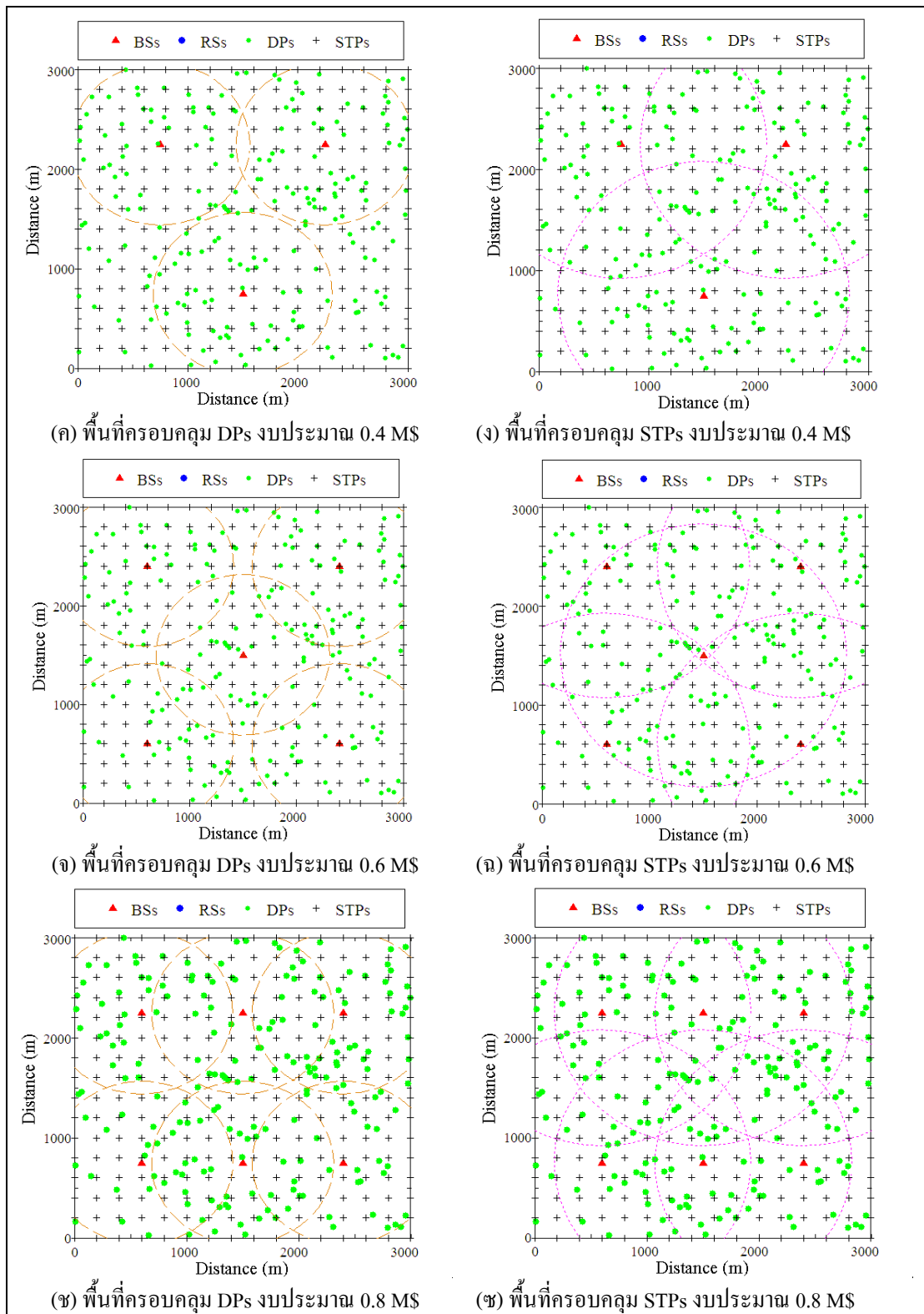
เกินกว่างบประมาณที่ตั้งไว้ดังรูปที่ 4.3 (ข) ส่วนในรูปที่ 4.3 (ค) และรูปที่ 4.3 (ง) แสดงให้เห็นถึงความหนาแน่นของความแรงสัญญาณที่ตำแหน่งรับประกันคุณภาพการให้บริการ (DPs และ STPs) รับได้จากเครือข่าย ซึ่งแปรผันตามงบประมาณการลงทุน และถ้างบประมาณในการลงทุนใกล้เคียงหรือมากกว่างบประมาณที่เหมาะสมที่สุดในการติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดในการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีทดลองวางแผนเครือข่ายโดยกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อลดมูลค่าการลงทุน (BRPP model) คืองบประมาณมูลค่า 0.768 ล้านบาทหรือ ๗๖๘ ล้านบาท ความหนาแน่นของความแรงสัญญาณมีค่าใกล้เคียงกัน

4.6.2 การทดลองวางแผนเครือข่ายโดยกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานให้กระจายตัวเท่ากันภายใต้งบประมาณที่จำกัด

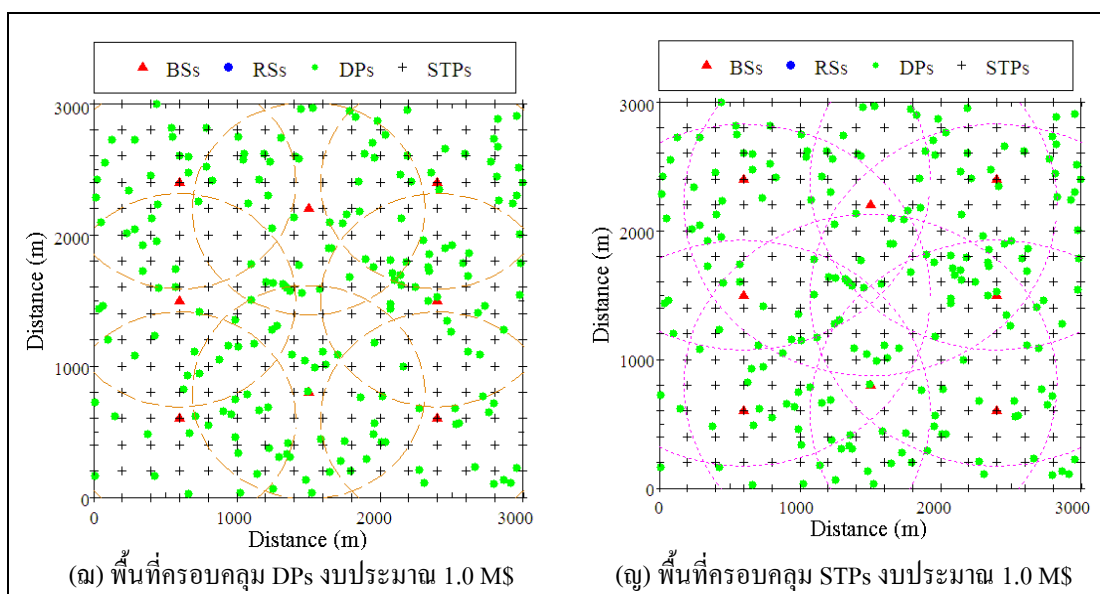
การทดลองวางแผนเครือข่ายโดยกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานแบบกระจายตัวเท่ากัน (Uniform Base Stations Method: UB method) เพื่อนำผลการทดลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองในหัวข้อ 4.6.1 จึงได้ใช้ข้อมูลตั้งต้นในส่วน of STPs และ DPs ชุดเดียวกัน งบประมาณตั้งต้นสำหรับลงทุนติดตั้งเครือข่าย ในหัวข้อนี้มีทั้งสิ้น 5 แบบ คือ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 ล้านบาท ซึ่งได้จำนวนสถานีฐานมาจากในแต่ละงบประมาณลงทุนคือ 1 3 5 6 และ 8 สถานีฐานตามลำดับ และใช้โปรแกรม MATLAB ในการคำนวณสัญญาณครอบคลุมตำแหน่งรับประกันคุณภาพการให้บริการ (DPs และ STPs) ของการทดลองแต่ละแบบ ซึ่งได้ผลต่างกันดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีการกำหนดสถานีฐานแบบกระจายตัวเท่ากัน
เมื่อใช้งบประมาณลงทุนต่างกัน



รูปที่ 4.4 ผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีการกำหนดสถานีฐานแบบกระจายตัวเท่ากัน
เมื่อใช้งบประมาณในต่างกัน (ต่อ)

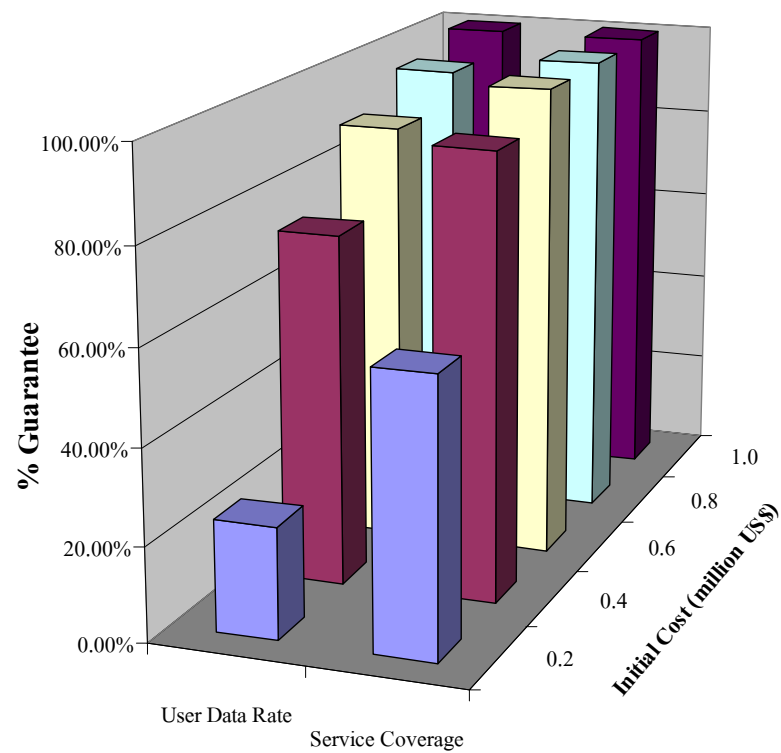


รูปที่ 4.4 ผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีการกำหนดสถานีฐานแบบกระจายตัวเท่ากัน
เมื่อใช้งบประมาณลงทุนต่างกัน (ต่อ)

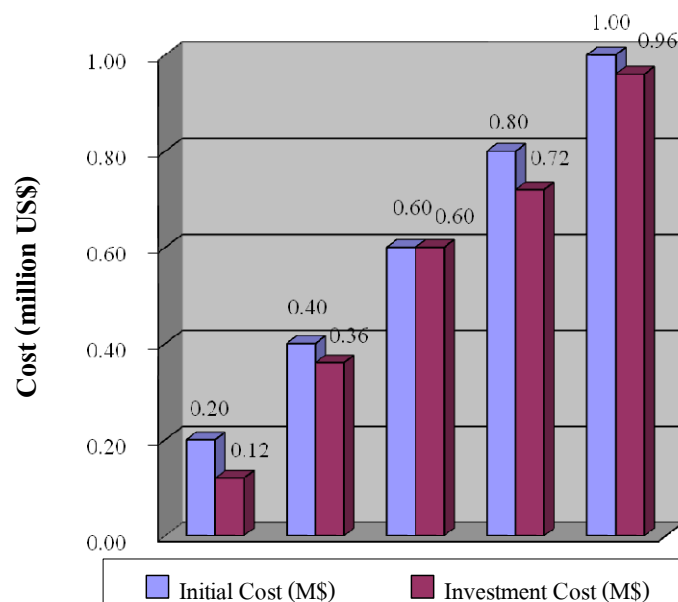
เมื่อนำผลการวางแผนเครือข่ายโดยใช้วิธีการกำหนดสถานีฐานแบบกระจายตัวเท่ากัน ภายใต้การจำกัดงบประมาณตั้งต้นในการลงทุน 5 แบบคือ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 ล้านดอลลาร์ มาเปรียบเทียบกับกัน ซึ่งผลการวางแผนเครือข่ายในด้านของงบประมาณที่ใช้จริง จำนวนสถานีที่ติดตั้ง

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์โดยวิธีกำหนดตำแหน่งที่ตั้ง
สถานีฐานกระจายตัวเท่ากันภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน

พารามิเตอร์	ค่า				
งบประมาณตั้งต้น (10^6 US\$)	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
งบลงทุนที่ใช้จริง (10^6 US\$)	0.120	0.360	0.600	0.720	0.960
จำนวนสถานีฐาน (BSs)	1	3	5	6	8
จำนวน DPs ที่เครือข่ายรองรับ	47	148	179	192	200
จำนวน STPs ที่เครือข่ายรองรับ	148	240	256	256	256
การรับประกันอัตราเร็วทางกายภาพ	23.50%	74.00%	89.50%	96.00%	100.00%
การรับประกันการสัญญาณครอบคลุม	57.81%	93.75%	100.00%	100.00%	100.00%

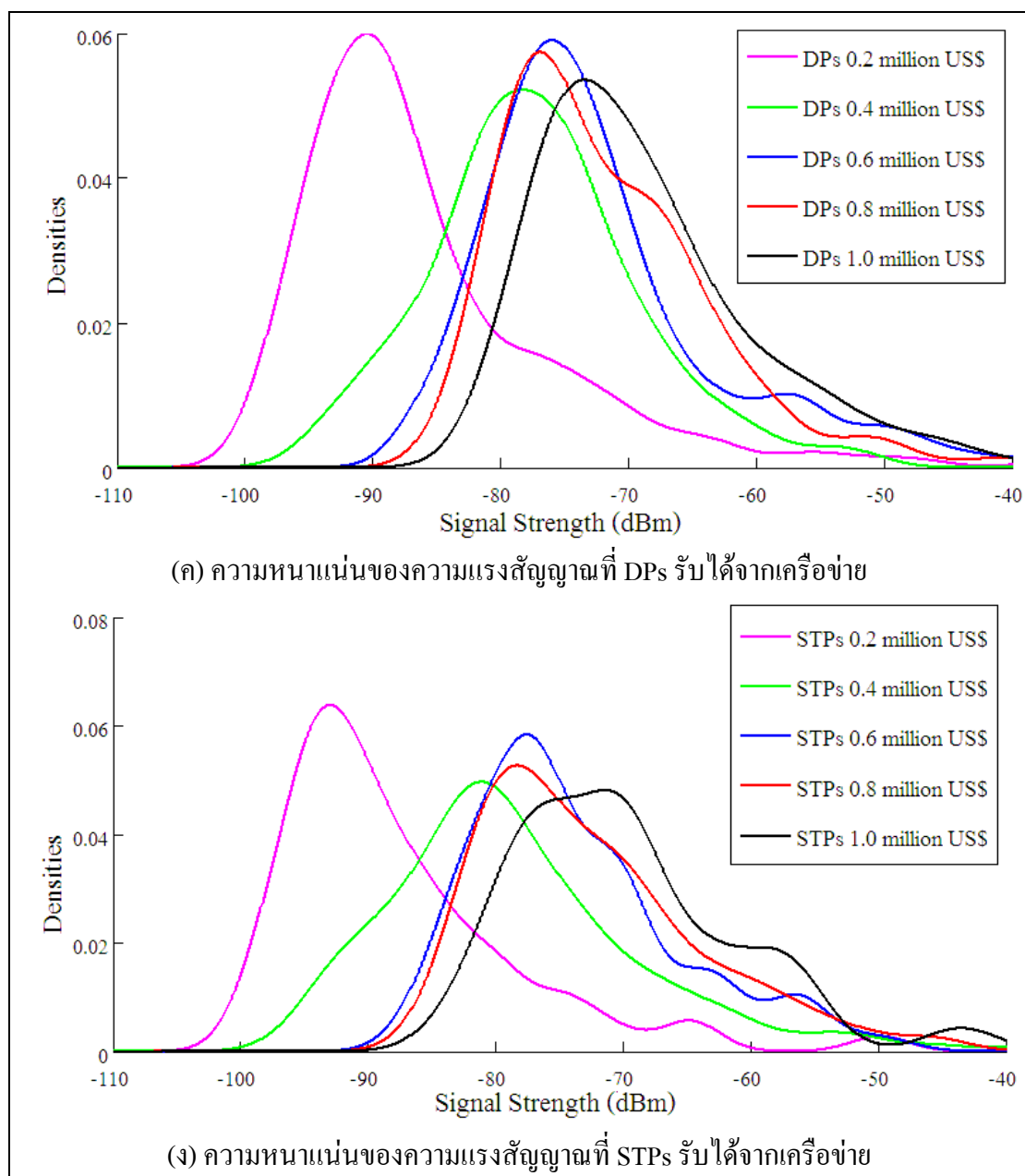


(ก) การรับประกันคุณภาพการให้บริการ



(ข) งบประมาณในการลงทุน

รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานให้กระจายตัวเท่ากันภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน



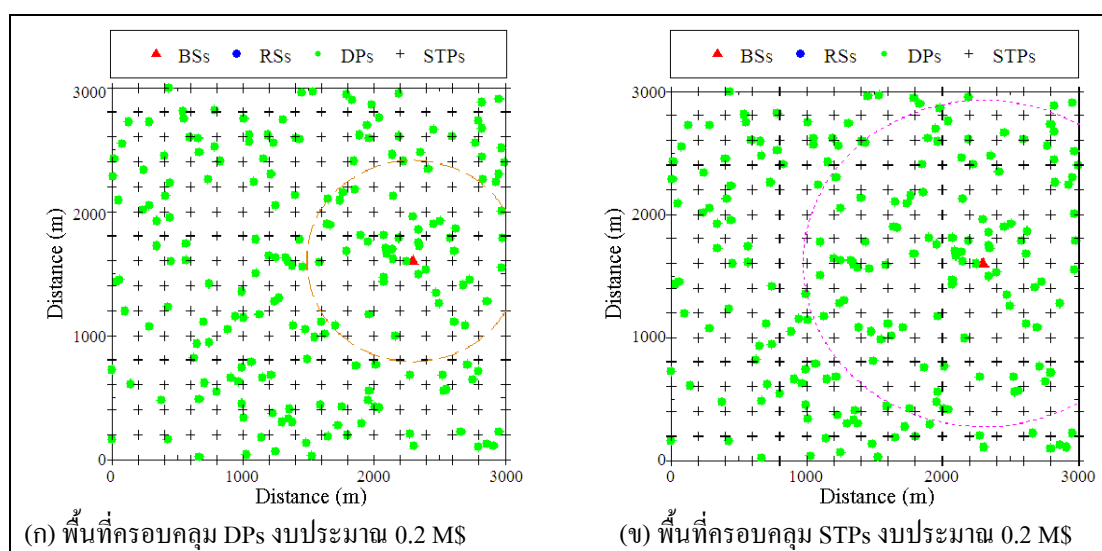
รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานให้กระจายตัวเท่ากันภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน (ต่อ)

จากตารางที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้นั้นแปรผันตามงบประมาณการลงทุน เช่นเดียวกับในหัวข้อที่ 4.6.1 แต่การวางแผนเครือข่ายในหัวข้อนี้ให้การรับประกันคุณภาพการให้บริการทั่วทั้งพื้นที่ให้บริการเมื่องบประมาณการลงทุนสร้างเครือข่ายมีค่า 1.0 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ ซึ่งใช้งบประมาณมากกว่า

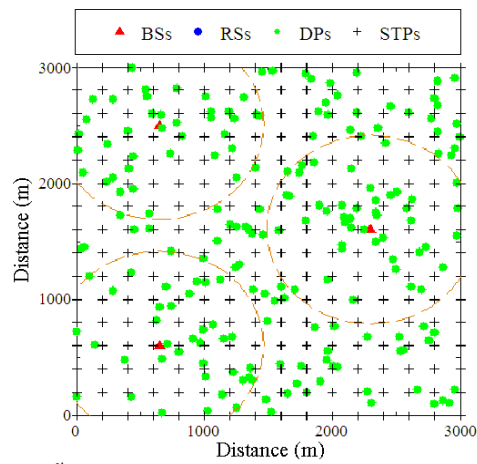
งบประมาณของหัวข้อที่ 4.6.1 และไม่มีการใช้งบประมาณเกินกว่างบลงทุนที่ตั้งไว้ในแต่ละค่าดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ข) ซึ่งความหนาแน่นของความแรงสัญญาณที่ตำแหน่งรับประกันคุณภาพการให้บริการ (DPs และ STPs) ได้รับจากเครือข่ายแสดงในรูปที่ 4.5 (ค) โดยความแรงสัญญาณที่ได้รับได้นั้นแปรผันตามงบประมาณการลงทุน และความแรงสัญญาณที่ตำแหน่งรับประกันอัตราเร็ว (DPs) ในทุก ๆ มูลค่าการลงทุนมีค่ามากกว่าที่ตำแหน่งรับประกันพื้นที่ครอบคลุม (STPs) เสมอ

4.6.3 การทดลองวางแผนเครือข่ายโดยวิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานภายใต้งบประมาณจำกัด

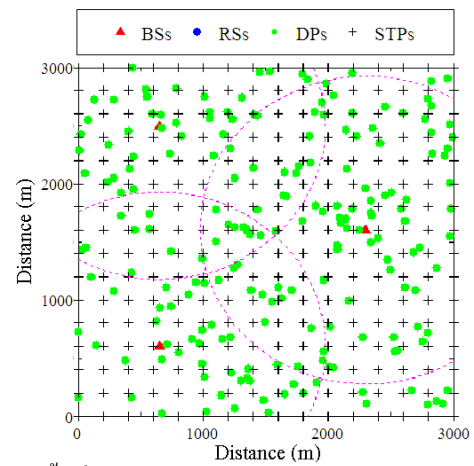
การวางแผนเครือข่ายโดยใช้วิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน (Expert Approximation method : EA method) เป็นวิธีที่บริษัทผู้ให้บริการโทรศัพท์ระบบเซลลูลาร์นิยมใช้ในการวางแผนเครือข่ายจริง ซึ่งวิธีนี้สามารถควบคุมค่าใช้จ่ายในการติดตั้งสถานีฐานได้ง่าย โดยการระบุจำนวนสถานีฐานที่ต้องการติดตั้ง ซึ่งการวางแผนเครือข่ายได้พิจารณากำหนดที่ตั้งสถานีฐานจากบริเวณที่มีตำแหน่งรับประกันอัตราเร็ว (DPs) อยู่หนาแน่น และจำนวนของสถานีฐานได้อ้างอิงจาก งบประมาณการลงทุนเหมือนกับหัวข้อ 4.6.2 คือ 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 ล้านเหรียญสหรัฐ ซึ่งได้จำนวนสถานีฐานจากแต่ละงบประมาณลงทุนคือ 1 3 5 6 และ 8 สถานีฐานตามลำดับ จากนั้นทำการหาค่าความแรงสัญญาณที่ตำแหน่งรับประกันคุณภาพการให้บริการ (DPs และ STPs) ได้รับจากสถานีฐานที่ติดตั้งตามตำแหน่งที่คาดคะเนไว้ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งผลของการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ด้วยวิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน (EA method) แสดงในรูปที่ 4.6



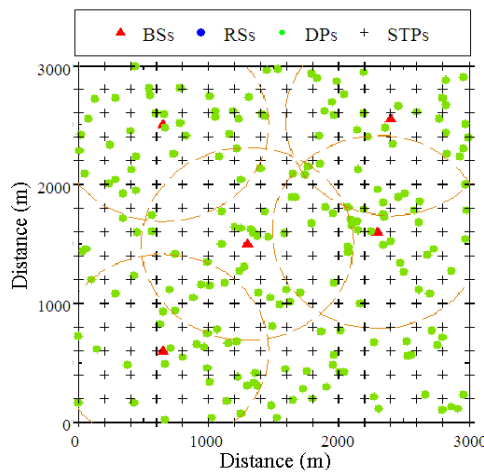
รูปที่ 4.6 ผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีการกำหนดสถานีฐานแบบคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานเมื่อใช้งบประมาณลงทุนต่างกัน



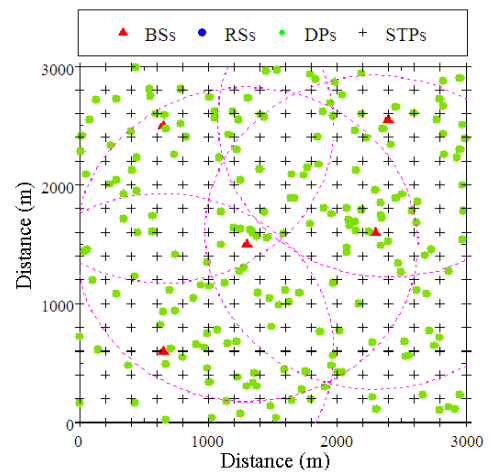
(ค) พื้นที่ครอบคลุม DPUs งบประมาณ 0.4 M\$



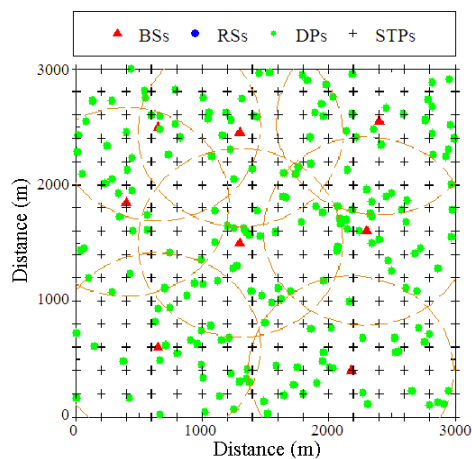
(ง) พื้นที่ครอบคลุม STPs งบประมาณ 0.4 M\$



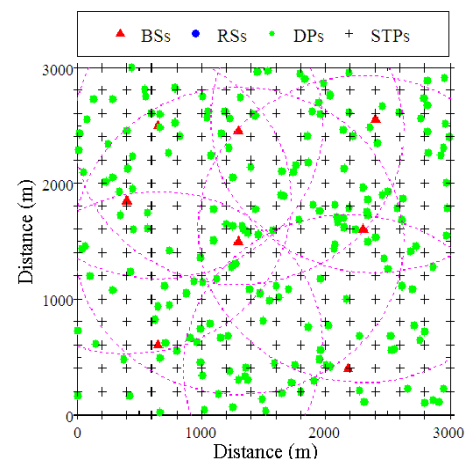
(จ) พื้นที่ครอบคลุม DPUs งบประมาณ 0.6 M\$



(ฉ) พื้นที่ครอบคลุม STPs งบประมาณ 0.6 M\$

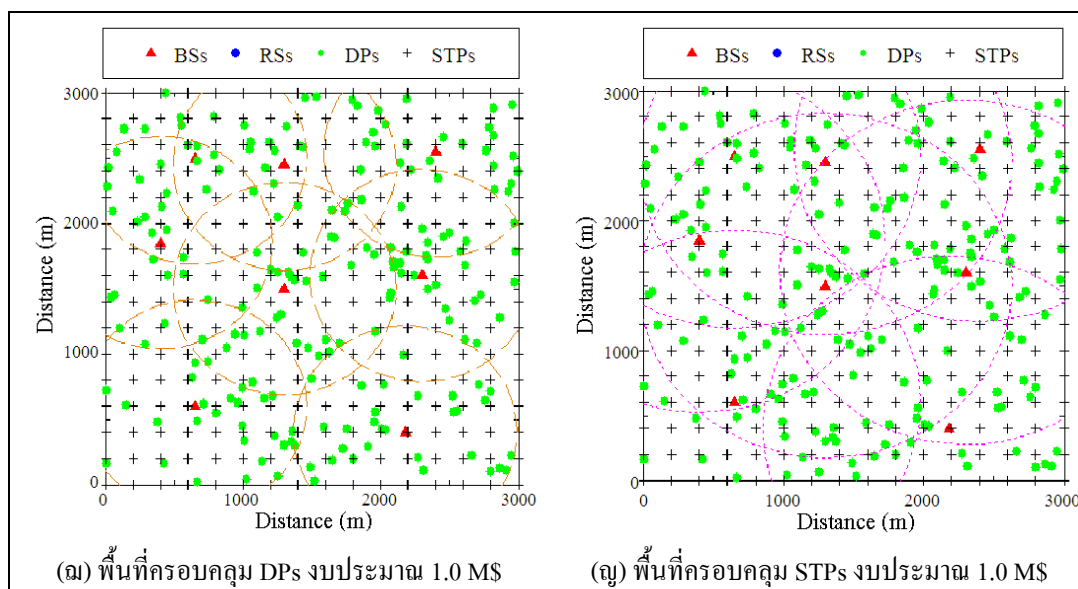


(ช) พื้นที่ครอบคลุม DPUs งบประมาณ 0.8 M\$



(ছ) พื้นที่ครอบคลุม STPs งบประมาณ 0.8 M\$

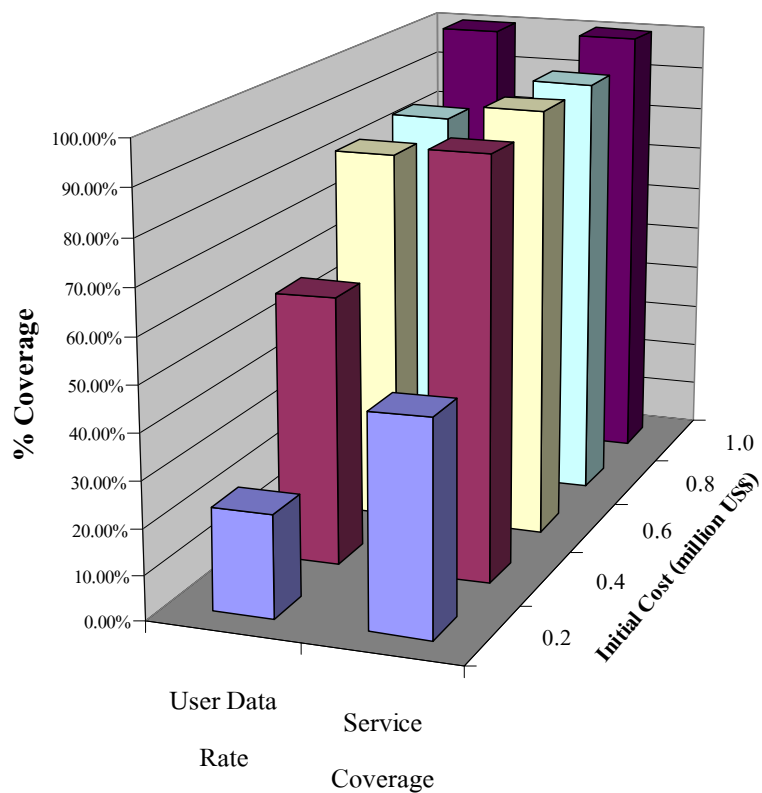
รูปที่ 4.6 ผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีการกำหนดสถานีฐานแบบคาดคะเนตำแหน่ง
ที่ตั้งสถานีฐานเมื่อใช้งบประมาณในการลงทุนต่างกัน(ต่อ)



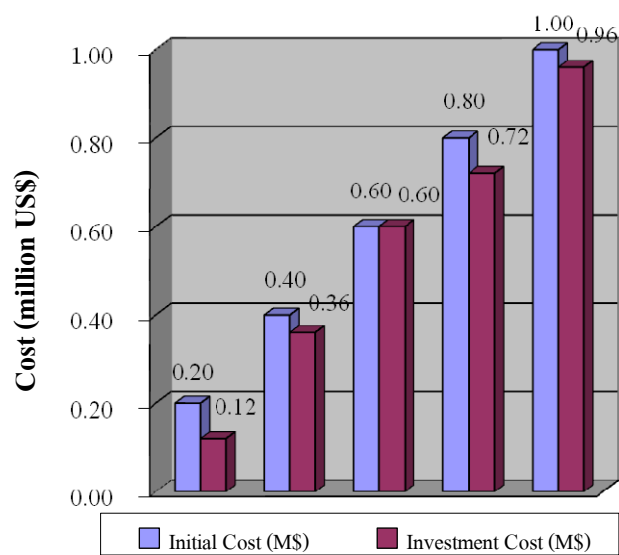
รูปที่ 4.6 ผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีการกำหนดสถานีฐานแบบคาดคะเนตำแหน่ง
ที่ตั้งสถานีฐานเมื่อใช้งบประมาณในการลงทุนต่างกัน(ต่อ)

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบผลการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์โดยใช้วิธีคาดคะเนตำแหน่ง
ที่ตั้งสถานีฐานภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน

พารามิเตอร์	ค่า				
งบประมาณตั้งต้น (M\$)	0.20	0.40	0.60	0.80	1.00
งบลงทุนที่ใช้จริง (M\$)	0.120	0.360	0.600	0.720	0.960
จำนวนสถานีฐาน (BSs)	1	3	5	6	8
จำนวน STPs ที่เครือข่ายรองรับ	45	118	166	170	200
จำนวน STPs ที่เครือข่ายรองรับ	119	236	243	243	256
การรับประกันอัตราเร็วทางกายภาพ	46.48%	92.19%	94.92%	94.92%	100.00%
การรับประกันการสัญญาณครอบคลุม	22.50%	59.00%	83.00%	85.00%	100.00%

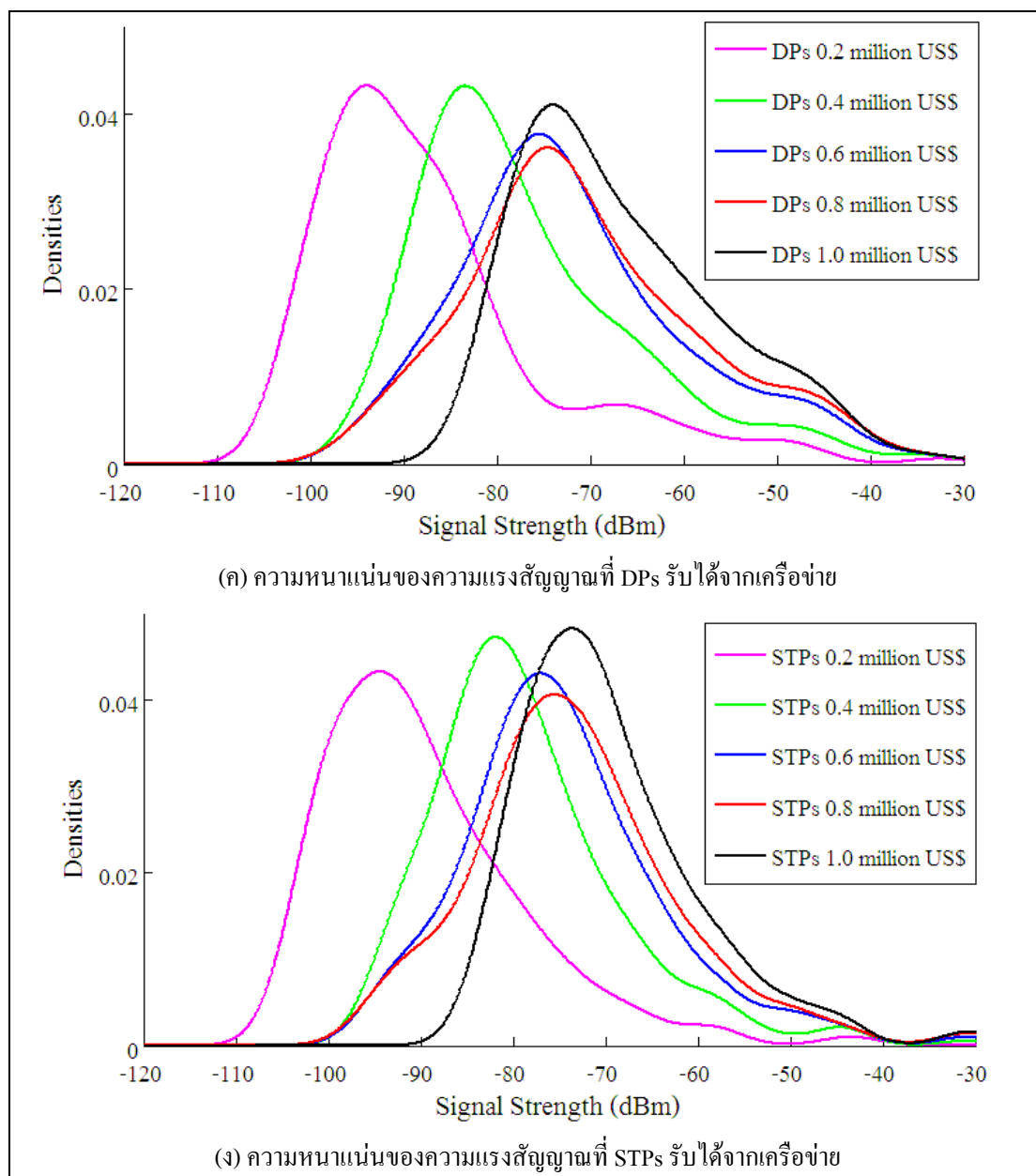


(ก) การรับประกันคุณภาพการให้บริการ



(ข) งบประมาณในการลงทุน

รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน ภายใต้การจำกัดงบประมาณลงทุนต่างกัน



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน ภายใต้การจำกัดงบประมาณลงทุนต่างกัน (ต่อ)

4.6.4 วิเคราะห์ผลการวางแผนเครือข่ายภายใต้งบประมาณจำกัด

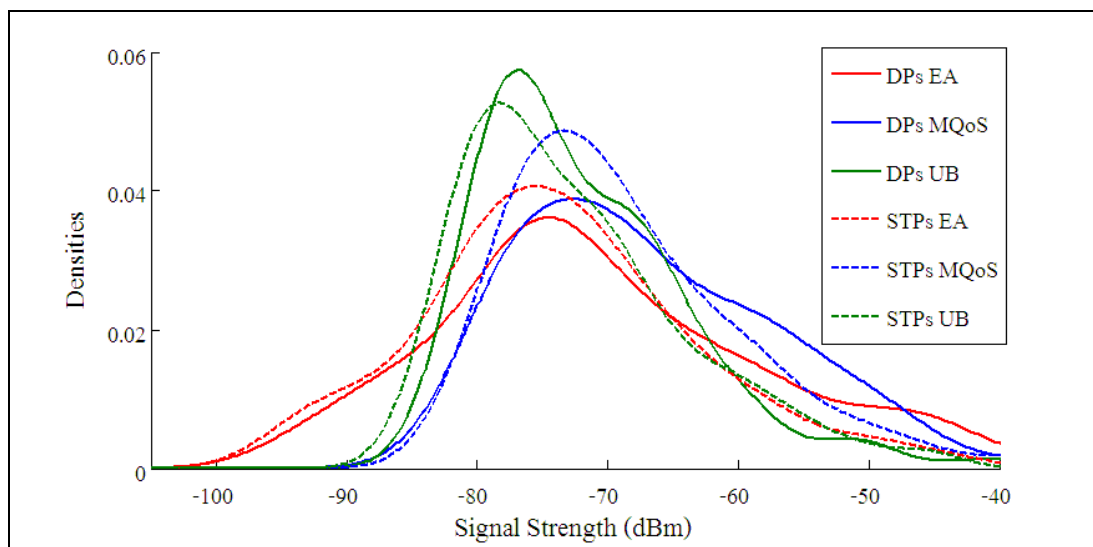
ในหัวข้อนี้ได้นำผลการวางแผนเครือข่ายภายใต้การจำกัดงบประมาณโดยใช้สมการคณิตศาสตร์โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (0-1 Integer Programming) ซึ่งได้แสดงในหัวข้อที่ 4.6.1 (MQoS) และผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีกระจายตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานให้

เท่ากันทั่วพื้นที่ออกแบบ (Uniform Base Station : UB) รวมไปถึงผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน (Expert Approximation : EA) มาเปรียบเทียบกัน ทั้งในรูปแบบตาราง และแผนภูมิ

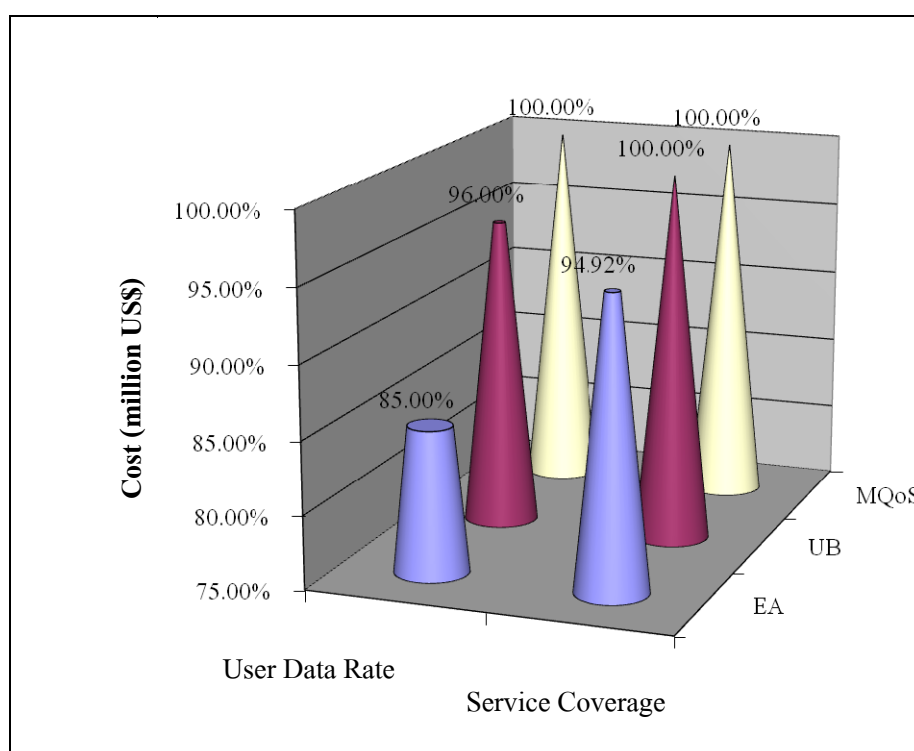
จากการเปรียบเทียบการวางแผนเครือข่ายทั้งสามวิธีพบว่า วิธีที่สามารถรับประกันทั้งสัญญาณครอบคลุมและการให้บริการอัตราเร็วทางกายภาพทั่วทั้งเครือข่ายได้ดีที่สุด โดยมีงบประมาณในการลงทุนติดตั้งเครือข่ายน้อยที่สุดคือการวางแผนในหัวข้อ 4.6.1 เนื่องจากมีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดทดแทนการติดตั้งสถานีฐาน และได้ใช้สมการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีสำหรับการหาคำตอบที่เหมาะสม ซึ่งโปรแกรม ILOG OPL CPLEX ที่ใช้เป็นเครื่องมือในการหาคำตอบนั้น ได้นำขั้นตอนวิธีแบบซิมเพล็กซ์อัลกอริทึมเป็นระเบียบวิธีสำหรับการหาคำตอบ ซึ่งเป็นวิธีที่รับประกันได้ว่าผลการออกแบบที่ได้จะเป็นคำตอบที่ดีที่สุด ส่วนการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีกำหนดตำแหน่งสถานีฐานให้กระจายตัวเท่ากันนั้นการรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้จะแปรผันตามจำนวนสถานีฐานที่ติดตั้ง และคุณภาพการให้บริการของการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน นั้นขึ้นอยู่กับทั้งจำนวนสถานีฐานที่ติดตั้ง และความแม่นยำในการคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน ซึ่งการเปรียบเทียบการวางแผนเครือข่ายแบบต่าง ๆ โดยจำกัดงบประมาณการลงทุนไว้ที่ 0.8 ล้านเหรียญสหรัฐฯ แสดงในรูปที่ 4.9 และความหนาแน่นของค่ากำลังสัญญาณที่ตำแหน่งรับประกันคุณภาพการให้บริการ (DPs และ STPs) รับได้จากเครือข่ายที่ถูกวางแผนจากทั้งสามวิธีได้แสดงในรูปที่ 4.8

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์โดยใช้วิธีต่างกัน

พารามิเตอร์	ค่า					
งบประมาณตั้งต้น (10^6 US\$)	0.4			0.8		
วิธีการวางแผนเครือข่าย	MQoS	UB	EA	MQoS	UB	EA
งบลงทุนที่ใช้จริง (10^6 US\$)	0.384	0.360	0.360	0.768	0.720	0.720
จำนวนสถานีฐาน (BSs)	2	3	3	4	6	6
จำนวนสถานีถ่ายทอด (RSs)	3	-	-	6	-	-
จำนวน DPs ที่เครือข่ายรองรับ	157	148	118	200	192	170
จำนวน STPs ที่เครือข่ายรองรับ	244	240	236	256	256	243
การรับประกันอัตราเร็วทางกายภาพ (%)	78.50	74.00	59.00	100.00	96.00	85.00
การรับประกันการสัญญาณครอบคลุม (%)	95.31	93.75	92.19	100.00	100.00	94.92



รูปที่ 4.8 ความหนาแน่นของแรงสัญญาณที่ DP's และ STP's ได้รับจากเครือข่ายที่มีวิธีการวางแผนเครือข่ายต่างกัน

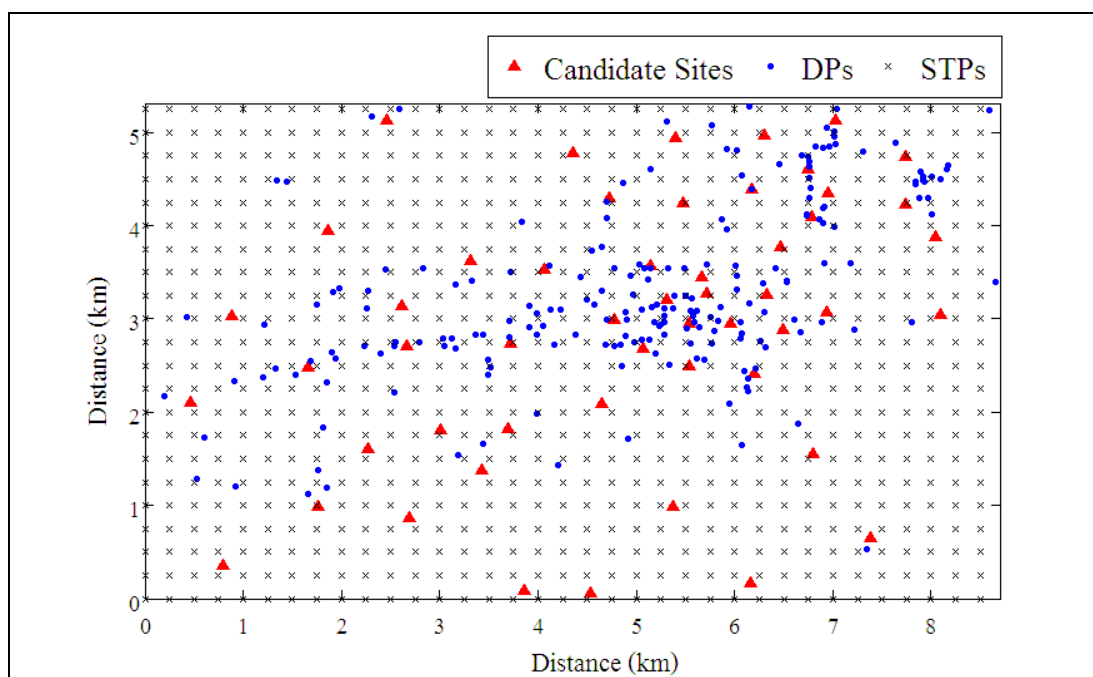


รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบคุณภาพการให้บริการของการวางแผนเครือข่ายแบบต่าง ๆ

4.7 การวางแผนเครือข่ายในพื้นที่ให้บริการจริงภายใต้งบประมาณจำกัด

จากวิเคราะห์ผลการวางแผนเครือข่ายภายใต้งบประมาณที่จำกัดในพื้นที่ทดสอบดังกล่าวข้อที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่า การวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์โดยใช้สมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มใบนารีในหัวข้อที่ 4.3 เลือกตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด โดยสามารถรับประกันการให้บริการอัตราเร็วทางกายภาพและสัญญาณครอบคลุมแก่ผู้ใช้งานได้ดีที่สุด ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้นำสมการทางคณิตศาสตร์จากหัวข้อที่ 4.3 มาทดลองวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริงเพื่อยืนยันถึงความสามารถในการประยุกต์สมการในบทนี้กับปัญหาจริงได้ เมื่อผู้ให้บริการไวแมกซ์ต้องการวางแผนเครือข่ายโดยหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดโดยมีงบประมาณในการลงทุนที่จำกัด

สำหรับพื้นที่จริงที่เลือกทำการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์คือตัวเมืองนครราชสีมา ซึ่งมีความต้องการใช้งานการสื่อสารบรอดแบนด์สูง แต่ยังไม่มีการให้บริการบรอดแบนด์ไร้สายในพื้นที่ระดับมาโครเซลล์ (Macro Cellular Area) มาก่อน สำหรับขอบเขตของพื้นที่ศึกษานั้น ได้ใช้พื้นที่เดียวกับการวางแผนเครือข่ายในหัวข้อ 3.7 โดยพิจารณาคำแนะนำที่เป็นไปได้สำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดคือสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบจีเอสเอ็ม ซึ่งมีโครงสร้างพื้นฐานพร้อมอยู่แล้ว ได้แก่เสาสัญญาณ ระบบไฟฟ้ากำลัง และระบบเครือข่ายใยแก้วนำแสง ทำให้สามารถลดต้นทุนในการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานเหล่านี้ และสามารถติดตั้งอุปกรณ์เครือข่ายไวแมกซ์ได้ง่ายและรวดเร็ว จำนวนสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ระบบจีเอสเอ็มที่พิจารณาสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ไวแมกซ์มีจำนวน 55 ตำแหน่งซึ่งสามารถทำการเลือกติดตั้งทั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดได้ สำหรับจุดที่รับประกันการให้บริการ (DPs) ได้คัดเลือกจากสถานที่ที่มีผู้ใช้บริการอยู่รวมกันจำนวนมาก เช่นสถานที่ราชการ สถานศึกษา แหล่งท่องเที่ยว และที่พักอาศัย ซึ่งในการทดลองได้พิจารณาคำแนะนำสำหรับรับประกันการให้บริการ (DPs) จำนวน 207 ตำแหน่ง และสำหรับการรับประกันสัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่บริการนั้น ได้กำหนดจุดทดสอบสัญญาณ (STPs) กระจายตัวในรูปแบบตารางห่างกันช่วงละ 250 เมตร ทำให้ในพื้นที่ให้บริการมีจุดทดสอบสัญญาณ (STPs) จำนวน 770 ตำแหน่ง ซึ่งข้อมูลตั้งต้นสำหรับวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีงบประมาณการลงทุนติดตั้งเครือข่ายจำกัดในเขตเมืองนครราชสีมาได้แสดงในรูปที่ 4.10 และรายละเอียดของพารามิเตอร์ที่ใช้ประกอบการวางแผนเครือข่ายได้แสดงในตารางที่ 4.6 ในส่วนของการวางแผนเครือข่ายบนพื้นที่จริงนั้นได้ทำการทดลองวางแผนเครือข่ายต่างกัน 2 แบบ คือ การวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์บนพื้นที่จริงโดยไม่พิจารณาความแตกต่างค่าน้ำหนักของตำแหน่งรับประกันคุณภาพการให้บริการ (DPs และ STPs) และการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์บนพื้นที่จริงโดยพิจารณาความแตกต่างค่าน้ำหนักของตำแหน่งรับประกันคุณภาพการให้บริการ (DPs และ STPs)



รูปที่ 4.10 แสดงข้อมูลตั้งต้นสำหรับการทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์
ภายใต้การจำกัดงบประมาณในเขตเมืองนครราชสีมา

ตารางที่ 4.7 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ในเขตเมืองนครราชสีมา

พารามิเตอร์	ค่า
ความสูงของเสาสัญญาณที่ติดตั้งสายอากาศของแต่ละ BSs และ RSs	30 m
ความสูงสายอากาศของอุปกรณ์ผู้ใช้งาน	2 m
กำลังส่งจากแต่ละ BSs และ RSs	35 dBm
กำลังขยายในสายอากาศ ของแต่ละ BSs และ RSs	16 dBi
กำลังขยายในสายอากาศของอุปกรณ์ผู้ใช้งาน	2 dBi
ความถี่ของสัญญาณพาห้	2.5 GHz
ประเภทของลักษณะภูมิประเทศ (อ้างอิงจาก SUI model)	A
ความกว้างของช่องสัญญาณ	3.5 MHz
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับ DPs	5.64 Mbps
อัตราเร็วทางกายภาพสำหรับ STPs	2.12 Mbps
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 1 สถานีฐาน	120,000 \$
ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง 1 สถานีถ่ายทอด	48,000 \$

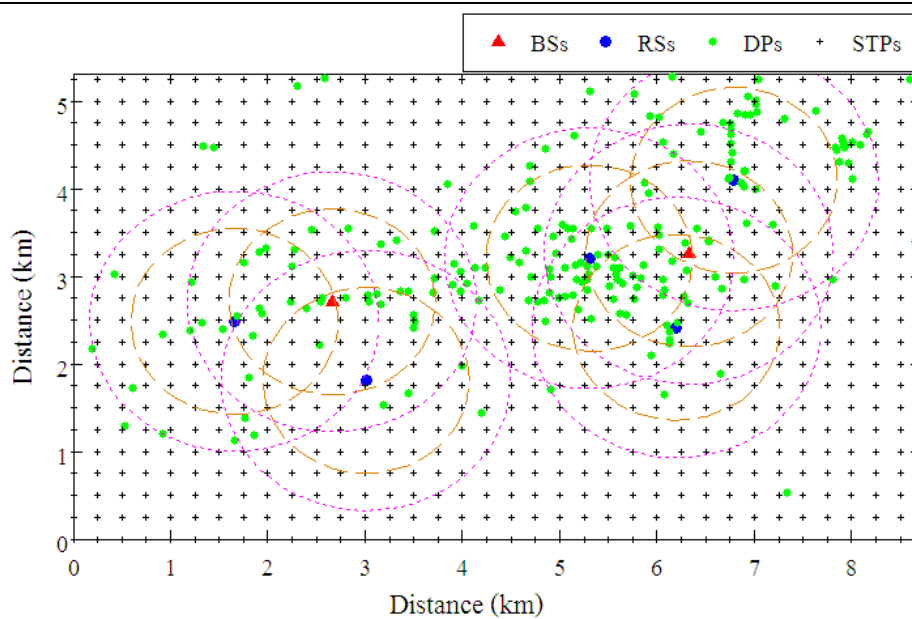
4.7.1 การทดลองวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์บนพื้นที่ให้บริการจริงภายใต้ งบประมาณจำกัด

สำหรับการวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มการรับประกันคุณภาพการให้บริการภายใต้งบประมาณลงทุนที่จำกัด (Maximize Quality of Service : MQoS model) โดยไม่คำนึงถึงความแตกต่างของค่าน้ำหนักของตำแหน่งรับประกันสัญญาณครอบคลุม (STPs) และตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) ซึ่งให้ชื่อว่า เมื่อนำข้อมูลตั้งต้นมาจากรูปที่ 4.10 และพารามิเตอร์ในตารางที่ 4.6 ทำการคำนวณด้วยสมการคณิตศาสตร์โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี จากหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไม่ได้คำนึงถึงความแตกต่างในค่าน้ำหนักของตำแหน่งรับประกันการบริการ และตำแหน่งรับประกันสัญญาณครอบคลุม ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในหัวข้อนี้หมายถึงการพยายามเพิ่มตำแหน่งสำหรับรับประกันการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน ซึ่งประกอบไปด้วยตำแหน่งรับประกันสัญญาณครอบคลุม (STPs) และตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) โดยพจน์แรกของฟังก์ชันวัตถุประสงค์หมายถึงผลรวมของตำแหน่งรับประกันสัญญาณครอบคลุมที่เครือข่ายสามารถรองรับได้ และพจน์ที่สองหมายถึงตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการที่เครือข่ายสามารถรองรับได้ดังสมการ (4.16)

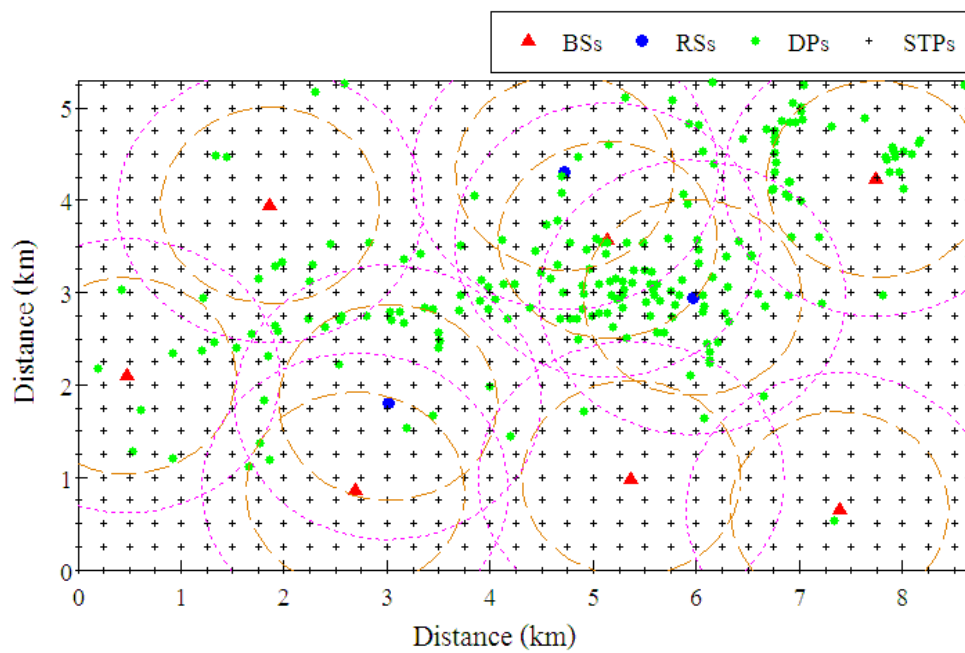
ฟังก์ชันวัตถุประสงค์:

$$\text{Maximize } \sum_{h=1}^t (u_{hj} + v_{hi}) + \sum_{g=1}^d (x_{gj} + y_{gi}) \quad (4.16)$$

โดยการทดลองวางแผนเครือข่ายบนพื้นที่จริงมีการตั้งมูลค่างบประมาณการลงทุนไว้ 5 แบบ คือ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ เพื่อเป็นศึกษาและเปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายเมื่อมีงบประมาณลงทุนต่างกัน โดยงบประมาณทั้ง 5 แบบได้จากการประมาณโดยเทียบกับงบประมาณที่ได้จากผลการหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยสมการคณิตศาสตร์โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีของวิธีวางแผนเครือข่ายไวแมกซ์ในหัวข้อที่ 3.7 (BRPP model) ซึ่งมีสมการคณิตศาสตร์ที่คล้ายกัน และใช้ข้อมูลตั้งต้นในการวางแผนเครือข่ายเหมือนกันทั้งหมด โดยกำหนดให้มูลค่างบประมาณการลงทุนมากกว่าและน้อยกว่าคำตอบจากวิธี ในหัวข้อที่ 3.7 (BRPP model) คือ 1.68 ล้านดอลลาร์สหรัฐฯ ลดหลั่นกันไป ซึ่งผลการวางแผนเครือข่ายจากการตั้งงบประมาณการลงทุนทั้ง 5 แบบได้แสดงในรูปที่ 4.11

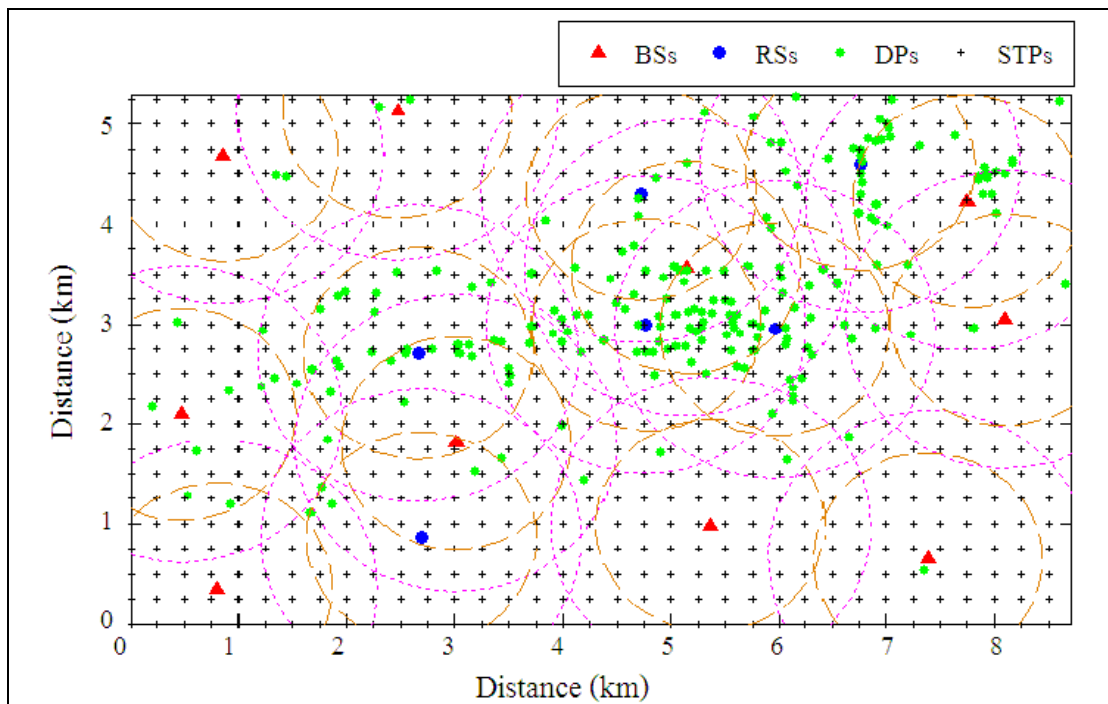


(ก) มูลค่างบประมาณตั้งต้น 0.5 ล้าน US\$

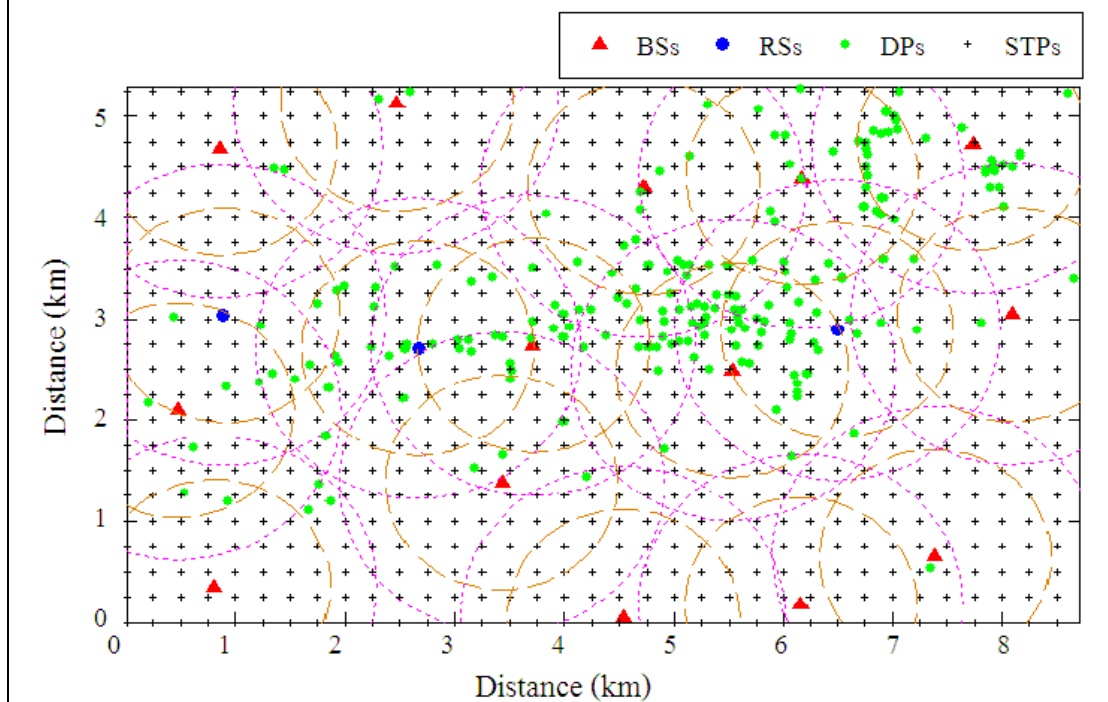


(ข) มูลค่างบประมาณตั้งต้น 1.0 ล้าน US\$

รูปที่ 4.11 แสดงผลการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริงภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน

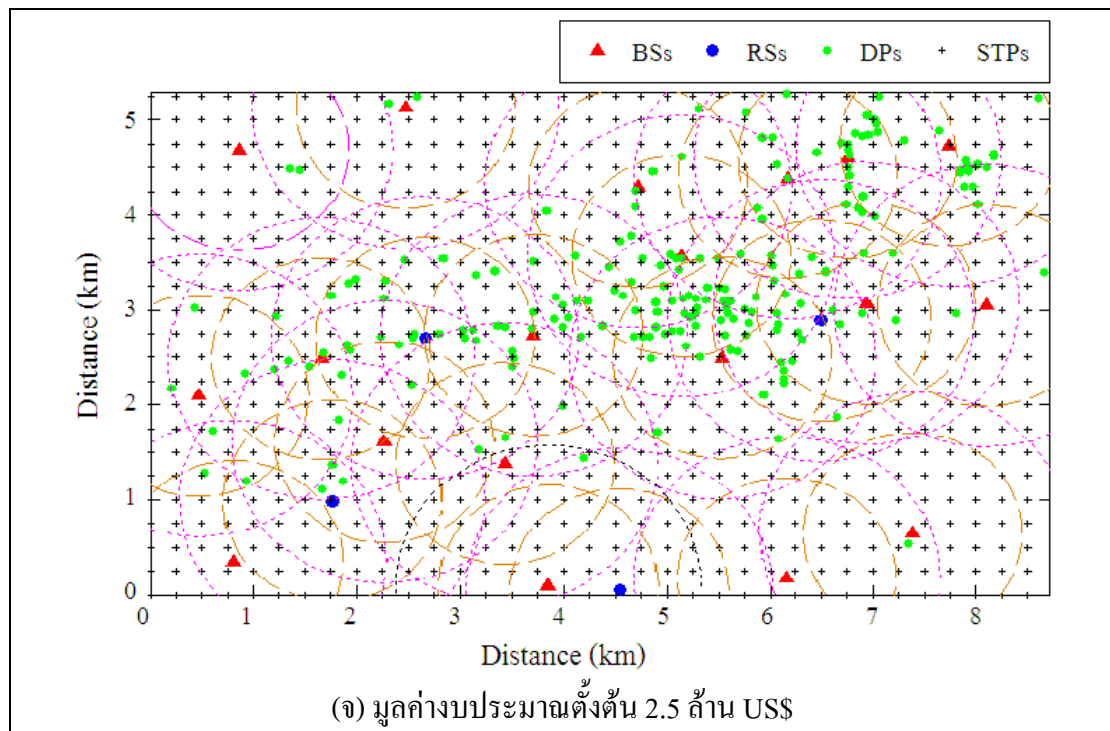


(ค) มูลค่างบประมาณตั้งต้น 1.5 ล้าน US\$

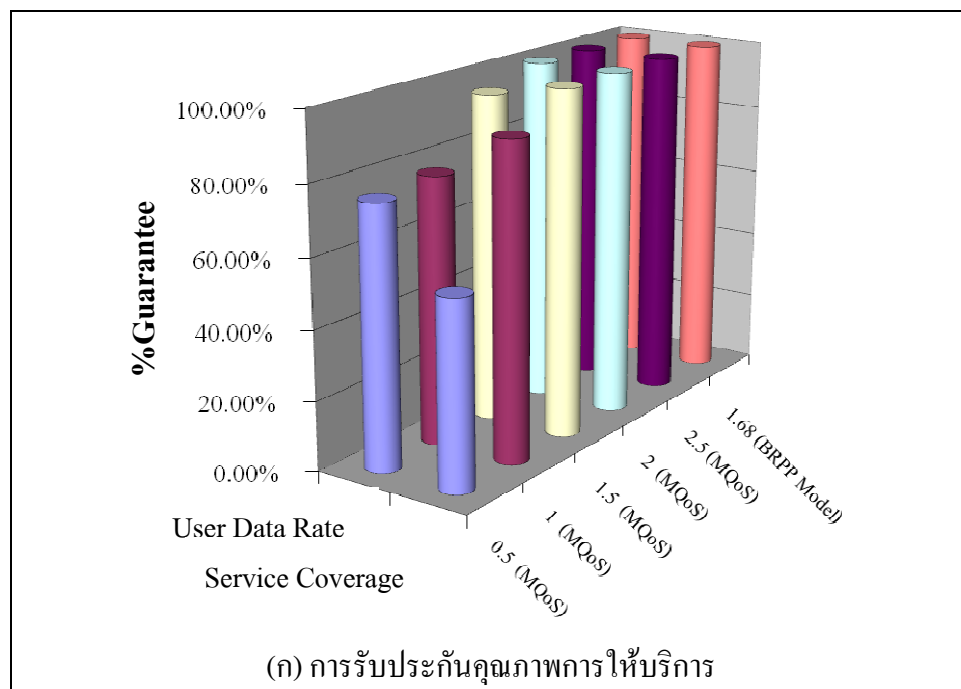


(ง) มูลค่างบประมาณตั้งต้น 2.0 ล้าน US\$

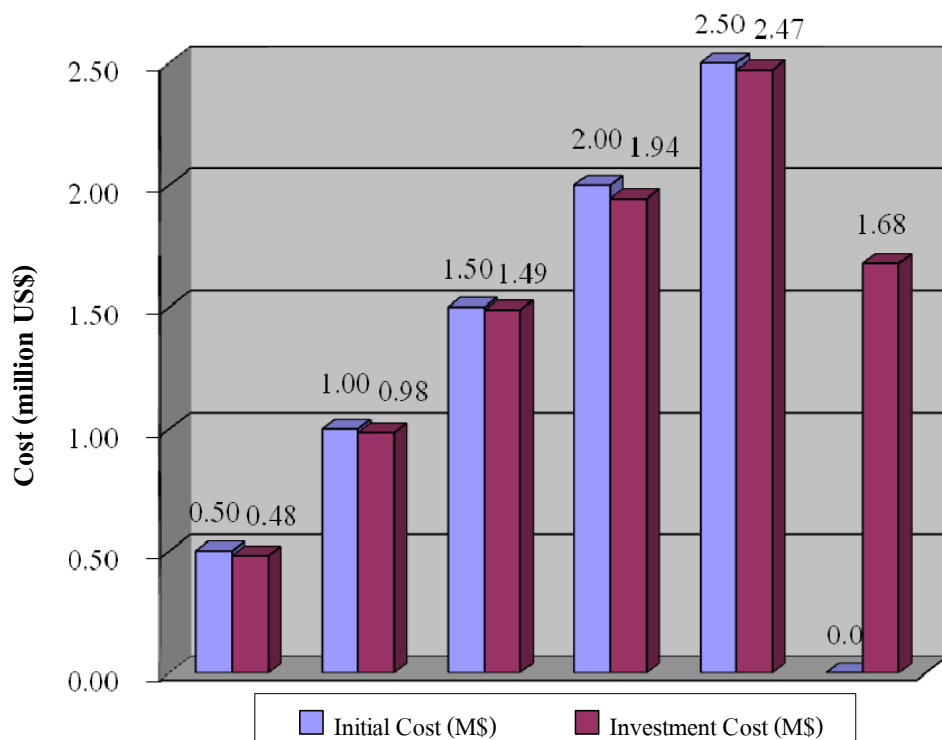
รูปที่ 4.11 แสดงผลการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริงภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน (ต่อ)



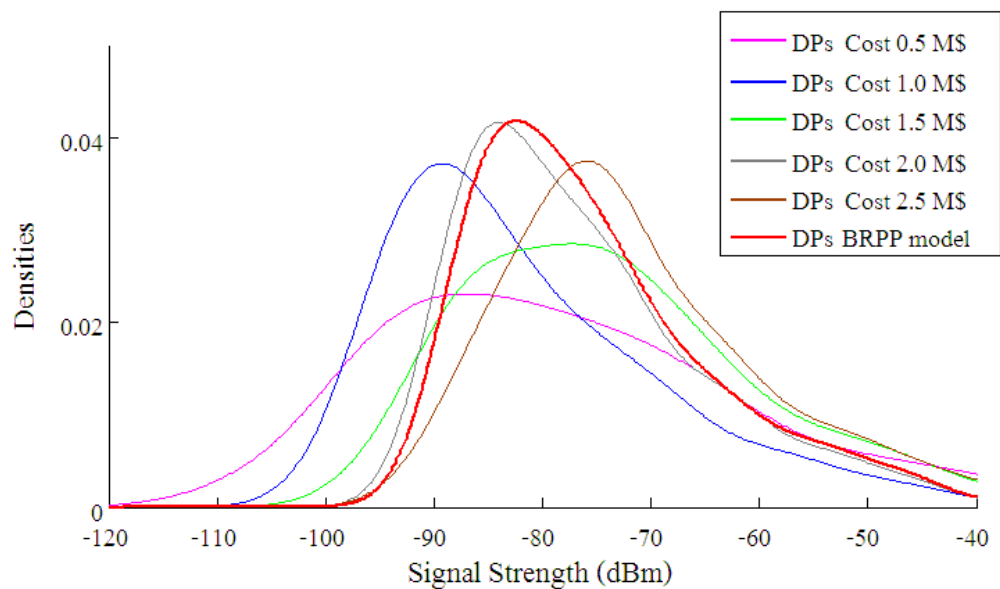
รูปที่ 4.11 แสดงผลการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริงภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน (ต่อ)



รูปที่ 4.12 ผลการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริงภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน

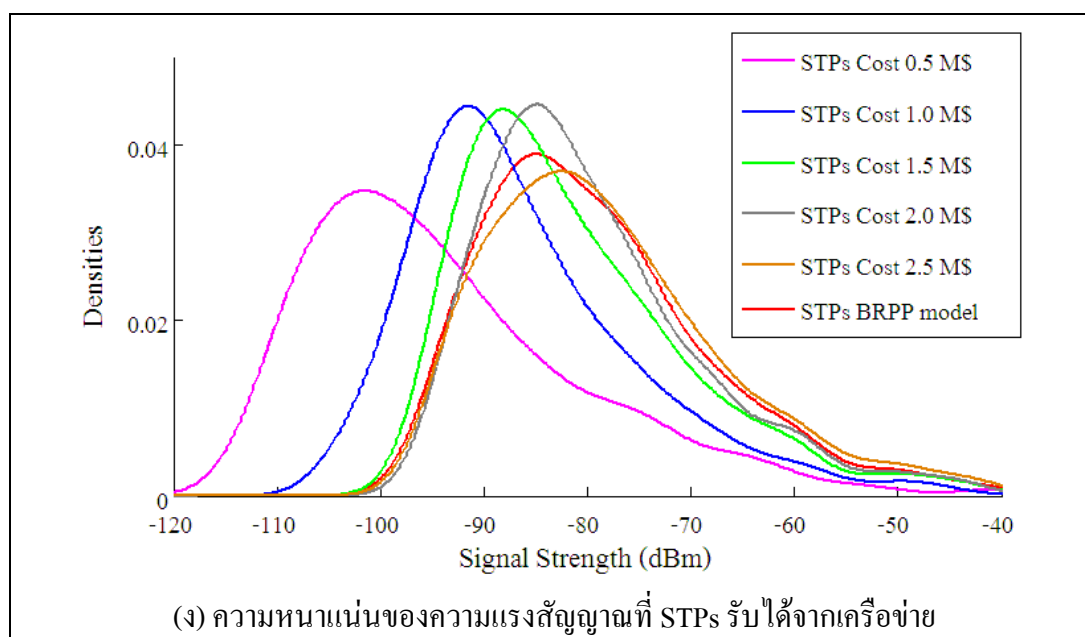


(ข) งบประมาณในการลงทุน



(ค) ความหนาแน่นของกำลังสัญญาณที่ DPs รับได้จากเครือข่าย

รูปที่ 4.12 ผลการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริงภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน (ต่อ)



รูปที่ 4.12 ผลการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริงภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน (ต่อ)

ตารางที่ 4.8 ผลการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริงภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน

พารามิเตอร์/ค่า	MQoS Model					BRPP Model
งบประมาณตั้งต้น(10^6 US\$)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	ไม่จำกัด
งบลงทุนที่ใช้จริง(10^6 US\$)	0.480	0.984	1.488	1.944	2.472	1.680
จำนวนสถานีฐาน (BSs)	2	7	10	15	19	10
จำนวนสถานีถ่ายทอด (RSs)	5	3	6	3	4	10
จำนวน DP ที่เครือข่ายรองรับ	156	160	197	207	207	207
จำนวน STPs ที่เครือข่ายรองรับ	418	699	768	770	770	770
การรับประกันอัตราเร็วทางกายภาพ	75.36%	77.29%	95.17%	100.00%	100.00%	100.00%
การรับประกันสัญญาณครอบคลุม	54.29%	90.78%	99.74%	100.00%	100.00%	100.00%

4.7.2 การทดลองวางแผนเครือข่ายไว้มากขึ้นในพื้นที่ให้บริการจริงโดยพิจารณาการถ่วงน้ำหนักภายใต้งบประมาณจำกัด

สำหรับการวางแผนเครือข่ายที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มการรับประกันคุณภาพการให้บริการภายใต้งบประมาณจำกัดและมีการพิจารณาถ่วงน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Weighted Maximize Quality of Service : Weighted MQoS model) ได้พิจารณาความสำคัญของตำแหน่งสำหรับรับประกันอัตราเร็วการให้บริการแก่ผู้ใช้ (DPs) มากกว่าตำแหน่งสำหรับรับประกันสัญญาณ

ครอบคลุม (STPs) เนื่องจากตำแหน่งสำหรับประกันอัตราเร็วการให้บริการแก่ผู้ใช้ (DPs) เป็นตำแหน่งที่มีผู้ใช้งานรวมตัวกันอยู่เป็นจำนวนมาก ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้ใช้ตัวแปร ตัวแปรตัดสินใจ และเงื่อนไขเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 4.7.2 แต่เพิ่มค่าถ่วงน้ำหนัก (W_g) ให้กับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในพจน์ของผลรวมของตำแหน่งสำหรับรับประกันอัตราเร็วการให้บริการแก่ผู้ใช้ (DPs) ดังสมการ (4.16)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ :

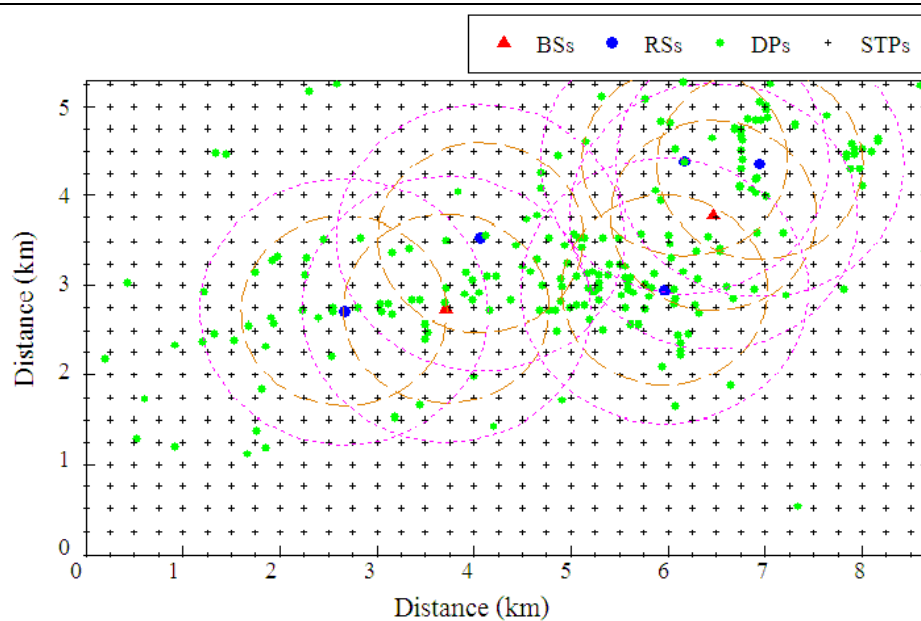
$$\text{Maximize } \sum_{h=1}^t (u_{hj} + v_{hi}) + \sum_{g=1}^d W_g (x_{gj} + y_{gi}) \quad (4.17)$$

โดยที่ : W_g หมายถึงค่าถ่วงน้ำหนักที่ DP $g, g \in D$

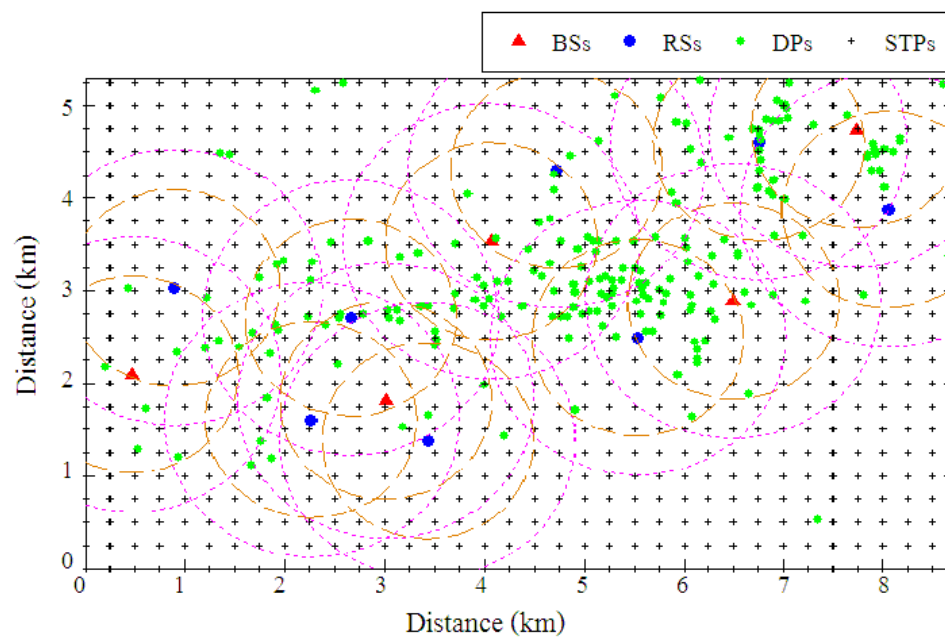
โดยการทดลองวางแผนเครือข่ายในหัวข้อนี้มีการตั้งมูลค่างบประมาณการลงทุนไว้ 5 แบบเช่นเดียวกับหัวข้อที่ผ่านมา คือ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 ล้านเหรียญสหรัฐฯ และเพิ่มการถ่วงน้ำหนักให้กับตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการต่าง ๆ ตามตารางที่ 4.8 ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักได้มาจากการประมาณอัตราส่วนผู้ใช้งานเครือข่ายไวแมกซ์ในแต่ละสถานที่ จากนั้นได้ทำการเทียบผลการวางแผนเครือข่ายกับสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีในหัวข้อ 3.7 (BRPP model) ที่ใช้งบประมาณลงทุนสร้างเครือข่าย 1.68 ล้านเหรียญสหรัฐฯ ซึ่งผลการวางแผนเครือข่ายจากการตั้งงบประมาณการลงทุนทั้ง 5 แบบได้แสดงในรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.9 ค่าถ่วงน้ำหนักที่ใช้กับตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ

ตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs)	ค่าถ่วงน้ำหนัก (W_g)
สถาบันอุดมศึกษา	500
โรงเรียน	300
โรงพยาบาล	100
หอพัก, โรงแรม	50
สถานที่ราชการ, สถานที่ท่องเที่ยว	50
วัด, ศาสนสถาน	20
ร้านอาหาร	10

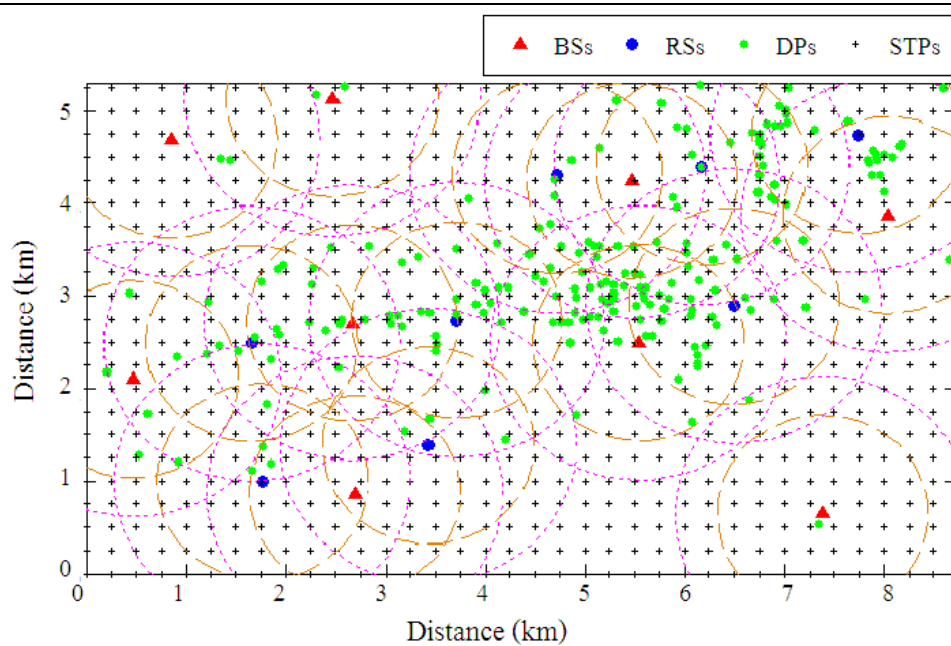


(ก) มูลค่างบประมาณตั้งต้น 0.5 ล้านบาท

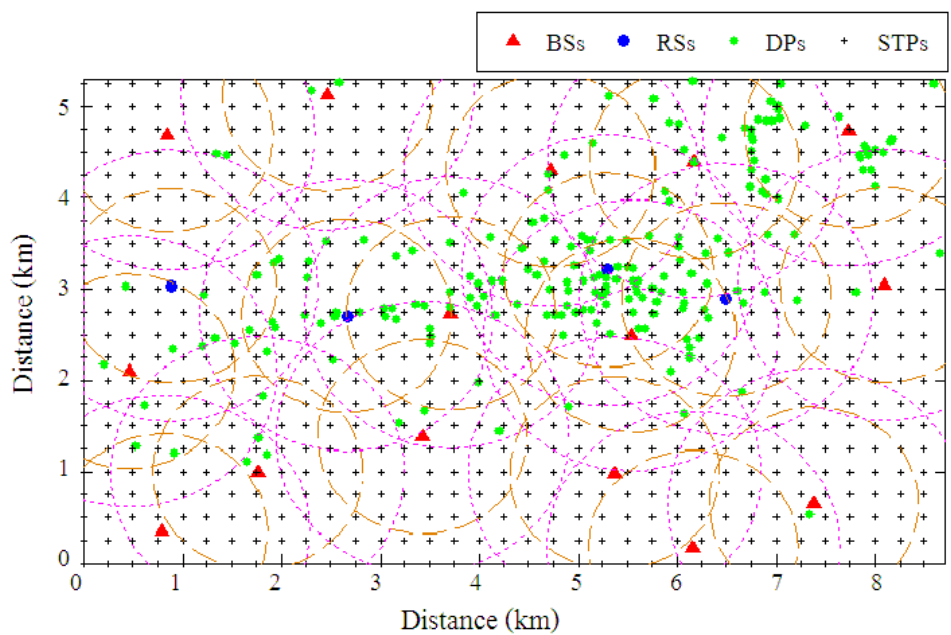


(ข) มูลค่างบประมาณตั้งต้น 1.0 ล้านบาท

รูปที่ 4.13 แสดงผลการวางแผนเครือข่ายแบบถ่วงน้ำหนักในพื้นที่ให้บริการจริงภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน

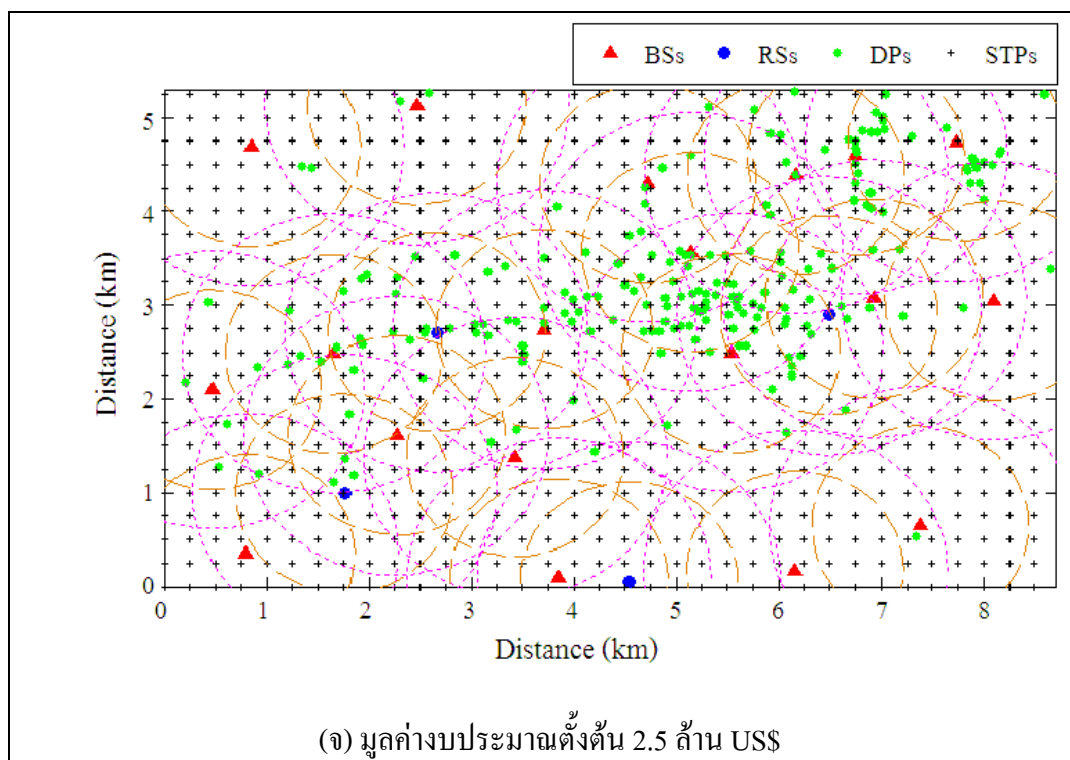


(ค) มูลค่างบประมาณตั้งต้น 1.5 ล้าน US\$



(ง) มูลค่างบประมาณตั้งต้น 2.0 ล้าน US\$

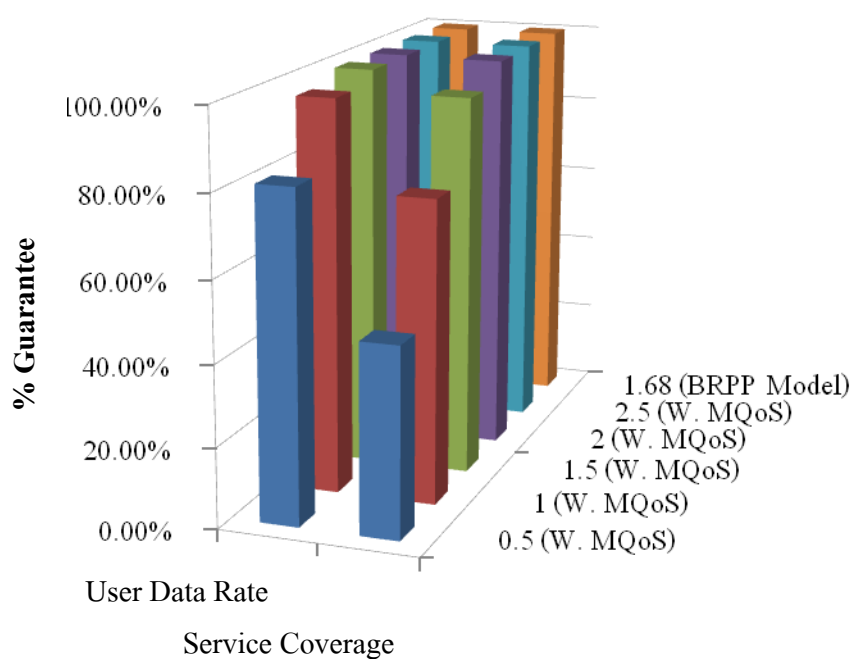
รูปที่ 4.13 แสดงผลการวางแผนเครือข่ายแบบถ่วงน้ำหนักในพื้นที่ให้บริการจริงภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน (ต่อ)



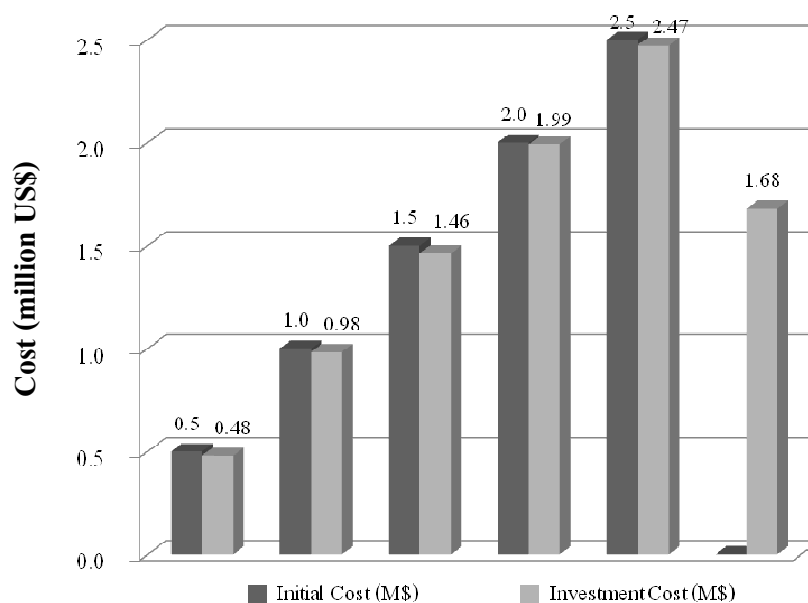
รูปที่ 4.13 แสดงผลการวางแผนเครือข่ายแบบถ่วงน้ำหนักในพื้นที่ให้บริการจริงภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน (ต่อ)

ตารางที่ 4.10 ผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน

พารามิเตอร์/ค่า	การวางแผนเครือข่ายโดยจำกัดงบประมาณการลงทุน					BRPP Model
งบประมาณตั้งต้น(M\$)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	ไม่จำกัด
งบลงทุนที่ใช้จริง(M\$)	0.480	0.984	1.464	1.992	2.472	1.680
จำนวนสถานีฐาน (BSs)	2	5	9	15	19	10
จำนวนสถานีถ่ายทอด (RSs)	5	8	8	4	4	10
จำนวน DPs ที่เครือข่ายรองรับ	168	201	207	207	207	207
จำนวน STPs ที่เครือข่ายรองรับ	361	578	728	770	770	770
การรับประกันอัตราเร็วทางกายภาพ	81.16%	97.10%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
การรับประกันสัญญาณครอบคลุม	75.06%	75.06%	94.55%	100.00%	100.00%	100.00%

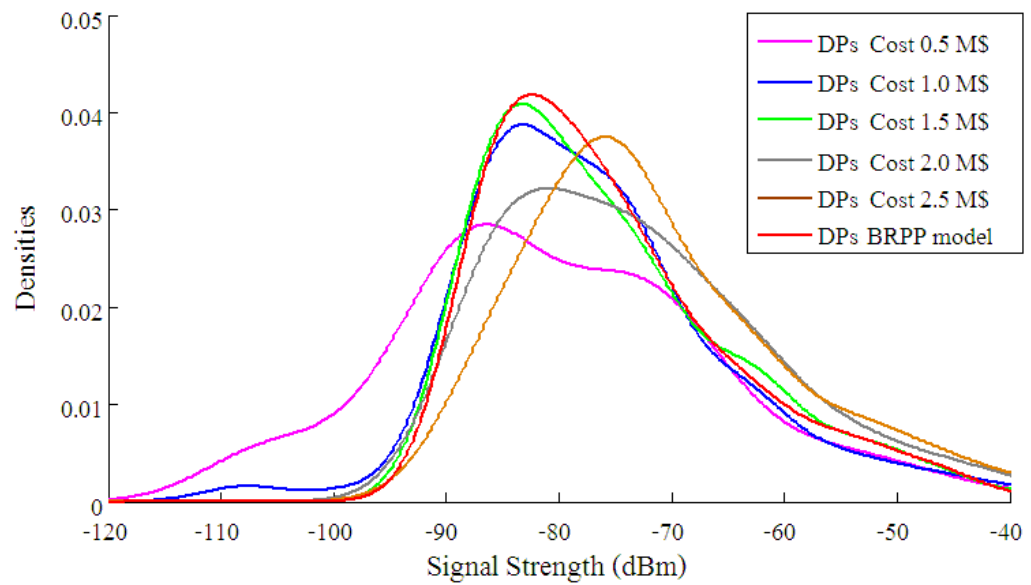


(ก) การรับประกันคุณภาพการให้บริการ

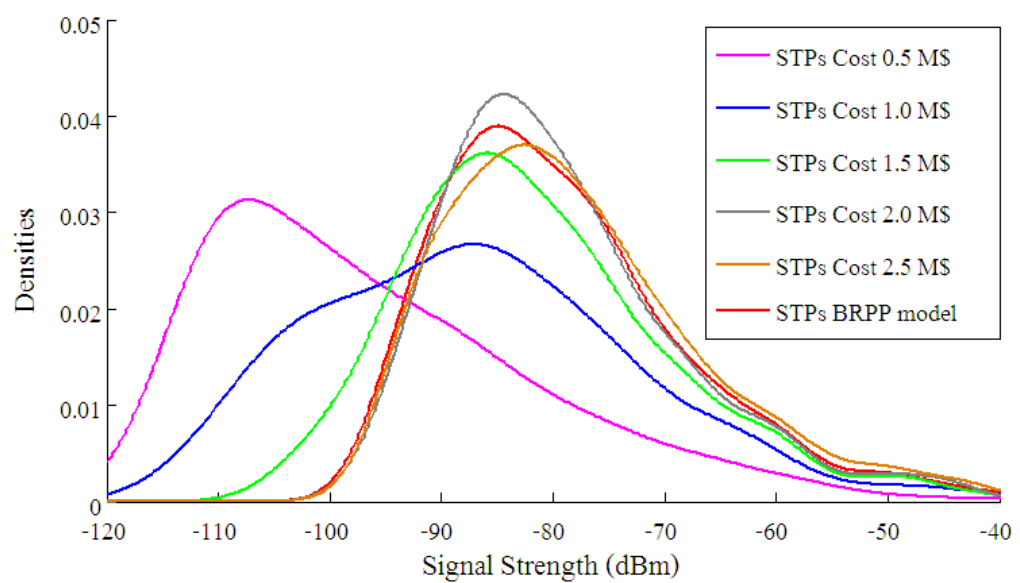


(ข) งบประมาณในการลงทุน

รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักในพื้นที่ให้บริการจริง ภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน (ต่อ)



(ค) ความหนาแน่นของความแรงสัญญาณที่ DPs รับได้จากเครือข่าย

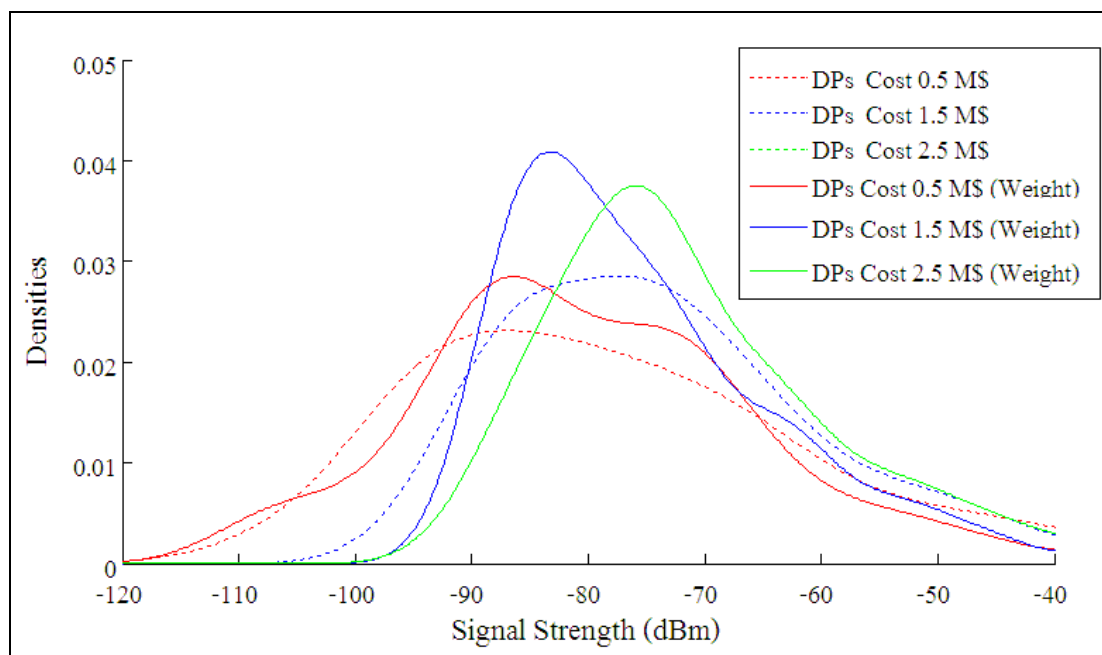


(ง) ความหนาแน่นของความแรงสัญญาณที่ STPs รับได้จากเครือข่าย

รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบผลการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักในพื้นที่ให้บริการจริง ภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน (ต่อ)

4.7.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองวางแผนเครือข่ายบนพื้นที่ให้บริการจริง ภายใต้งบประมาณจำกัด

สำหรับการพิจารณาวางแผนเครือข่ายบนพื้นที่จริงเพื่อหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน และสถานีถ่ายทอดภายใต้งบประมาณจำกัดนั้น เมื่อทำการถ่วงน้ำหนักพจน์ของผลรวมตำแหน่ง รับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) ในฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังหัวข้อที่ 4.7.2 มีผลทำให้ ตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) มีความสำคัญมากขึ้น เมื่อเทียบกับการพิจารณาค่า น้ำหนัก ของตำแหน่งรับประกันสัญญาณเท่ากับตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการในหัวข้อ ที่ 4.7.1 ซึ่งผลการเปรียบเทียบความสามารถในการครอบคลุมตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการ ให้บริการแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แสดงความหนาแน่นของสัญญาณที่จุดรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ

จากรูปที่ 4.15 แสดงการเปรียบเทียบการวางแผนเครือข่ายบนพื้นที่จริง ระหว่าง การพิจารณาค่าน้ำหนักของตำแหน่งรับประกันสัญญาณครอบคลุมเท่ากับตำแหน่งรับประกัน อัตราเร็วการให้บริการดังแสดงด้วยเส้นประ เทียบกับการพิจารณาค่าน้ำหนักของตำแหน่ง รับประกันอัตราเร็วการให้บริการมากกว่าตำแหน่งรับประกันสัญญาณครอบคลุมดังแสดงในด้วย เส้นทึบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในการจำกัดงบประมาณการลงทุนที่ 0.5 และ 1.5 ล้านเหรียญฯ ค่าความ หนาแน่นของสัญญาณที่จุดรับประกันอัตราเร็วการให้บริการของการวางแผนเครือข่ายทั้ง 2 วิธี

ให้ค่าต่างกัน โดยวิธีเพิ่มค่าถ่วงน้ำหนักจะได้ระดับสัญญาณที่จากเครือข่ายสูงกว่า แต่ในการจำกัดงบประมาณการลงทุนที่ 2.5 ล้านเหรียญฯ นั้นค่าความหนาแน่นสัญญาณที่จุดอัตราเร็วการให้บริการของการวางแผนเครือข่ายทั้ง 2 วิธีนั้นเท่ากันเนื่องจากสามารถให้บริการทุกตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) ได้ทั้งหมดอยู่แล้ว

4.8 สรุป

ในบทนี้ได้นำเสนอวิธีการวางแผนเครือข่ายในส่วนไร้สายของเครือข่ายไวแมกซ์โดยหาตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด และกำหนดตำแหน่งสำหรับรับประกันความแรงสัญญาณออกเป็นสองระดับคือ ตำแหน่งที่รับประกันคุณภาพการให้บริการ (DPs) และตำแหน่งที่รับประกันสัญญาณครอบคลุม (STPs) โดยจุดประสงค์ของการวางแผนเครือข่ายคือพยายามให้เครือข่ายสามารถรับประกันคุณภาพการบริการแก่ผู้ใช้งานให้ได้จำนวนมากที่สุด ภายใต้งบประมาณที่จำกัด ปัญหาการวางแผนเครือข่ายถูกแปลงเป็นสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี เพื่อคำนวณหาคำตอบที่ดีที่สุด ในการทดลองได้กำหนดข้อมูลตั้งต้นด้วยการสุ่มอย่างมีแบบแผน (Uniform Random) และทดลองวางแผนเครือข่ายภายใต้การจำกัดงบประมาณต่างกัน แล้วนำผลการวางแผนเครือข่ายที่ได้เปรียบเทียบกับ ซึ่งจำนวนผู้ใช้ที่เครือข่ายสามารถรับประกันคุณภาพการให้บริการจากการวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีที่นำเสนอในบทนี้แปรผันตามงบประมาณการลงทุน และได้ทำการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริงซึ่งสามารถวางแผนเครือข่ายได้ตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้ นอกจากนั้นยังได้ทำการทดลองถ่วงน้ำหนักฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความสำคัญให้กับตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) ซึ่งทำให้ความแรงสัญญาณที่ตำแหน่งรับประกันอัตราเร็วการให้บริการ (DPs) รับได้จากเครือข่ายมีค่ามากขึ้น จึงทำให้เครือข่ายที่วางแผนสามารถรองรับผู้ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่างบประมาณลงทุน

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

งานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิคการวางแผนไวแมกซ์โดยหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด สำหรับระบบไวแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อ บนพื้นฐานของระบบโทรศัพท์แบบเซลลูลาร์ การดำเนินวิจัยเริ่มจากการศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งพบว่า การวางแผนเครือข่ายของระบบไวแมกซ์นั้นยังไม่ครอบคลุมถึงเงื่อนไขการรับประกันอัตราเร็วการให้บริการและสัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการ ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงมุ่งคิดค้นเทคนิคการวางแผนเครือข่ายเพื่อครอบคลุมถึงปัญหาดังกล่าว โดยในขั้นแรกได้ทำการทดลองวางแผนเครือข่าย บนพื้นที่ทดลองขนาด 9 ตารางกิโลเมตร โดยการวางแผนเครือข่ายมีจุดประสงค์เพื่อลดงบประมาณการลงทุนให้เหลือน้อยที่สุด และมีเงื่อนไขคือการรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน โดยรับประกันอัตราเร็วในการเชื่อมต่อ และสัญญาณครอบคลุมทั่วพื้นที่ให้บริการ ซึ่งได้ทำการทดลองวางแผนเครือข่ายด้วยวิธีต่าง ๆ ได้แก่ การวางแผนเครือข่ายโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดมูลค่าการลงทุน การวางแผนเครือข่ายโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดมูลค่าการลงทุนพร้อมกับลดกำลังส่งจากสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด การทดสอบวางแผนเครือข่ายโดยกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานให้กระจายตัวเท่ากัน และการทดสอบหาวางแผนเครือข่ายโดยใช้วิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน สำหรับวิธีการวางแผนเครือข่ายโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดงบประมาณการลงทุน และวิธีการวางแผนเครือข่ายโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดมูลค่าการลงทุนพร้อมกับลดกำลังส่งจากสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดนั้น ได้นำเทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี (0-1 Integer Programming) สร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อการวางแผน โดยการวางแผนเครือข่าย ซึ่งการวางแผนเครือข่ายในแต่ละวิธีได้ให้ผลการวางแผนเครือข่ายโดยมีจำนวนและตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดแตกต่างกันออกไป จากนั้นได้ทำการวิเคราะห์คุณภาพการให้บริการจากสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดที่ได้จากการวางแผน โดยเน้นที่ระดับสัญญาณที่เครือข่ายสามารถทำการเชื่อมต่อกับผู้ใช้งาน และความสามารถในการรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้งาน หลังจากการวางแผนเครือข่ายบนพื้นที่ทดลองขนาด 9 ตารางกิโลเมตรแล้ว ได้นำสมการคณิตศาสตร์จากเทคนิคโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีมาวางแผนเครือข่ายบนพื้นที่ให้บริการจริง ซึ่งได้เลือกพื้นที่ขนาด 46 ตารางกิโลเมตรในเขตตัวเมืองของจังหวัดนครราชสีมา และเลือกใช้ตำแหน่งสำหรับติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดจาก

ตำแหน่งที่ติดตั้งสถานีฐานของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีอยู่ก่อนแล้วเพื่อลดงบประมาณในการลงทุน โดยการวางแผนเครือข่ายบนพื้นที่จริงนั้นได้ให้ผลการวางแผนเครือข่ายได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ

และนอกจากนี้เพื่อให้การวางแผนเครือข่ายโดยหาตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานหละสถานีถ่ายทอด สำหรับระบบไวแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อ ครอบคลุมถึงปัญหาการวางแผนเครือข่ายของผู้ให้บริการเครือข่าย ที่มีงบประมาณในการลงทุนจำกัด ซึ่งต้องวางแผนเครือข่ายภายใต้งบประมาณที่มีอยู่ให้สามารถรับประกันคุณภาพการให้บริการแก่ผู้ใช้งานได้มากที่สุด โดยเริ่มทดลองวางแผนเครือข่ายภายใต้การจำกัดงบประมาณการลงทุนในพื้นที่ทดลองขนาด 9 ตารางกิโลเมตร ในรูปแบบต่าง ๆ คือ ระเบียบวิธีการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี การวางแผนเครือข่ายโดยกำหนดตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานให้กระจายตัวเท่ากัน และการทดสอบวางแผนเครือข่ายโดยใช้วิธีคาดคะเนตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐาน โดยกำหนดงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่ายในมูลค่าต่าง ๆ จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการวางแผนเครือข่ายโดยมุ่งประเด็นไปที่ความสามารถในการรับประกันคุณภาพการให้บริการ และได้ทำการวางแผนเครือข่ายโดยใช้ระเบียบวิธีการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีบนพื้นที่ให้บริการจริงในพื้นที่ตัวเมืองนครราชสีมาด้วย โดยแบ่งการวางแผนเครือข่ายบนพื้นที่จริงเป็น 2 วิธีคือ การวางแผนเครือข่ายบนพื้นที่จริงภายใต้การจำกัดงบประมาณ โดยให้ความสำคัญของตำแหน่งสำหรับรับประกันอัตราเร็วการให้บริการเท่ากับตำแหน่งสำหรับรับประกันสัญญาณครอบคลุม และการวางแผนเครือข่ายบนพื้นที่จริงภายใต้การจำกัดงบประมาณ โดยให้ความสำคัญของตำแหน่งตำแหน่งสำหรับรับประกันอัตราเร็วการให้บริการมากกว่าตำแหน่งสำหรับรับประกันสัญญาณครอบคลุม ซึ่งวิธีหลังนี้สามารถรองรับจำนวนผู้ใช้งานได้มากกว่าจึงเหมาะสำหรับการวางแผนเครือข่ายที่มีงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่ายน้อย

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ การพัฒนาการวางแผนเครือข่ายสำหรับระบบไวแมกซ์แบบสถานีถ่ายทอดหลายช่วงเชื่อมต่อให้ครอบคลุมถึงการรับประกันอัตราเร็วการให้บริการและการรับประกันสัญญาณครอบคลุมเพื่อการปรับปรุงและพัฒนาการวางแผนเครือข่ายที่ใช้ในปัจจุบัน และยังสามารถนำสมการดังกล่าวไปเป็นต้นแบบเพื่อการวางแผนเครือข่ายระบบสื่อสารไร้สายที่มีพื้นฐานจากระบบโทรศัพท์แบบเซลลูลาร์ได้ในอนาคต นอกจากนี้ยังได้ทำการพัฒนาสมการแบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารี โดยมีวัตถุประสงค์ของการวางแผนเครือข่ายให้ใช้งบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่ายน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขในการรับประกันคุณภาพการให้บริการ และวัตถุประสงค์ของการวางแผนเครือข่ายให้เพิ่มการรับประกันคุณภาพการให้บริการภายใต้เงื่อนไขด้านการจำกัดงบประมาณ และส่วนท้ายของงานวิจัยนี้ได้นำเสนอสมการแบบโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีที่พัฒนาได้ไปใช้ในการวางแผนเครือข่าย บนพื้นที่ให้บริการจริง ซึ่งสามารถนำ

สมการดังกล่าววางแผนเครือข่ายโดยเลือกตำแหน่งที่ตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดที่เหมาะสม และยังสะท้อนถึงการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่จริงว่า งบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่ายนั้น เป็นข้อจำกัดหลักอย่างหนึ่งในการวางแผนเครือข่าย

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการวางแผนเครือข่ายในงานวิจัยนี้ได้คำนึงถึงการรับประกันคุณภาพการให้บริการ ทั้งในด้านอัตราเร็วในการเชื่อมต่อ และสัญญาณครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ โดยกำหนดให้ความสามารถในการรองรับปริมาณข้อมูลที่สถานีฐานหรือสถานีถ่ายทอดเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ผู้ใช้งานนั้นมีไม่จำกัด ซึ่งอุปกรณ์ของระบบไวแมกซ์ในเครือข่ายที่ใช้งานจริงนั้นมีความสามารถจำกัดในการรองรับทั้งปริมาณผู้ใช้งานที่เข้ามาอยู่ในพื้นที่ให้บริการและปริมาณความจุของข้อมูลในการรับส่งระหว่างเครือข่ายกับผู้ใช้งาน ดังนั้นหากต้องการวางแผนเครือข่ายระบบไวแมกซ์ให้ครอบคลุมถึงปัญหาเหล่านี้ควรเพิ่มการกำหนดสมการการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไปนารีในส่วนของเงื่อนไขให้ครอบคลุมถึงเรื่องความสามารถในการรองรับปริมาณการใช้งานที่เครือข่ายรับประกันให้แก่ผู้ใช้งานด้วย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวางแผนเครือข่ายโดยพยากรณ์การลดทอนสัญญาณด้วยแบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถี (Path Loss Model) โดยเลือกใช้แบบจำลองที่เหมาะสมกับการส่งสัญญาณของเครือข่ายไวแมกซ์คือแบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถีของมหาวิทยาลัยสแตนฟอร์ด (Stanford University Interim Model : SUI Model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีตัวแปรหลากหลายตามสภาพพื้นที่และมีแฟกเตอร์แก้ไข (Correction Factor) เพื่อปรับค่ากำลังการสูญเสียให้ถูกต้องมากที่สุด แต่อย่างไรก็ตามแบบจำลองการสูญเสียกำลังตามแนววิถีนี้ยังคงเป็นค่าประมาณจากการสำรวจ ซึ่งเมื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์สถานีฐานและสถานีถ่ายทอดและให้บริการไปแล้วอาจมีบางพื้นที่ที่ยังมีปัญหาด้านสัญญาณ ดังนั้นเมื่อผู้ให้บริการเครือข่ายนำเทคนิคการออกแบบเครือข่ายจากงานวิจัยนี้ไปใช้ในการวางแผนเครือข่ายจริงแล้ว ควรมีการทดสอบวัดสัญญาณภายหลังการให้บริการ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการวางแผนเครือข่าย แก้ไขปัญหาพื้นที่ที่มีปัญหาเรื่องสัญญาณและเพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาเครือข่ายต่อไป

5.3 งานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยได้นำเสนอการวางแผนเครือข่ายระบบไวแมกซ์โดยหาตำแหน่งติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด ซึ่งจำกัดจำนวนช่วงเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้งานกับเครือข่ายไว้ไม่เกิน 2 ช่วง คือผู้ใช้งานเชื่อมต่อกับสถานีฐานโดยตรง หรือผู้ใช้งานเชื่อมต่อกับสถานีฐานผ่านสถานีถ่ายทอด 1 สถานี ซึ่งสมการโปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไปนารีในงานวิจัยนี้สามารถพัฒนาให้สามารถวางแผน

เครือข่ายให้สามารถรองรับจำนวนช่วงเชื่อมต่อระหว่างผู้ใช้งานกับเครือข่ายให้ได้มากกว่า 2 ช่วง เพื่อเป็นการเพิ่มคุณภาพการให้บริการเครือข่าย และลดงบประมาณในการลงทุนสร้างเครือข่ายให้มากขึ้น

การวางแผนเครือข่ายในงานวิจัยนี้ได้ทำการวางแผนเครือข่ายไว้มาก่อนบนพื้นที่ที่ไม่มี การให้บริการเครือข่ายไว้มาก่อน ซึ่งสามารถใช้ได้ดีในการวางแผนเครือข่ายเพื่อติดตั้ง อุปกรณ์ในครั้งแรก แต่ถ้าภายหลังการติดตั้งอุปกรณ์สถานีฐานและสถานีถ่ายทอดไปแล้วมี งบประมาณสำหรับติดตั้งเครือข่ายเพิ่มอีก หรือมีความต้องการของผู้ใช้งานในพื้นที่ที่ไม่มี การบริการครอบคลุมไปถึงมากขึ้น ย่อมต้องมีการขยายเครือข่ายเพื่อที่จะรองรับปริมาณการใช้งาน ดังกล่าว ซึ่งสมการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีในงานวิจัยนี้สามารถปรับปรุงให้สามารถ วางแผนเครือข่ายในส่วนต่อขยาย หรือพื้นที่ที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ไว้มาก่อนอยู่แล้วได้

และเนื่องจากการวางแผนเครือข่ายบนพื้นที่จริงที่เป็นพื้นที่กว้างใหญ่ อาจมีจำนวนของ ตำแหน่งสำหรับเลือกติดตั้งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด รวมถึงตำแหน่งสำหรับรับประกัน อัตราเร็วการให้บริการและตำแหน่งสำหรับรับประกันสัญญาณครอบคลุม โดยเฉพาะการเพิ่ม ตำแหน่งสำหรับรับประกันสัญญาณครอบคลุมให้กระจายตัวดีขึ้น เมื่อต้องการรับประกันสัญญาณ ครอบคลุมพื้นที่ให้บริการ ได้ดีขึ้นดังนั้นสมการ โปรแกรมเชิงเส้นจำนวนเต็มไบนารีต้องจัดการกับ จำนวนตัวแปรที่เพิ่มมากขึ้นทำให้กระบวนการในการหาคำตอบต้องอาศัยเวลาที่ยาวนานขึ้นกว่าเดิม และการกำหนดเงื่อนไขของสมการซับซ้อนมากขึ้นก็ส่งผลถึงเวลาในการคำนวณหาคำตอบที่ยาวนาน ขึ้นด้วย ดังนั้นเพื่อให้บรรลุการวางแผนเครือข่ายในพื้นที่ขนาดใหญ่และเงื่อนไขการวางแผน เครือข่ายที่ซับซ้อน ภายในระยะเวลาที่ยอมรับได้ จึงมีความจำเป็นที่ควรทำการศึกษาและพัฒนา เทคนิคที่ใช้ในการหาคำตอบที่เหมาะสมได้โดยอยู่ภายในระยะเวลาที่เหมาะสม

รายการอ้างอิง

- ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ. (2546). **หลักการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่**. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์
แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. พิมพ์ครั้งที่ 2, 401 หน้า.
- รายงานการศึกษาแนวทางการจัดสรรคลื่นความถี่สำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเครือข่ายไร้สาย
WiMAX ในประเทศไทย. (2549). ม.ป.ป. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานคณะกรรมการ
กิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ.
สมชัย ชินะตระกูล และอนันต์ เกิดคำ. (2552). **การวิจัยดำเนินงานเบื้องต้น** (ออนไลน์). สืบค้นจาก
http://www.scaat.in.th/Bachelor/new/1_2552/ [1 เมษายน 25454]
- Rapaport, T. S. (1996). **Wireless Communications**, Second edition: Prentice-Hall.
- Hurley, S. (2000). **Automatic Base Station Selection and Configuration in Mobile Networks**.
IEEE VTS-Fall , Vehicular Technology Conference 2000. (pp 2585 – 2592)
- Allen, S. M., et al (2001). **Automatic Cell Planning of Broadband Fixed Wireless Networks**.
IEEE VTS 53rd , Vehicular Technology Conference 2001. (pp 2808 – 2812)
- Stuber, G. L. (2002), **Principle of Mobile Communication**, Second edition. New York: Kluwer
Academic Publishers.
- Hillier, F. S., and Lieberman, G. J. (2005), **Introduction to Operations Research**, eight edition.
Singapore: McGraw-Hill.
- Rawnsley, R. K., and Hurley, S. (2005). **Towards Automatic Cell Planning**. The 11th IEEE
International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications 2000,
(pp 1583 – 1588)
- Fragoso, J. G., and Tejada, G. M. (2005). **Cell Planning Based on the WiMax Standard for
Home Access: A Practical Case**. The 2nd International Conference on Electrical and
Electronics Engineering. (pp 89 – 92)
- Velez, F. J., et al (2006). **Cell Planning Based on the WiMax Standard for Home Access : A
Practical Case**. The 1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing.
- Lannoo, B., et al (2007). **Business Scenarios for a WiMAX Deployment in Belgium**. IEEE
Mobile WiMAX Symposium 2007. (pp 132 – 137)

- Neves, P., et al (2007). **WiMAX for Emergency Services: An Empirical Evaluation**. The International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies. (pp 340 – 345)
- Theodoros, T., et al (2007). **WiMax Network Planning and System's Performance Evaluation**. IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2007. (pp 1948 – 1953)
- Marques, M., et al (2007). **Design and Planning of IEEE 802.16 Networks**. The 18th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. (pp 1 – 5)
- Teterin, V., Hurley, S., and Allen, S. M. (2007). **Optimizing Performance of WiMAX Networks through Automated Site Selection**. The Convergence of Telecommunications, Networking and Broadcasting 2007.
- Mousavi, M., Chamberlanda, S., and Quintero, A. (2007). **A New Approach for Designing WiMAX Networks**. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2007. (pp 487 – 490)
- Teterin, V., Hurley, S., and Allen, S. M. (2008). **A Staged Optimization Framework for Cost Optimized WiMax Network Design**. The 4th International Conference on Wireless and Mobile Communications 2008. (pp 185 – 190)
- Yang, Y., Murphy, S., and Murphy, L. (2008). **Planning Base Station and Relay Station Locations in IEEE 802.16j Multi-hop Relay Networks**. Consumer Communications and Networking Conference 2008. (pp 922 - 926)
- Murphy, S., and Murphy, L. (2008). **A Clustering Approach to Planning Base Station and Relay Station Locations in IEEE 802.16j Multi-hop Relay Networks**. IEEE International Conference on Communications 2008. (pp 2586 - 2591)
- Lin, B., et al (2008). **Relay Station Placement in IEEE 802.16j Dual-Relay MMR Networks**. IEEE International Conference on Communications 2008. (pp 3437-3441)
- Upase, B. and Hunukumbure, M. (2008). **Dimensioning and Cost Analysis of Multihop Relay-Enabled WiMAX Networks**. FUJITSU Sci. Tech. J., 44. (pp 303 - 317)
- Abate, Z. (2009), **WiMAX RF Systems Engineering**. Boston: Artechhouse.

ภาคผนวก ก

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Prommak, C., and Wechtaison, C. (2010). **WiMAX Network Design and Optimization Using Multi-hop Relay Stations**. Proceeding. of the 10th International Conference on Applied Informatics and Communications (AIC), 20-22 Aug 2010, (pp. 75 – 80)

Prommak, C., and Wechtaison, C. (2010). **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)

WiMAX Network Design and Optimization Using Multi-hop Relay Stations

CHUTIMA PROMMAK, CHITAPONG WECHTAISON
Department of Telecommunication Engineering
Suranaree University of Technology
Nakhon Ratchasima, 30000 THAILAND
cprommak@sut.ac.th

Abstract: - This paper presents a novel network design and optimization model for mobile WiMAX access networks utilizing multi-hop relays. The proposed model aims to determine optimal locations of base stations and relay stations so that the network can guarantee quality of services in term of the access data rate and the service coverage to serve potential user traffic demand in the target service area. Numerical network design results demonstrate that the proposed model can improve the user access data rate up to 60% and enhance the network service coverage up to 12% compared with the other existing models in literature.

Key-Words: - WiMAX, Access networks, Network optimization, Network design, Wireless Networks

1 Introduction

WiMAX (Wireless Interoperability for Microwave Access) network technology has become potential solutions to bring broadband internet access to people in the remote area where a wired network infrastructure cannot reach. With the support of the IEEE 802.16j standard, one can deploy the network topology using multi-hop relay stations (RSs) to enhance services of the base stations. As illustrated in fig.1, RSs can provide coverage extension to the cell boundary area, the shadowing area and the coverage-hole area [1]. To enable network operators to provide low cost coverage with the quality of services guarantee, there is a need for an efficient network design.

Several works have devoted to the study of wireless network design problems. [2-3] present studies of the radio network planning for cellular networks. In [4-8], the authors consider WiMAX radio network planning and present the practical network deployment with performance analysis and evaluation. Although the results give insight of the real network performance, the mathematical model was not used to optimize the network installation. Later works in [9-11] proposed mathematical models for the base station (BS) placement problems. The objective was to minimize the network cost but the multi-hop relay topology was not considered.

In [12], the authors proposed an Integer Programming formulation dealing with the BS and RS placement problem for the WiMAX multi-hop relay networks. The objective was to determine the

locations of BSs and RSs by minimizing the network cost and the normalized path losses between the user demand locations and BS/RS locations. While their contribution is significant, the proposed planning method could not provide quality of services guarantee. For this reason, efficient WiMAX network design techniques are needed.

In our paper we propose a novel WiMAX network design approach, accounting for the quality of services guarantee in the design process. Specifically, we aim to solve the BS and RS placement problem (BRPP) for the WiMAX networks that can guarantee the network service coverage and the physical bit rate to the target users by deploying not only the BSs but also the multiple hop RSs in the WiMAX networks.

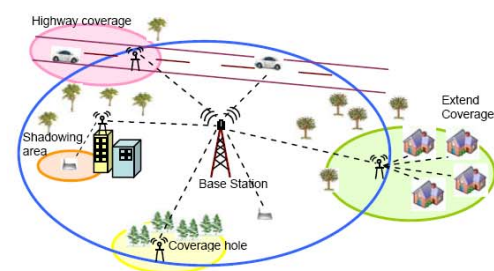


Fig.1 Relay station deployment

The rest of the paper is organized as followed. Section II provides the problem definition and describes the problem formulation. Section III presents numerical results and discussion which focus on the performance of the different network planning models. Finally, section IV concludes the paper.

2 Problem Formulation

2.1 Problem Definition

In the WiMAX network design, we consider the BS and RS Placement Problem (BRPP) which involve selecting locations to install the BSs and the RSs from candidate sites of BS and RS, respectively.

The multiple-hop network configuration is formed in the way that the users can access the network directly through the BSs or indirectly via the RSs which connect to the BSs. Specifically, the proposed model aims to determine the minimum number of BSs and RSs to be installed in the target service area of the WiMAX networks so that the multi-hop relay network configuration can be formed and the resulting networks can guarantee the quality of services in term of the user access rate and the network service coverage.

In the network design model, we consider that BSs and RSs operate at the same transmitting power (a specified value). We consider that the user demand is modeled by Demand Points (DPs) which represent the geographic distribution of the expected user traffic in the service area and the target service area is represented by a set of discrete grid points called Signal Test Points (STPs) at which the received signal strength is tested. The network quality of services in term of the user access rate and the network service coverage are incorporated in the model via the received sensitivity requirement at DPs and STPs, respectively. Such requirements in turn provide the user access rate guarantee.

2.2 Problem Formulation

The WiMAX network design problem is formulated as an Integer Linear Programming (ILP) model, denoted as a BRPP model. Table 1 shows the notation used in the model. The BRPP model aims to minimize the network cost, including the BS and RS installation cost. This can be written as the objective function (1).

$$\text{Minimize } \sum_{j \in B} F_j \beta_j + \sum_{i \in R} E_i \gamma_i \quad (1)$$

Table 1 Notation

Sets:	
B	A set of candidate sites to install base stations (BSs)
R	A set of candidate sites to install relay stations (RSs)
D	A set of demand points (DPs)
T	A set of best signal test points (STPs)
Decision variables:	
β_j	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the BS is installed at site j , $j \in B$; 0 otherwise
γ_i	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the RS is installed at site i , $i \in R$; 0 otherwise
u_{hj}	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the STP h is assigned to BS j , $h \in T$ and $j \in B$; 0 otherwise
v_{hi}	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the STP h is assigned to RS i , $h \in T$ and $i \in R$; 0 otherwise
x_{gj}	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the DP g is assigned to BS j , $g \in D$ and $j \in B$; 0 otherwise
y_{gi}	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the DP g is assigned to RS i , $g \in D$ and $i \in R$; 0 otherwise
w_{ij}	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the RS i is assigned to BS j , $i \in R$ and $j \in B$; 0 otherwise
Constant parameters:	
F_j	Cost to install base station j , $j \in B$
E_i	Cost to install relay station i , $i \in R$
P_t	The received signal strength threshold for STPs
P_d	The received signal strength threshold for DPs
P_r	The received signal strength threshold for RSs
P_{hj}	The signal strength that a STP h receives from BS j , $h \in T$ and $j \in B$
P_{hi}	The signal strength that a STP h receives from RS i , $h \in T$ and $i \in R$
P_{gj}	The signal strength that a DP g receives from BS j , $g \in D$ and $j \in B$
P_{gi}	The signal strength that a DP g receives from RS i , $g \in D$ and $i \in R$

We incorporate the network design requirements into the mathematical model through three sets of constraints, denoted $C1$, $C2$, and $C3$. $C1$ consists of constraints that ensure the network service coverage. $C2$ is a set of constraints that guarantee the user traffic accommodation and access rate requirements. The last set $C3$ consists of constraints that ensure the BS-RS connections.

$C1$: Network service coverage

$$\sum_{j \in B} u_{hj} + \sum_{i \in R} v_{hi} \geq 1, \quad \forall h \in T \quad (2)$$

$$u_{hj} \leq \beta_j, \quad \forall h \in T, \forall j \in B \quad (3)$$

$$v_{hi} \leq \gamma_i, \quad \forall h \in T, \forall i \in R \quad (4)$$

$$u_{hj}(P_{hj} - P_t) \geq 0, \quad \forall h \in T, \forall j \in B \quad (5)$$

$$v_{hi}(P_{hi} - P_t) \geq 0, \quad \forall h \in T, \forall i \in R \quad (6)$$

Constraints (2) – (6) ensure that the network can provide signal coverage in the target service area by assessing the signal strength at each STP h and specifying that the signal strength received at STP h from BS j or RS i must be greater than the threshold P_r .

C2: User traffic accommodation and access rate guarantee

$$\sum_{j \in B} x_{gj} + \sum_{i \in R} y_{gi} \geq 1, \quad \forall g \in D \quad (7)$$

$$x_{gj} \leq \beta_j, \quad \forall g \in D, \quad \forall j \in B \quad (8)$$

$$y_{gi} \leq \gamma_i, \quad \forall g \in D, \quad \forall i \in R \quad (9)$$

$$x_{gj}(P_{gj} - P_d) \geq 0, \quad \forall g \in D, \quad \forall j \in B \quad (10)$$

$$y_{gi}(P_{gi} - P_d) \geq 0, \quad \forall g \in D, \quad \forall i \in R \quad (11)$$

Constraints (7) – (11) specify that the network can accommodate all predicted traffic demand and guarantee the user access rate. These constraints ensure that the signal strength that user at DP g receives from the BS j or the RS i is greater than the threshold P_d so that the physical transmission data rate can be achieved.

C3: BS-RS connections

$$\sum_{j \in B} w_{ij} = \gamma_i, \quad \forall i \in R \quad (12)$$

$$w_{ij} \leq \beta_j, \quad \forall i \in R, \quad \forall j \in B \quad (13)$$

$$w_{ij}(P_{ij} - P_r) \geq 0, \quad j \in B, \quad \forall i \in R \quad (14)$$

Constraints (12)–(14) enforce BS-RS connection. Constraint (12) ensures that each RSs can connect to only one BS. Constraint (13) ensures that RSs connect to BSs that are installed. Finally, constraint (14) ensure that the signal strength that between RS i and BS j is greater than the threshold P_r .

3 Numerical Results

In this section we present numerical study and analysis demonstrating the WiMAX network design using the proposed BRPP model. We compare our model with those presented in [12] of which the objective function is to minimize the weighted functions of the installation cost and the path loss. We call this a Weighted Objective Function (WOF) approach. Our model, on the other hands, aims to minimize the installation cost but does not minimize path loss. In stead, we incorporate the path loss

function in the constraints where we calculate the received signal strength to guarantee the signal strength level that can ensure the minimum user access data rate requirement provided by the resulting WiMAX networks.

3.1 Description

In numerical experiments, we use the design scenarios of the service area of size 3km×3km as shown in fig.2. The number of candidate sites to install BSs and RSs are 20 and 60, respectively. There are 200 DPs and 256 STPs (grid size of 200m×200m). We consider the cost of each BS and RS are \$120,000 and \$40,000 which are an approximate cost from typical suppliers [13]. We consider the WiMAX standards IEEE 802.16. Table 2 shows the parameters used in the numerical studies (see [13] for more details). Table 3 presents the minimum received signal strength (in dBm) to be able to achieve a certain physical access rate

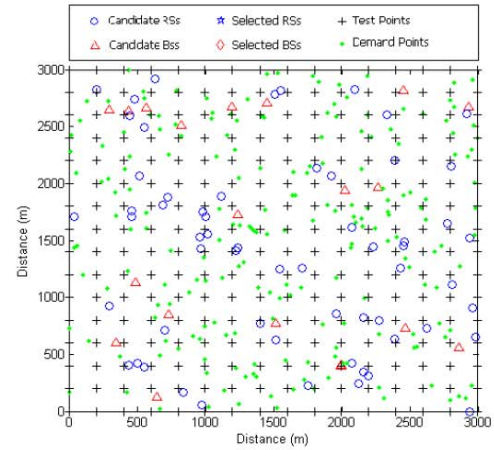


Fig.2 Numerical experiment setup.

Table 2 Parameters Used in Numerical Experiments

Parameters	Value
Height of BSs and RSs	60 m
Height of TPs	2 m
Transmitted Power	35 dBm
Transmitted antenna gain	16 dBi
Received antenna gain	2 dBi
Frequency	2.5 GHz
Terrain type	C
Bandwidth	3.5 MHz
Data rate requirement for DPs	12.71 Mbps
Data rate requirement for STPs	5.64 Mbps
Cost of each base station	120,000 \$
Cost of each relay station	40,000 \$

Table 3 Receiver Sensitivity Threshold for Physical Bit Rate Requirement (Alvarion BreezeMAX at 3.5 MHz)

Modulation techniques	Physical bit rate (Mbps)	Receiver sensitivity threshold (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

according to the choices of modulation techniques. The transmit power of each BS and RS used for the tests are 35 dBm which are typical values used in the WiMAX networks [6].

3.2 Propagation model

It is necessary to compute the received signal strength at DPs and STPs and input the obtained values in the BRPP model to find the optimal locations to install BSs and RSs. This computation can be done by using the propagation model. In this paper we use the Stanford University Interim (SUI) model which is recommended by the IEEE 802.16 to evaluate the path loss in WiMAX networks [16].

The SUI path loss equation is presented in [16], [17]. The path loss equation is written here in Eq. (15). It computes the propagation loss as a function of the distance, d , between the transmitter and the receiver. It uses correction factors X_f and X_h for the operating frequency and the receiver antenna height. Additionally, the SUI model takes into account the network environment (terrain) via the use of the path loss exponent n . The network environment is classified into three types, namely A, B, and C. Type A characterizes the hilly terrain with medium to high tree density. Type B characterizes the flat terrain with medium to high tree density or the hilly

$$PL = A + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_h + s \quad (15)$$

$$A = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (16)$$

$$n = a - bh_b + c / h_b \quad (17)$$

$$X_f = 6.0 \log_{10} \left(\frac{f}{2000} \right) \quad (18)$$

$$X_h = -10.8 \log_{10} \left(\frac{h_r}{2} \right) \quad \text{for terrain type A, B} \quad (19)$$

$$X_h = -20.0 \log_{10} \left(\frac{h_r}{2} \right) \quad \text{for terrain type C} \quad (20)$$

Table 4 Parameters used in the SUI model

Parameter	Terrain A	Terrain B	Terrain 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

Table 5 Notation used in the SUI model

Notation	Definition
A	Path loss at the reference distance d_0
N	Path loss exponent
D	Distance (m.) between the transmitter and the receiver
D_0	Reference distance (100 m.)
X_f	Correction factors for the operating frequency
X_h	Correction factors for the receiver antenna height
s	Shadow fading factor (dB)
h_b	Transmitter antenna height (m.)
h_r	Receiver antenna height (m.)
f	Operating frequency

terrain with light tree density. Type C characterizes the flat terrain with light tree density. The path loss exponent, n , for the specified terrain type is computed by Eq. (17) of which the values of the constant parameter a , b and c are given in Table 4. Table 5 describes notation used in the SUI model.

3.3 Results and Analysis

We input the set of BS and RS candidate sites and other parameters to the BRPP model. We then solve the WiMAX network design by implementing the BRPP model with the ILOG-OPL development studio and solving with CPLEX 5.2 optimization solver. Computations are performed on an Intel Centrino Core2 Duo Processor 2.0 GHz and 2GB of RAM.

Fig.3 shows the WiMAX network configuration designed by the BRPP model. It depicts the selected sites to install BSs and RSs. The figure also presents the service coverage area of the resulting network. By using four BSs and six RSs in the resulting configuration, we can achieve 100% service coverage through out the required area and guarantee the physical access rate to all DPs in the area. The cost of the resulting network is \$768,000.

Table 6 shows numerical results comparing the network design using the BRPP model and that using the WOF model [12]. The performance matrices used for the comparison included the network cost, the number of installed BSs and RSs, and the quality of services in term of the user access

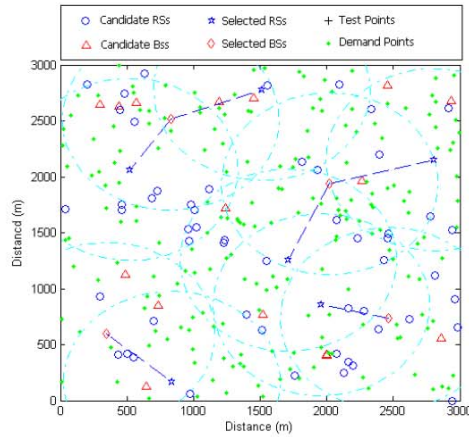


Fig.3 Selected BS and RS sites and the resulting service coverage

rate guarantee and the service coverage guarantee. The results show that although the BRPP model yields the network cost higher than that of the WOF model, the BRPP model yields the network configuration that can guarantee the user access data rate 60% higher than that designed by the WOF model. Furthermore, the network designed by the BRPP model can provide 100% service coverage which is more than 10% higher than that designed by the WOF model.

Table 7 shows numerical results comparing various cases of the network design imposing different conditions on the data rate requirements. The results show tradeoffs between the network costs and the achievable user data rates. If the network operators want to provide the service access rate at 12.71 Mbps throughout the service area (represented by DPs and STPs), the network cost would be about 6% higher than the case that only providing the service rate at 12.71 Mbps to the area with high density of target users (represented by DPs) whereas the other areas (represented by STPs) guarantee the access rate at 5.64 Mbps. Comparing to the case that imposes the data rate guarantee at 5.64 Mbps over the whole service area, the network cost is 62% lower than the case imposing the data rate guarantee at 12.71 Mbps in the service area.

4 Conclusion

This paper presents a novel mathematical model for an efficient design of the WiMAX network using multi-hop relay topology. We formulate the problem

Table 6 Result Comparison

Parameter Name	BRPP model	WOF model
Installation cost	768,000\$	264,000\$
Number of BSs used	4	1
Number of RSs used	6	3
Number of served DPs	200	80
Number of served STPs	256	226
Guarantee user access data rate	100%	40%
Guarantee service coverage	100%	88.28%

Table 7 Vary User Access Rate Requirement

Data Rate Requirement (Mbps)		Network Cost (\$10 ³)	Number of BSs used	Number of RSs used
at DP	at STP			
12.71	12.71	8.16	4	7
12.71	5.64	7.68	4	6
5.64	5.64	3.12	1	4
2.82	2.82	1.68	1	1

as an Integer Linear Programming problem. The objective is to minimize the network installation cost and guarantee the quality of services in term of the user access rate and the network service coverage. From numerical results we can conclude that incorporating the network design requirements into the constraints of the mathematical model can greatly improve the quality of services of the resulting networks in term of the user access rate and the network service coverage. However, it would be interesting to study the effects of different user access rate guarantee on the network cost. We currently explore this issue.

Acknowledgment:

This work was supported by the research fund from Suranaree University of Technology, Thailand.

References:

- [1] B. Upase and M. Hunukumbure, "Dimensioning and cost analysis of multihop-relay-enabled WiMAX networks," *Fujitsu Science Technology Journal*, vol. 43, no. 4, pp. 303 – 317, July 2008.
- [2] R. Kapp Rawnsley, S. Hurley, "Towards automatic cell planning," in *Proc. of the 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol.2, pp. 1583 – 1588, 18-21 Sept 2000.
- [3] J. Garcia-Fragoso and G.M. Galvan-Tejada, "Cell planning based on the WiMAX standard for home access: a practical case," in *Proc. of the 2nd International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, pp. 89 – 92, 7-9 Sept. 2005.

- [4] F.J. Velez, et.al, "Cell planning based on the WiMAX standard for home access: a practical case," in Proc. of the 1st International Symposium on Wireless Pervasive Computing, 16-18 Jan. 2006.
- [5] P. Neves, et.al, "WiMAX for emergency services: an empirical evaluation," in Proc. of the 2007 International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, pp. 340 – 345, 12-14 Sept. 2007.
- [6] B. Lannoo, et.al, "Business scenarios for a WiMAX deployment in Belgium," in Proc. of the 2007 IEEE Mobile WiMAX Symposium, pp. 132 – 137, 25-29 March 2007.
- [7] T.Theodoros and V. Kostantinos, "WiMAX network planning and system's performance evaluation," in Proc. of the 2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp. 1948 – 1953, 11-15 March 2007.
- [8] M. Marques, et.al, "Design and planning of IEEE 802.16 networks," in Proc. of the IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pp. 1 – 5, 3-7 Sept 2007.
- [9] S.M. Allen, S.Hurley, R.K. Taplin, and R.M. Whitaker, "Automatic cell planning of broadband fixed wireless networks," in Proc. of the 53rd IEEE Vehicular Technology Conference, vol.4, pp. 2808 - 2812, 6-9 May 2001.
- [10] V. Teterin, S. Hurley, and SM Allen, "Optimizing performance of WiMAX networks through automated site selection," in Proc. of the 2007 Convergence of Telecommunications, Networking and Broadcasting, 28-29 June 2007,
- [11] M. Mousavi, S. Chamberlanda, and A. Quintero, "A new approach for designing WiMAX networks" in Proc. of the 2007 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 487 – 490, 22-26 April 2007.
- [12] V. Teterin, S. Hurley, and S.M. Allen, "A staged optimization framework for cost optimized WiMAX network design," in Proc. of the 4th International Conference on Wireless and Mobile Communications, pp. 185 – 190, 27 July – 1 Aug 2008.
- [13] Yang Yu, S. Murphy, and L. Murphy, "Planning base station and relay station locations in IEEE 802.16j multi-hop relay networks," in Proc. of the 2008 Consumer Communications and Networking Conference, pp. 922 – 926, 10-12 Jan 2008.
- [14] 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. of the 2008 IEEE International Conference on Communications, pp. 2586 – 2591, 19-23 May 2008.
- [15] B. Lin, P.H. Ho, L.L. Xie, and X.S. Shen, "Relay station placement in IEEE 802.16j dual-relay MMR networks" in Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Communications, pp. 3437-3441, 19-23 May 2008.
- [16] V. Erceg, K.V.S. Hari, et al., "Channel models for fixed wireless applications," in Technical report, IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, January 2001.
- [17] V. Erceg, L. J. Greenstein, et al., "An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments," in IEEE Journal on Selected Areas of Communications, vol. 17, pp. 1205–1211, July 1999.

WiMAX Network Design for Cost Minimization and Access Data Rate Guarantee Using Multi-hop Relay Stations

Chutima Prommak and Chitapong Wechtaison

Abstract—Network cost and network quality of services are important concerns in the widespread deployment of WiMAX networks. This paper presents a novel network design and optimization model for mobile WiMAX access networks utilizing multi-hop relays. The proposed model aims to determine optimal locations of base stations and relay stations so that the network can guarantee quality of services in term of the access data rate and the service coverage to serve potential user traffic demand in the target service area. Numerical network design results demonstrate that the proposed model can improve the user access data rate up to 60% and enhance the network service coverage up to 12% compared with the other existing models in literature.

Keywords—WiMAX, Access networks, Network optimization, Network design, Wireless Networks.

I. INTRODUCTION

WiMAX (Wireless Interoperability for Microwave Access) network technology has become potential solutions to bring broadband internet access to people in the remote area where a wired network infrastructure cannot reach [1], [2]. With the support of the IEEE 802.16j standard, one can deploy the network topology using multi-hop relay stations (RSs) to enhance services of the base stations. As illustrated in Fig.1, RSs can provide coverage extension to the cell boundary area, the shadowing area and the coverage-hole area [1], [2]. To enable network operators to provide low cost coverage with the quality of services guarantee, there is a need for an efficient network design.

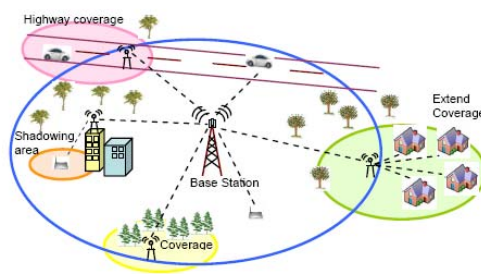


Fig.1 Relay station deployment

Several works have devoted to the studies of the performance improvement of wireless networks and the wireless network design problems. In [3], the authors propose an adaptive cross-layer bandwidth scheduling strategies for the hierarchical cellular networks. [4] presents a study of the baseband transceiver for WIMAX IEEE802.16d. Research works in [5-16] deal with the wireless network design problems. [5-7] present the studies of the radio network planning for cellular networks. In [8-12], the authors consider WiMAX radio network planning and present the practical network deployment with performance analysis and evaluation. Although the results give insight of the real network performance, the mathematical model was not used to optimize the network installation. Later works in [13-15] proposed mathematical models for the base station (BS) placement problems. The objective was to minimize the network cost but the multi-hop relay topology was not considered.

In [16], the authors proposed an Integer Programming formulation dealing with the BS and RS placement problem for the WiMAX multi-hop relay networks. The objective was to determine the locations of BSs and RSs by minimizing the network cost and the normalized path losses between the user demand locations and BS/RS locations. While their contribution is significant, the proposed planning method could not provide quality of services guarantee. For this reason, efficient WiMAX network design techniques are needed.

In our paper we propose a novel WiMAX network design approach, accounting for the quality of services guarantee in the design process. Specifically, we aim to solve the BS and RS placement problem (BRPP) for the WiMAX networks that can guarantee the network service coverage and the physical bit rate to the target users by deploying not only the BSs but also the multiple hop RSs in the WiMAX networks.

The rest of the paper is organized as followed. Section II provides the problem definition and describes the problem formulation. Section III explains the numerical experiments. Section IV presents numerical results and discussion which focus on the performance of the different network planning models. Finally, section V concludes the paper.

II. PROBLEM FORMULATION

The problems of WiMAX network design are defined and mathematically formulated as follows:

A. Problem Definition

In the WiMAX network design, we consider the BS and RS Placement Problem (BRPP) which involve selecting locations to install the BSs and the RSs from candidate sites of BS and RS, respectively.

The multiple-hop network configuration is formed in the way that the users can access the network directly through the BSs or indirectly via the RSs which connect to the BSs. Specifically, the proposed model aims to determine the minimum number of BSs and RSs to be installed in the target service area of the WiMAX networks so that the multi-hop relay network configuration can be formed and the resulting networks can guarantee the quality of services in term of the user access rate and the network service coverage.

In the network design model, we consider that BSs and RSs operate at the same transmitting power (a specified value). We consider that the user demand is modeled by Demand Points (DPs) which represent the geographic distribution of the expected user traffic in the service area and the target service area is represented by a set of discrete grid points called Signal Test Points (STPs) at which the received signal strength is tested. The network quality of services in term of the user

access rate and the network service coverage are incorporated in the model via the received sensitivity requirement at DPs and STPs, respectively. Such requirements in turn provide the user access rate guarantee.

B. Problem Formulation

The WiMAX network design problem is formulated as an Integer Linear Programming (ILP) model, denoted as a BRPP model. Table I shows the notation used in the model. The BRPP model aims to minimize the network cost, including the BS and RS installation cost. This can be written as the objective function (1).

$$\text{Minimize } \sum_{j \in B} F_j \beta_j + \sum_{i \in R} E_i \gamma_i \quad (1)$$

We incorporate the network design requirements into the mathematical model through three sets of constraints, denoted $C1$, $C2$, and $C3$. $C1$ consists of constraints that ensure the network service coverage. $C2$ is a set of constraints that guarantee the user traffic accommodation and the access rate requirements. The last set $C3$ consists of constraints that ensure the BS-RS connections.

Table I Notation

Sets:	
B	A set of candidate sites to install base stations (BSs)
R	A set of candidate sites to install relay stations (RSs)
D	A set of demand points (DPs)
T	A set of best signal test points (STPs)
Decision variables:	
β_j	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the BS is installed at site $j, j \in B$; 0 otherwise
γ_i	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the RS is installed at site $i, i \in R$; 0 otherwise
u_{hj}	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the STP h is assigned to BS $j, h \in T$ and $j \in B$; 0 otherwise
v_{hi}	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the STP h is assigned to RS $i, h \in T$ and $i \in R$; 0 otherwise
x_{gj}	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the DP g is assigned to BS $j, g \in D$ and $j \in B$; 0 otherwise
y_{gi}	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the DP g is assigned to RS $i, g \in D$ and $i \in R$; 0 otherwise
w_{ij}	A binary $\{0, 1\}$ variable that equals 1 if the RS i is assigned to BS $j, i \in R$ and $j \in B$; 0 otherwise
Constant parameters:	
F_j	Cost to install base station $j, j \in B$
E_i	Cost to install relay station $i, i \in R$
P_t	The received signal strength threshold for STPs
P_d	The received signal strength threshold for DPs
P_r	The received signal strength threshold for RSs
P_{hj}	The signal strength that a STP h receives from BS $j, h \in T$ and $j \in B$
P_{hi}	The signal strength that a STP h receives from RS $i, h \in T$ and $i \in R$
P_{gj}	The signal strength that a DP g receives from BS $j, g \in D$ and $j \in B$
P_{gi}	The signal strength that a DP g receives from RS $i, g \in D$ and $i \in R$

C1: Network service coverage

$$\sum_{j \in B} u_{hj} + \sum_{i \in R} v_{hi} \geq 1, \quad \forall h \in T \quad (2)$$

$$u_{hj} \leq \beta_j, \quad \forall h \in T, \quad \forall j \in B \quad (3)$$

$$v_{hi} \leq \gamma_i, \quad \forall h \in T, \quad \forall i \in R \quad (4)$$

$$u_{hj}(P_{hj} - P_t) \geq 0, \quad \forall h \in T, \quad \forall j \in B \quad (5)$$

$$v_{hi}(P_{hi} - P_t) \geq 0, \quad \forall h \in T, \quad \forall i \in R \quad (6)$$

Constraints (2) – (6) ensure that the network can provide signal coverage in the target service area by assessing the signal strength at each STP h and specifying that the signal strength received at STP h from BS j or RS i must be greater than the threshold P_t .

C2: User traffic accommodation and access rate guarantee

$$\sum_{j \in B} x_{gj} + \sum_{i \in R} y_{gi} \geq 1, \quad \forall g \in D \quad (7)$$

$$x_{gj} \leq \beta_j, \quad \forall g \in D, \quad \forall j \in B \quad (8)$$

$$y_{gi} \leq \gamma_i, \quad \forall g \in D, \quad \forall i \in R \quad (9)$$

$$x_{gj}(P_{gj} - P_d) \geq 0, \quad \forall g \in D, \quad \forall j \in B \quad (10)$$

$$y_{gi}(P_{gi} - P_d) \geq 0, \quad \forall g \in D, \quad \forall i \in R \quad (11)$$

Constraints (7) – (11) specify that the network can accommodate all predicted traffic demand and guarantee the user access rate. These constraints ensure that the signal strength that user at DP g receives from the BS j or the RS i is greater than the threshold P_d so that the physical transmission data rate can be achieved.

C3: BS-RS connections

$$\sum_{j \in B} w_{ij} = \gamma_i, \quad \forall i \in R \quad (12)$$

$$w_{ij} \leq \beta_j, \quad \forall i \in R, \quad \forall j \in B \quad (13)$$

$$w_{ij}(P_{ij} - P_r) \geq 0, \quad j \in B, \quad \forall i \in R \quad (14)$$

Constraints (12) – (14) enforce BS-RS connection. Constraint (12) ensures that each RSs can connect to only one BS. Constraint (13) ensures that RSs connect to BSs that are installed. Finally, constraint (14) ensure that the signal strength that between RS i and BS j is greater than the threshold P_r .

III. NUMERICAL EXPERIMENTS

In this section we present numerical study and analysis demonstrating the WiMAX network design using the proposed BRPP model. We compare our model with those presented in [16] of which the objective function is to minimize the weighted functions of the installation cost and the path loss. We call this a Weighted Objective Function (WOF) approach. Our model, on the other hands, aims to minimize the installation cost but does not minimize path loss. In stead, we incorporate the path loss function in the constraints where we calculate the received signal strength to guarantee the signal strength level that can ensure the minimum user access data rate requirement provided by the resulting WiMAX networks.

A. Description

In numerical experiments, we use the design scenarios of the service area of size 3km×3km as shown in Fig.2. The number of candidate sites to install BSs and RSs are 20 and 60, respectively. There are 200 DPs and 256 STPs (grid size of 200m×200m). We consider the cost of each BS and RS are \$120,000 and \$40,000 which are an approximate cost from typical suppliers [17]. We consider the WiMAX standards IEEE 802.16. Table II shows the parameters used in the numerical studies (see [17] for more details). Table III presents the minimum received signal strength (in dBm) to be

Table II Parameters Used in Numerical Experiments

Parameters	Value
Height of BSs and RSs	60 m
Height of TPs	2 m
Transmitted Power	35 dBm
Transmitted antenna gain	16 dBi
Received antenna gain	2 dBi
Frequency	2.5 GHz
Terrain type	C
Bandwidth	3.5 MHz
Data rate requirement for DPs	12.71 Mbps
Data rate requirement for STPs	5.64 Mbps
Cost of each base station	120,000 \$
Cost of each relay station	40,000 \$

Table III Receiver Sensitivity Threshold for Physical Bit Rate Requirement (Alvarion BreezeMAX at 3.5 MHz)

Modulation techniques	Physical bit rate (Mbps)	Receiver sensitivity threshold (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

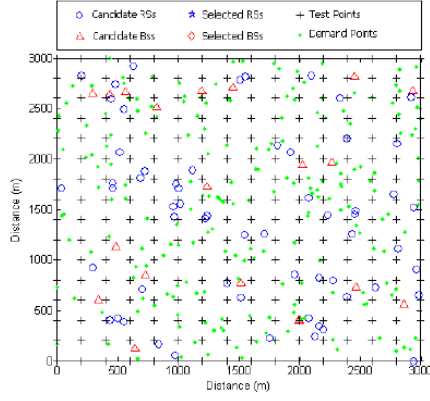


Fig.2 Numerical experiment setup.

able to achieve a certain physical access rate according to the choices of modulation techniques. The transmit power of each BS and RS used for the tests are 35 dBm which are typical values used in the WiMAX networks [10].

B. Propagation Model

It is necessary to compute the received signal strength at DPs and STPs and input the obtained values in the BRPP model to find the optimal locations to install BSs and RSs. This computation can be done by using the propagation model.

In this paper we use the Stanford University Interim (SUI) model which is recommended by the IEEE 802.16 to evaluate

the path loss in WiMAX networks [18]. The SUI path loss equation is presented in [18], [19]. The path loss equation is written here in Eq. (15). Table IV describes notation used in the SUI model. It computes the propagation loss as a function of the distance, d , between the transmitter and the receiver. It uses correction factors X_f and X_h for the operating frequency and the receiver antenna height. Additionally, the SUI model takes into account the network environment (terrain) via the use of the path loss exponent n . The network environment is classified into three types, namely A, B, and C. Type A characterizes the hilly terrain with medium to high tree density. Type B characterizes the flat terrain with medium to high tree density or the hilly terrain with light tree density. Type C characterizes the flat terrain with light tree density. The path loss exponent, n , for the specified terrain type is computed by Eq. (17) of which the values of the constant parameter a , b and c are given in Table V.

$$PL = A + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_h + s \quad (15)$$

$$A = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d_0}{\lambda} \right) \quad (16)$$

$$n = a - bh_b + c / h_b \quad (17)$$

$$X_f = 6.0 \log_{10} \left(\frac{f}{2000} \right) \quad (18)$$

$$X_h = -10.8 \log_{10} \left(\frac{h_r}{2} \right) \quad \text{For terrain type A, B} \quad (19)$$

$$X_h = -20.0 \log_{10} \left(\frac{h_r}{2} \right) \quad \text{For terrain type C} \quad (20)$$

Table IV Notation used in the SUI model

Notation	Definition
A	Path loss at the reference distance d_0
N	Path loss exponent
D	Distance (m.) between the transmitter and the receiver
D_0	Reference distance (100 m.)
X_f	Correction factors for the operating frequency
X_h	Correction factors for the receiver antenna height
s	Shadow fading factor (dB)
h_b	Transmitter antenna height (m.)
h_r	Receiver antenna height (m.)
f	Operating frequency

Table V Parameters used in the SUI model

Parameter	Terrain A	Terrain B	Terrain 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

IV. NUMERICAL RESULTS AND ANALYSIS

We input the set of BS and RS candidate sites and other parameters to the BRPP model. We then solve the WiMAX network design by implementing the BRPP model with the ILOG-OPL development studio and solving with CPLEX 5.2 optimization solver. Computations are performed on an Intel Centrino Core2 Duo Processor 2.0 GHz and 2GB of RAM. The following shows numerical results and analysis.

A. Network Configuration

Fig.3 shows the WiMAX network configuration designed by the BRPP model. It depicts the selected sites to install BSs and RSs. By using four BSs and six RSs in the resulting configuration, we can achieve 100% service coverage throughout the required area and guarantee the physical access rate to all DPs in the area. The cost of the resulting network is \$768,000. Fig.4 shows the service coverage area of the resulting network. It is represented by the coverage of STPs. Fig.5 shows the DP coverage. It demonstrates the data rate guarantee to users in the coverage area.

B. Network Performance Comparison

Table VI shows numerical results comparing the network design using the BRPP model and that using the WOF model [16]. The performance matrices used for the comparison included the network cost, the number of installed BSs and RSs, and the quality of services in term of the user access rate guarantee and the service coverage guarantee. The results show that although the BRPP model yields the network cost higher than that of the WOF model, the BRPP model yields the network configuration that can guarantee the user access data rate 60% higher than that designed by the WOF model. Furthermore, the network designed by the BRPP model can provide 100% service coverage which is more than 10% higher than that designed by the WOF model.

C. Effects of User Access Rate Requirements

Table VII shows numerical results comparing various cases of the network design imposing different conditions on the data rate requirements. The results show tradeoffs between the network cost and the achievable user data rate. In case that the network operators want to provide the service access rate at 12.71 Mbps throughout the service area (represented by DPs and STPs), the network cost would be about 6% higher than the case that only providing the service rate at 12.71 Mbps to the area with high density of target users (represented by DPs) whereas the other areas (represented by STPs) guarantee the access rate at 5.64 Mbps. Comparing to the case that imposes the data rate guarantee at 5.64 Mbps over the whole service area, the network cost is 62% lower than the case imposing the data rate guarantee at 12.71 Mbps in the service area.

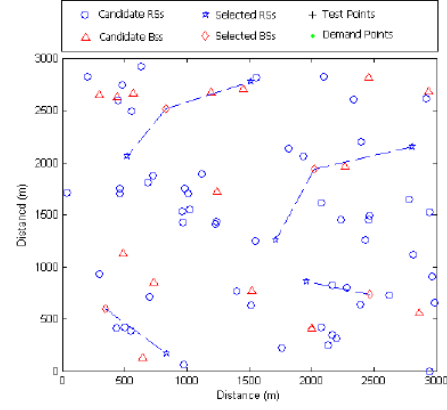


Fig.3 Selected BS and RS sites

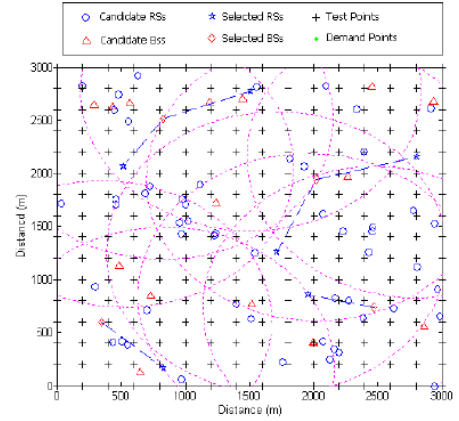


Fig.4 Service area guarantee representing by coverage of STPs

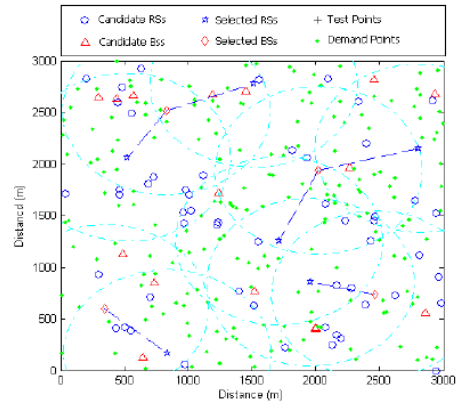


Fig.5 Data rate guarantee representing by coverage of DPs

Table VI Result Comparison

Parameter Name	BRPP model	WOF model
Installation cost	768,000\$	264,000\$
Number of BSs used	4	1
Number of RSs used	6	3
Number of served DPs	200	80
Number of served STPs	256	226
Guarantee user access data rate	100%	40%
Guarantee service coverage	100%	88.28%

Table VII Vary User Access Rate Requirement

Data Rate Requirement (Mbps)		Network Cost (\$10 ⁵)	Number of BSs used	Number of RSs used
at DP	at STP			
2.71	12.71	8.16	4	7
12.71	5.64	7.68	4	6
5.64	5.64	3.12	1	4
2.82	2.82	1.68	1	1

D. Signal Propagation Characteristics

The received signal strength at DPs and STPs were evaluated by using the SUI path loss model [18]. Different network configurations yield different signal propagation characteristics in the service area. Fig.7 shows the probability density function of the received signal strength obtained from the network designed by the BRPP model, compared with that designed by the WOF model. We can see that the network configuration designed by the BRPP model yields better signal quality at DPs and STPs than those of the WOF model.

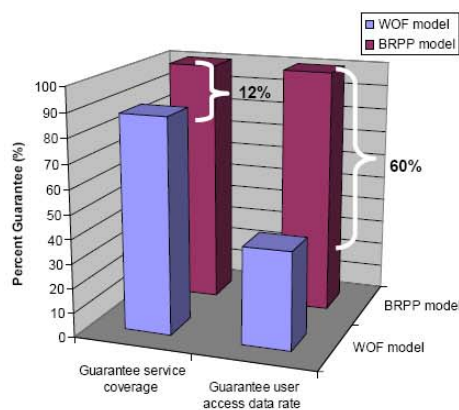


Fig.6 Result comparison

V. CONCLUSION

This paper presents a novel mathematical model for an efficient design of the WiMAX network using multi-hop relay topology. We formulate the problem as an Integer Linear Programming problem. The objective is to minimize the network installation cost and guarantee the quality of services in term of the user access rate and the network service coverage. From numerical results we can conclude that incorporating the network design requirements into the constraints of the mathematical model can greatly improve the quality of services of the resulting networks in term of the user access rate and the network service coverage. However, it would be interesting to investigate other approaches for the WiMAX network design. We currently explore effects of the budget limitation on the network performance optimization.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the research fund from Suranaree University of Technology, Thailand.

REFERENCES

- [1] A. Maraj and I. Imeri, "WiMAX Integration in NGN Network, Architecture, Protocols and Services" WSEAS Transactions on Communications, Issue 8, Vol.17, pp. 708 – 717, July 2009.
- [2] B. Li, Y. Qin, C. P. Low and C.L. Gwee, "A survey on mobile WiMAX," IEEE Communication Magazine, pp. 70 – 75, Dec 2007.

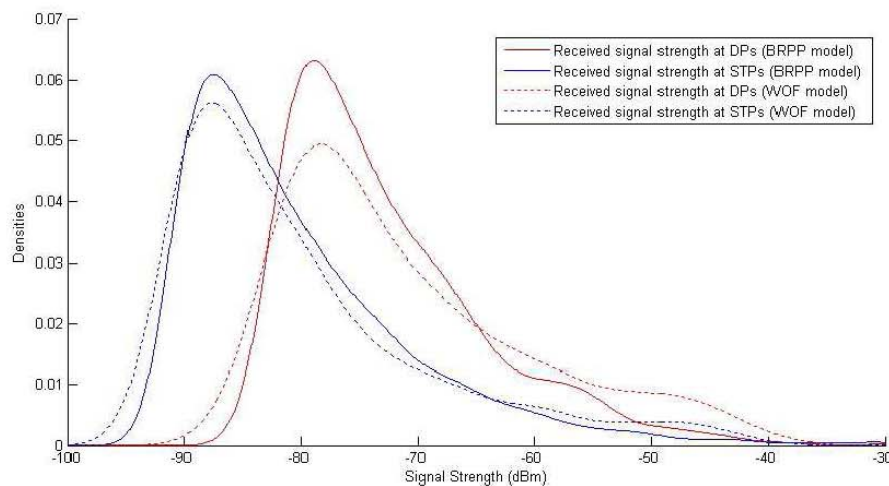


Fig.7 Signal propagation characteristic comparison

- [3] J. Chen, M. Li, N. Wang and Y. Huang, "An Adaptive Cross-layer Bandwidth Scheduling Strategy for the Speed-Sensitive Strategy in Hierarchical Cellular Networks", WSEAS Transactions on Communications, no. 8, vol.7, pp.545-555, July 2009.
- [4] M. A. Kadhim, W. Ismail, "Implementation of WiMAX IEEE802.16d Baseband Transceiver on Multi-Core Software-Defined Radio Platform", WSEAS Transactions on Communications, no. 5, vol.9, pp.301-311, May 2010.
- [5] S.Hurley, "Automatic base station selection and configuration in mobile networks," in Proc. of the 52nd IEEE VTS-Fall ,Vehicular Technology Conference, vol.6, pp. 2585 - 2592, 24-28 Sept 2000.
- [6] R. Kapp Rawnsley and S. Hurley, "Towards automatic cell planning," in Proc. of the 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, vol.2, pp. 1583 - 1588, 18-21 Sept 2000.
- [7] J. Hamad-Ameen, "Cell Planning in GSM Mobile", WSEAS Transactions on Communications, no. 5, vol.7, pp.393-398, May 2008.
- [8] J. Garcia-Fragoso and G.M. Galvan-Tejada, "Cell planning based on the WiMAX standard for home access: a practical case," in Proc. of the 2nd International Conference on Electrical and Electronics Engineering, pp. 89 - 92, 7-9 Sept. 2005.
- [9] P. Neves, et.al, "WiMAX for emergency services: an empirical evaluation," in Proc. of the 2007 International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, pp. 340 - 345, 12-14 Sept. 2007.
- [10] B. Lammoo, et.al., "Business scenarios for a WiMAX deployment in Belgium," in Proc. of the 2007 IEEE Mobile WiMAX Symposium, pp. 132 - 137, 25-29 March 2007.
- [11] T. Theodoros and V. Kostantinos, "WiMAX network planning and system's performance evaluation," in Proc. of the 2007 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp. 1948 - 1953, 11-15 March 2007.
- [12] M. Marques, et.al, "Design and planning of IEEE 802.16 networks," in Proc. of the IEEE 18th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pp. 1 - 5, 3-7 Sept 2007.
- [13] V. Teterin, S. Hurley, and S.M. Allen, "Optimizing performance of WiMAX networks through automated site selection," in Proc. of the 2007 Convergence of Telecommunications, Networking and Broadcasting, 28-29 June 2007.
- [14] M. Mousavi, S. Chamberlanda, and A. Quintero, "A new approach for designing WiMAX networks" in Proc. of the 2007 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 487 - 490, 22-26 April 2007.
- [15] V. Teterin, S. Hurley, and S.M. Allen, "A staged optimization framework for cost optimized WiMAX network design," in Proc. of the 4th International Conference on Wireless and Mobile Communications, pp. 185 - 190, 27 July - 1 Aug 2008.
- [16] Y. Yu, S. Murphy, and L. Murphy, "Planning base station and relay station locations in IEEE 802.16j multi-hop relay networks," in Proc. of the 2008 Consumer Communications and Networking Conference, pp. 922 - 926, 10-12 Jan 2008.

- [17] S. Ahson and M. Ilyas, WiMAX handbook, CRC Press, London 2008.
- [18] V. Erceg, K.V.S. Hari, et al., "Channel models for fixed wireless applications," in Technical report, IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, January 2001.
- [19] V. Erceg, L. J. Greenstein, et al., "An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments," in IEEE Journal on Selected Areas of Communications, vol. 17, pp. 1205–1211, July 1999.
- [20] L. Nuaymi, WiMAX: technology for broadband wireless access, John Wiley, Chichester, England, 2007.
- [21] Z. Abate, WiMax RF systems engineering, Artech House, Boston, 2009.
- [22] M. D. Katz and F.H.P. Fitzek, WiMAX evolution: emerging technologies and applications, John Wiley & Sons, Chichester, England, 2009.



Chutima Prommak received B.Eng (Hons) in Electrical Engineering from Khon Kaen University, Thailand in 1992. She received M.Sc. and Ph.D. in Telecommunications from University of Colorado at Boulder, CO, USA in 1998 and University of Pittsburgh, PA, USA in 2004, respectively.

During 1992 – 1996, she worked as a system engineer at Jasmine International Public Co, Ltd, a leading telecommunication company of Thailand. In 2004 she joined Suranaree University of Technology, Thailand. Currently she is an Assistant Professor in the school of Telecommunication Engineering, faculty of Engineering. She leads researches in the field of wireless network design and performance optimization at the wireless communication research lab at her school. Her research interests are in the areas of wireless network design and planning, network optimization, WiMAX, wireless sensor networks and heuristic optimization for telecommunication networks.

Dr. Prommak received Fritz Froehlich Award for outstanding contributions to the graduate program in Telecommunications, University of Pittsburgh, USA, April 2003. She is also the principal investigator for several research projects funded by the Thai Research Fund and the Office of the National Research Council of Thailand.



Chitapong Wechtaison received B.Eng in Telecommunication Engineering from Suranaree University of Technology, Thailand in 2005. He currently is working on his M.Eng at the school of Telecommunication Engineering, faculty of Engineering, Suranaree University of Technology. He also works as a system engineer at the Advance Info Service Public Co, Ltd, a leading wireless communication company in Thailand.

His research interests include wireless network design, WiMAX, 3G–4G cellular networks and cellular network performance optimization.

ประวัติผู้เขียน

นายชิตพงศ์ เวชโชสงค์ เกิดเมื่อวันที่ 30 ตุลาคม พ.ศ. 2527 ที่จังหวัดนครราชสีมา เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1-6 และระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 แผนกวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์ ที่โรงเรียนมารีย์วิทยา จังหวัดนครราชสีมา จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ภายหลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรที่บริษัท โซนี่ เทคโนโลยี ประเทศไทย จำกัด มีหน้าที่รับผิดชอบในการควบคุมดูแลสายพานการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นเวลา 1 ปี หลังจากนั้นได้เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรที่บริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด (มหาชน) สำนักปฏิบัติการภูมิภาค ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จังหวัดนครราชสีมา มีหน้าที่รับผิดชอบการควบคุมดูแลและซ่อมบำรุงอุปกรณ์ควบคุมสถานีฐานและอุปกรณ์ชุมสายของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 2 และโทรศัพท์เคลื่อนที่ยุคที่ 3 จนกระทั่งปัจจุบัน ขณะปฏิบัติงานได้มีความสนใจที่จะศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จึงได้เข้าศึกษาในสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม ณ สถาบันการศึกษาเดิม โดยมีความเชี่ยวชาญด้านการวางแผนเครือข่ายระบบการสื่อสารไร้สายที่ใช้พื้นฐานของระบบโทรศัพท์แบบเซลลูลาร์ ระหว่างศึกษาในระดับปริญญาโท มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ โดยมีรายละเอียดปรากฏดังแสดงในภาคผนวก ก.