

ย่านพื้นที่ครอบคลุมในระบบไวแมกซ์ที่ใช้สถานีถ่ายทอด  
โดยพิจารณาจากอัตราความผิดพลาดบิต

นายบูรณิติ มาศอมรพันธุ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี  
ปีการศึกษา 2554

**COVERAGE RANGE WiMAX SYSTEMS USING  
RELAY STATION BASED ON BIT ERROR  
RATE CONSIDERATION**

**Buranit Mardamornpun**

**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 2011**

## ย่านพื้นที่ครอบคลุมในระบบไวแมกซ์ที่ใช้สถานีถ่ายทอด

### โดยพิจารณาจากอัตราความผิดพลาดบิต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

\_\_\_\_\_

(ผศ. ดร.ชุตินา พรหมมาก)

ประธานกรรมการ

\_\_\_\_\_

(ผศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

\_\_\_\_\_

(ผศ. ดร.ปิยาภรณ์ กระจอกนอก)

กรรมการ

\_\_\_\_\_

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

\_\_\_\_\_

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

นายบุญนิติ มาศอมรพันธุ์ : ย่านพื้นที่ครอบคลุมในระบบไวแมกซ์ที่ใช้สถานีถ่ายทอด  
โดยพิจารณาจากอัตราความผิดพลาดบิต (COVERAGE RANGE WiMAX SYSTEMS  
USING RELAY STATION BASED ON BIT ERROR RATE CONSIDERATION)  
อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิระพงษ์ อุฑารสกุล, 106 หน้า.

ไวแมกซ์ (Worldwide Interoperability for Microwave Access: WiMAX) เป็นเทคโนโลยีที่  
ถูกกำหนดขึ้น เพื่อตอบสนองต่อความต้องการการติดต่อสื่อสารไร้สายที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูง  
และมีพื้นที่ครอบคลุมที่กว้าง โดยไวแมกซ์ได้มีการพัฒนามาจากมาตรฐาน IEEE 802.16 และ  
การใช้สถานีถ่ายทอดนั้นถูกกำหนดไว้ด้วยมาตรฐาน IEEE 802.16j ซึ่งเป็นมาตรฐานที่เพิ่มสถานี  
ถ่ายทอดเข้าไปในระบบเพื่อทำการขยายพื้นที่ครอบคลุมของระบบและแก้ไขในส่วนจุดอับ  
สัญญาณ ทั้งยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการเดินสายเคเบิล เนื่องจากสถานีถ่ายทอดนี้ใช้การ  
เชื่อมโยงกันทางอากาศ ดังนั้นคุณภาพสัญญาณจึงแปรเปลี่ยนไปตามสิ่งแวดล้อมและระยะทาง  
ระหว่างสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด ดังนั้นในมาตรฐานของไวแมกซ์จึงมีการกำหนดการเข้ารหัส  
ข้อมูลและการเข้ารหัสของสัญญาณซึ่งกระบวนการเหล่านี้มีส่วนสำคัญในการพิจารณาการแก้ไข  
ปัญหาการติดต่อสื่อสารต่าง ๆ และทำให้ระบบไวแมกซ์มีอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูงและมีพื้นที่  
ครอบคลุมที่กว้าง ซึ่งจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมที่ผ่านมาได้มีการนำเสนอแนวทางต่าง ๆ  
เพื่อหาตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดโดยยังไม่คำนึงถึงคุณภาพของสัญญาณในระดับอัตราความ  
ผิดพลาดบิต งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาหาพื้นที่ครอบคลุมในระบบไวแมกซ์ที่ใช้สถานีถ่ายทอด  
โดยพิจารณาจากอัตราความผิดพลาดบิต ซึ่งคำนึงถึงผลกระทบในการรับส่งข้อมูลจากการเข้ารหัส  
ในชั้นกายภาพของระบบไวแมกซ์ และทำการหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด ทั้งนี้ค่าอัตรา  
ความผิดพลาดบิตถือเป็นตัวแทนของคุณภาพสัญญาณซึ่งเป็นปัจจัยหลักในการพิจารณา นอกจากนี้  
ยังได้สร้างสมการทางคณิตศาสตร์สำหรับหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด ซึ่งสมการทาง  
คณิตศาสตร์นี้เป็นตัวช่วยในการออกแบบหาตำแหน่งการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเบื้องต้น เพื่อให้  
พื้นที่ครอบคลุมที่คำนวณได้มีอัตราความผิดพลาดบิตตามที่ต้องการ

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม  
ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา \_\_\_\_\_  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา \_\_\_\_\_

BURANIT MARDAMORNPNUN : COVERAGE RANGE WiMAX  
SYSTEMSUSING RELAY STATION BASED ON BIT ERROR RATE  
CONSIDERATION. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. PEERAPONG  
UTHANSAKUL, Ph.D., 106 PP.

BER/COVERAGE/RELAY STATION/WIMAX

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) is a wireless technology that provides a high data rate and a wide coverage range, which is based on IEEE 802.16 standard. IEEE 802.16j has adopted the use of relay stations in order to extend the coverage range and improve the shadowing spot. This can save the cost of cable because the interface between base station and relay station is totally wireless. Consequently, the quality of data transmission is influenced by distance and surrounding between base station and relay station. To defeat this impairment, the WiMAX standard employs data and channel encodings. From literature, there are many works dealing with locating the relay stations without the concern of bit-signal quality. In this thesis, the study of coverage range in WiMAX system based on bit error rate consideration has been presented. All data and channel encoding in physical layer of WiMAX have been investigated and modelled for locating the relay stations. Moreover, the mathematic solutions to find the relay stations under bit error rate constraint have been proposed. The outcome of this thesis is helpful to design the preliminary locations for relay stations based on requirements of bit error rate.

School of Telecommunication Engineering Student's Signature \_\_\_\_\_

Academic Year 2011

Advisor's Signature \_\_\_\_\_

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างยิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำปรึกษา ช่วยแก้ปัญหา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์ รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรณ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุติมา พรหมมาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ทัศนกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล อาจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระจลอนอก อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคมมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการและให้โอกาสทางการศึกษา

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้การอบรมเลี้ยงดูและให้การสนับสนุนทางการศึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตเรื่อยมา สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดาและญาติพี่น้องซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ผู้สอนที่เคารพทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยทั้งในอดีตและปัจจุบันจนสำเร็จการศึกษาไปได้ด้วยดี

บุรณิติ มาศอมรพันธุ์

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ญ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฐ
<b>บทที่</b>	
<b>1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขีดกลางเบื้องต้น.....	3
1.4 ขอบเขตงานวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 รายละเอียดวิทยานิพนธ์.....	3
<b>2 เทคโนโลยีการเข้าถึงแบนด์วิธแบบไร้สาย.....</b>	<b>5</b>
2.1 บทนำ.....	5
2.2 มาตรฐานของระบบไวแมกซ์.....	6
2.3 ข้อกำหนดของระบบไวแมกซ์.....	8
2.3.1 ชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง (MAC Layer).....	8
2.3.2 ชั้นกายภาพ (PHY layer).....	9
2.4 โครงสร้างพื้นฐานของระบบไวแมกซ์.....	11
2.4.1 แหล่งกำเนิด (Source).....	11
2.4.2 การเข้ารหัส (Encoder).....	12
2.4.3 การมอดูเลชัน (Modulation).....	25

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.4	Pilot Symbols.....	26
2.4.5	Training Sequence.....	26
2.4.6	Assembler.....	26
2.4.7	Guard band.....	28
2.4.8	Inverse Fast Fourier Transform.....	28
2.4.9	Cyclic Prefix.....	28
2.4.10	การทำกระบวนการ FFT.....	30
2.4.11	การตัดส่วน guard band ออก.....	31
2.4.12	การแยกข้อมูลออก (Disassembler).....	31
2.4.13	การประมาณช่องสัญญาณ.....	31
2.4.14	การคีมอคูเลชั่น.....	31
2.4.15	การถอดรหัส.....	31
2.5	แบบจำลองช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบไวแมกซ์.....	37
2.5.1	แบบจำลอง Free Space Path Loss.....	37
2.5.2	แบบจำลอง Path Loss Modified Stanford University Interim (SUI).....	37
2.5.3	RMS delay spread.....	39
2.5.4	Fade distribution หรือ K-Factor.....	39
2.5.5	Antenna Gain Reduction Factor (GRF).....	40
2.5.6	แบบจำลองช่องสัญญาณ Modified Stanford University Interim (SUI).....	40
2.6	การมอดูเลชั่นแบบปรับตัว.....	48
2.7	สถานีถ่ายทอดในระบบไวแมกซ์ 802.16j.....	49
2.7.1	สถาปัตยกรรมเครือข่ายของ 802.16j.....	49
2.7.2	แบบจำลองที่นำมาใช้งานใน 802.16j.....	50
2.7.3	ประเภทของสถานีถ่ายทอด.....	52



## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.8	สรุปเนื้อหาในบทที่ 2.....	53
<b>3</b>	<b>การวิเคราะห์สมรรถนะระบบไวแมกซ์ในทางคณิตศาสตร์.....</b>	<b>54</b>
3.1	ผลกระทบของกระบวนการในชั้นกายภาพของไวแมกซ์.....	54
3.1.1	การเข้ารหัสรีดโซโลมอน.....	54
3.1.2	การเข้ารหัสคอนโซลูชัน.....	54
3.1.3	การมอดูเลชัน.....	55
3.1.4	OFDM.....	56
3.1.5	Cyclic Prefix.....	56
3.2	สมการที่ใช้คำนวณหาค่า BER ที่แปรผันตามค่า SNR.....	57
3.3	สมการที่ใช้คำนวณหาค่า BER ที่แปรผันตามระยะทาง.....	58
3.3.1	สมการสำหรับการติดต่อสื่อสารแบบไม่มีสถานีถ่ายทอด.....	58
3.3.2	สมการสำหรับการติดต่อสื่อสารแบบ 1 สถานีถ่ายทอด.....	61
3.3.3	สมการสำหรับการติดต่อสื่อสารแบบ 2 สถานีถ่ายทอด.....	64
3.4	สรุปเนื้อหาในบทที่ 3.....	68
<b>4</b>	<b>วิเคราะห์ผลการติดตั้งสถานีถ่ายทอด.....</b>	<b>69</b>
4.1	การจำลองแบบระบบไวแมกซ์.....	69
4.2	การจำลองแบบระบบไวแมกซ์ โดยเปรียบเทียบกับระยะทาง.....	72
4.3	การเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองกับผลของสมการคณิตศาสตร์.....	73
4.4	พื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์โดยใช้เทคนิค AMC เป็นตัวพิจารณา.....	76
4.5	พื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์โดยใช้ BER $10^{-4}$ เป็นตัวพิจารณา.....	78
4.6	พื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์โดยใช้ BER $10^{-6}$ เป็นตัวพิจารณา.....	79
4.7	การหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดโดยพิจารณา BER ที่ $10^{-4}$ .....	80
4.8	การหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดโดยพิจารณา BER ที่ $10^{-6}$ .....	87
4.9	สรุปเนื้อหาในบทที่ 4.....	93
<b>5</b>	<b>สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>95</b>
5.1	สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์.....	95

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ.....	96
5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต.....	96
รายการอ้างอิง.....	97
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	99
ประวัติผู้เขียน.....	106

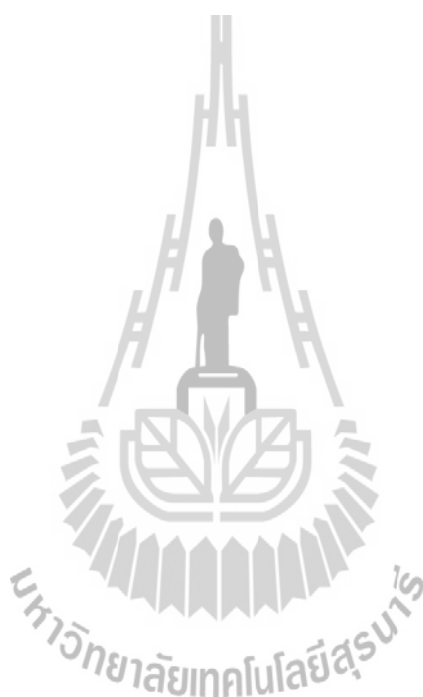


## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	รูปแบบการมอดูเลชันและการเข้ารหัสในระบบไวแมกซ์.....13
2.2	แสดงค่าของเวกเตอร์ฟังก์ชันสำหรับอัตราเร็วต่าง ๆ ของการเข้ารหัสคอนไวลูชัน.....23
2.3	แสดงค่า SUI Terrain.....38
2.4	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI.....41
2.5	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI 1.....42
2.6	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI 2.....43
2.7	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI 3.....44
2.8	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI 4.....45
2.9	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI 5.....46
2.10	ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI 6.....47
3.1	แสดงค่า $d_{\text{free}}$ ที่แปรผันตาม Over all Code Rate.....55
3.2	แสดงสมการ BER ของแต่ละรูปแบบการมอดูเลชัน.....56
3.3	แสดงสมการ BER ที่แปรผันตาม SNR สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชัน ในระบบไวแมกซ์.....57
3.4	แสดงค่า $d_{\text{min}}$ , $d_{\text{free}}$ , CC code rate และ $n/k$ สำหรับแต่ละรูปแบบ การมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์.....58
3.5	แสดงสมการ BER ที่แปรผันตามระยะทาง สำหรับแต่ละรูปแบบ การมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์.....60
3.6	แสดงสมการ BER ที่แปรผันตามระยะทาง แบบ 1 สถานีถ่ายทอด สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์.....63
3.7	แสดงสมการ BER ที่แปรผันตามระยะทาง แบบ 2 สถานีถ่ายทอด สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์.....67
4.1	แสดงจำนวนบิตที่สร้างขึ้นสำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชัน.....70

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.2	แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลองของระบบไวแมกซ์.....	71
4.3	รัศมีพื้นที่ครอบคลุมของแต่ละเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา การติดตั้งสถานีถ่ายทอด.....	92



## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	บล็อกโคดอะแกรมที่ภาคส่งของระบบไวแมกซ์.....	12
2.2	กระบวนการเข้ารหัสในระบบไวแมกซ์.....	12
2.3	การเข้ารหัสรีดโซโลมอน.....	14
2.4	รูปวงจรถ้าสำหรับการเข้ารหัสรีดโซโลมอนเชิงระบบ.....	16
2.5	แสดงการเข้ารหัสคอนโวลูชันแบบ $K = 3$ .....	17
2.6	โคดอะแกรมสถานะของการเข้ารหัส.....	20
2.7	โคดอะแกรมต้นไม้ของการเข้ารหัส.....	21
2.8	โคดอะแกรม Trellis ของการเข้ารหัส.....	22
2.9	การใช้งานโคดอะแกรม Trellis.....	23
2.10	แสดงตัวอย่างในการวางสลับ.....	24
2.11	แสดง Constellation Maps ของ BPSK 4-QAM 16-QAM.....	25
2.12	อธิบายถึงความถี่ OFDM.....	27
2.13	โครงสร้างของข้อมูล OFDM ที่ผ่านการจัดเรียงแล้ว.....	27
2.14	โครงสร้างของสัญลักษณ์ OFDM กับ CP.....	29
2.15	แสดงแผนภาพของภาครับระบบไวแมกซ์.....	30
2.16	การถอดรหัสแบบ Viterbi (1).....	35
2.17	การถอดรหัสแบบ Viterbi (2).....	35
2.18	การถอดรหัสแบบ Viterbi (3).....	36
2.19	การถอดรหัสแบบ Viterbi (4).....	36
2.20	โครงสร้างของแบบจำลองช่องสัญญาณ SUI.....	40
2.21	แสดงรูปแบบของการปรับการมอดูเลชันและการเข้ารหัส ของระบบไวแมกซ์.....	49
2.22	แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างของไวแมกซ์แบบทั่วไป และแบบที่มี สถานีถ่ายทอด.....	50
2.23	ตัวอย่างการใช้งานของสถานีถ่ายทอดแบบประจำที่.....	51

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.1	รูปแบบการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับผู้ใช้บริการ.....59
3.2	รูปแบบการติดต่อสื่อสารแบบหนึ่งสถานีถ่ายทอด.....62
3.3	รูปแบบการติดต่อสื่อสารแบบสองสถานีถ่ายทอด.....65
4.1	บล็อกไดอะแกรมการทำงานในชั้นกายภาพของระบบไวแมกซ์.....69
4.2	BER vs Eb/N0 สำหรับทุกรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์.....72
4.3	BER vs Distance สำหรับทุกรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์.....73
4.4	Simulation & Analytic Model สำหรับการมอดูเลชันแบบ BPSK.....74
4.5	Simulation & Analytic Model สำหรับการมอดูเลชันแบบ QPSK.....74
4.6	Simulation & Analytic Model สำหรับการมอดูเลชันแบบ 16-QAM.....75
4.7	Simulation & Analytic Model สำหรับการมอดูเลชันแบบ 64-QAM.....75
4.8	ระดับการเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลชันของเทคนิค AMC ในระบบไวแมกซ์.....76
4.9	แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมโดยใช้ AMC เป็นตัวพิจารณา สำหรับทุกการมอดูเลชัน.....77
4.10	แสดงพื้นที่ครอบคลุมสำหรับระบบไวแมกซ์ โดยใช้เทคนิค AMC.....77
4.11	แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมโดยใช้ BER $10^{-4}$ เป็นตัวพิจารณา สำหรับทุกการมอดูเลชัน.....78
4.12	แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมสำหรับระบบไวแมกซ์ โดยพิจารณาที่ BER $10^{-4}$ .....79
4.13	แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมโดยใช้ BER $10^{-6}$ เป็นตัวพิจารณา สำหรับทุกการมอดูเลชัน.....79
4.14	แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมสำหรับระบบไวแมกซ์ โดยพิจารณาที่ BER $10^{-6}$ .....80
4.15	รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด BPSK 1/2 พิจารณาที่ BER = $10^{-4}$ .....83
4.16	รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด QPSK 1/2 พิจารณาที่ BER = $10^{-4}$ .....83
4.17	รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด QPSK 3/4 พิจารณาที่ BER = $10^{-4}$ .....84
4.18	รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด 16-QAM 1/2 พิจารณาที่ BER = $10^{-4}$ .....84
4.19	รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด 16-QAM 3/4 พิจารณาที่ BER = $10^{-4}$ .....85

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20	รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด 64-QAM 2/3 พิจารณาที่ BER = $10^{-4}$ ..... 85
4.21	รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด 64-QAM 3/4 พิจารณาที่ BER = $10^{-4}$ ..... 86
4.22	แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมสำหรับระบบไวแมกซ์แบบ 1 สถานีถ่ายทอด โดยพิจารณาที่ BER $10^{-4}$ ..... 86
4.23	แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมสำหรับระบบไวแมกซ์แบบ 2 สถานีถ่ายทอด โดยพิจารณาที่ BER $10^{-4}$ ..... 87
4.24	รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด BPSK 1/2 พิจารณาที่ BER = $10^{-6}$ ..... 88
4.25	รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด QPSK 1/2 พิจารณาที่ BER = $10^{-6}$ ..... 88
4.26	รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด QPSK 3/4 พิจารณาที่ BER = $10^{-6}$ ..... 89
4.27	รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด 16-QAM 1/2 พิจารณาที่ BER = $10^{-6}$ ..... 89
4.28	รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด 16-QAM 3/4 พิจารณาที่ BER = $10^{-6}$ ..... 90
4.29	รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด 64-QAM 2/3 พิจารณาที่ BER = $10^{-6}$ ..... 90
4.30	รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด 64-QAM 3/4 พิจารณาที่ BER = $10^{-6}$ ..... 91
4.31	แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมสำหรับระบบไวแมกซ์แบบ 1 สถานีถ่ายทอด โดยพิจารณาที่ BER $10^{-6}$ ..... 91
4.32	แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมสำหรับระบบไวแมกซ์แบบ 2 สถานีถ่ายทอด โดยพิจารณาที่ BER $10^{-6}$ ..... 92

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

WiMAX	=	Worldwide interoperability for Microwave Access
IEEE	=	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MAN	=	Metro politan Area Network
WLAN	=	Wireless Local Area Network
LOS	=	Line of Sight
NLOS	=	Non Line of Sight
BS	=	Base Station
RS	=	Relay Station
SS	=	Subscriber Station
OFDM	=	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	=	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
BER	=	Bit Error Rate
QOS	=	Quality of Service
MAC	=	Medium Access Control
MMR	=	Mobile Multihop Relay
TDMA	=	Time Division Multiple Access
VoIP	=	Voice over Internet Protocol
ARQ	=	Automatic Repeat request
SC	=	Single Carrier
FFT	=	Fast Fourier Transform
IFFT	=	Inverse Fast Fourier Transform
TDD	=	Time Division Duplex
FDD	=	Frequency Division Duplex
FEC	=	Forward Error Correction
TDM	=	Time Division Multiplex
FDM	=	Frequency Division Multiplex
SNR	=	Signal to Noise Ratio



## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

BPSK	=	Binary Phase Shift Keying
QPSK	=	Quadrature Phase Shift Keying
16-QAM	=	16-Quadrature Amplitude Modulation
64-QAM	=	64-Quadrature Amplitude Modulation
AMC	=	Adaptive Modulation and Coding
LFSR	=	Linear Feedback Shift Register
PRBS	=	Pseudo-random binary sequence
CIR	=	Channel Impulse Response
DSL	=	Digital Subscriber Lines
SUI	=	Stanford University Interim
GRF	=	Gain Reduction Factor

# บทที่ 1

## บทนำ

เนื้อหาในบทนี้เป็นการอธิบายถึงประวัติความเป็นมาและเหตุจูงใจสำหรับงานวิจัย ซึ่งประกอบด้วย ที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดของวิทยานิพนธ์

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ไวแมกซ์ (Worldwide Interoperability for Microwave Access : WiMAX) นั้นเป็นมาตรฐานที่เกิดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 2001 โดยตอนแรกนั้น ทางสถาบันวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (Institute of Electrical and Electronics Engineers : IEEE) ก็เพียงแค่ต้องการเทคโนโลยีไร้สายที่เข้ามาตอบสนองการสื่อสารข้อมูลระดับบรอดแบนด์ที่มีความเร็วสูง ๆ และมีระยะทางไกล ๆ หรือระดับเครือข่ายนครหลวง (Metro politan Area Network : MAN) เท่านั้น ซึ่งทำให้มาตรฐาน 802.16 มาตรฐานแรก ๆ ถูกออกแบบมาให้ใช้สำหรับการรับส่งข้อมูลแบบแนวสายตา (Line Of Sight : LOS) ที่ช่วงความถี่ 10-66 GHz และใช้ความถี่แบบความถี่เดียว แต่ใช้แบนด์กว้างในการสื่อสารข้อมูล แต่ก็ยังสามารถให้บริการในพื้นที่กว้าง ๆ ได้ ซึ่งในความเป็นจริงนั้น มีปัญหาในการติดต่อสื่อสารอยู่ เช่น ในพื้นที่ส่วนใหญ่มักจะมีสิ่งกีดขวางอยู่เสมอ เช่น อาคารบ้านเรือน ต้นไม้ ภูเขา ฯลฯ ทำให้การรับส่งข้อมูลแบบ LOS ไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ อีกทั้งในการใช้คลื่นความถี่สูงจะมีปัญหาอย่างมากในการส่งระยะทางไกล ๆ ต่อมาได้มีการกำหนดมาตรฐาน 802.16d เมื่อปี ค.ศ. 2004 โดยมีการออกแบบให้สามารถรับส่งข้อมูลแบบไม่อยู่ในแนวสายตา (Non Line Of Sight : NLOS) และทำงานในช่วงความถี่ต่ำลงเป็น 2-11 GHz และต่อมาได้มีการกำหนดมาตรฐาน 802.16e เมื่อปี ค.ศ. 2005 ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ผู้ผลิตและผู้ให้บริการหลาย ๆ รายมุ่งที่จะให้บริการและอาจจะเข้ามาเปลี่ยนแปลงโฉมหน้าการสื่อสารของโลกได้ โดยผู้ผลิตได้เริ่มที่จะทยอยออกผลิตภัณฑ์ออกมาบ้างแล้ว และมีเครือข่ายที่เริ่มให้บริการ ไปไม่กี่ราย และการใช้งานก็ยังมีผู้ใช้ไม่มากนัก ต่อมาได้มีการกำหนดมาตรฐาน 802.16j ออกมาเมื่อปี ค.ศ. 2009 ซึ่งคือการนำสถานีถ่ายทอด (Relay Station : RS) มาใช้กับระบบไวแมกซ์ เพื่อแก้ไขในเรื่องของพื้นที่ครอบคลุม และจุดอับสัญญาณ

ในมาตรฐาน 802.16d มีความสามารถในการให้บริการทั้งแบบประจำ (Fixed) ซึ่งเป็นการให้บริการที่ผู้ใช้บริการ (Subscriber Station : SS) จะอยู่กับที่ ไม่มีการเคลื่อนที่ใด ๆ และแบบเคลื่อนที่ตามจุด (Nomadic) ซึ่งเป็นการให้บริการแบบที่ผู้ใช้เคลื่อนย้ายตำแหน่งได้บ้าง

แต่ไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ได้ในขณะที่กำลังใช้งานได้ ตัวอย่างเช่น เราสามารถที่จะย้ายที่นั่งภายในร้านขายกาแฟเพื่อหามุมสงบในการทำงานได้ แต่ไม่ใช่อยู่บนรถที่กำลังเคลื่อนที่เป็นต้น ความสามารถในการให้บริการแบบเคลื่อนที่ได้นั้นจะมีอยู่ในมาตรฐาน 802.16e เท่านั้น ซึ่งผู้ใช้งานจะสามารถใช้งานได้ขณะกำลังเคลื่อนที่ เช่น บนรถประจำทางหรือรถไฟ เป็นต้น ซึ่งเป็นความแตกต่างของทั้ง 2 มาตรฐานนี้ และเป็นสาเหตุให้ผู้ผลิตมีความสนใจในมาตรฐาน 802.16e กันอย่างมาก เพราะความสามารถที่โดดเด่นกว่านั่นเอง แต่ทั้งสองมาตรฐานที่กล่าวถึงก็ยังมีข้อเสียอยู่เหมือนกันคือ เรื่องพื้นที่ครอบคลุม และจุดอับสัญญาณ จึงได้มีการพัฒนามาตรฐาน 802.16j ซึ่งเป็นมาตรฐานที่ได้นำสถานีถ่ายทอดเข้ามาใช้ เพื่อช่วยแก้ปัญหาเรื่องพื้นที่ครอบคลุม และจุดอับสัญญาณ ทั้งยังเป็นการประหยัดค่าใช้จ่าย ไม่ว่าจะค่าติดตั้งสถานีฐาน (Base Station : BS) หรือค่าการติดตั้งสายใยแก้วนำแสง

โดยงานวิจัยนี้ได้คำนึงถึงการหาพื้นที่ครอบคลุมของสัญญาณ เมื่อมีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพิ่มขึ้น ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้วิธีต่าง ๆ อย่างมากมายในการหาพื้นที่ครอบคลุมหรือตำแหน่งการติดตั้งสถานีถ่ายทอด แต่ยังไม่มียานวิจัยที่คำนึงถึงกระบวนการต่าง ๆ ในชั้นกายภาพของระบบไวแมกซ์ ซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้ระบบไวแมกซ์ มีอัตราการรับส่งข้อมูลที่เร็วขึ้นกว่าการติดต่อสื่อสารไร้สายแบบอื่น ไม่ว่าจะเป็น การเข้ารหัสรีดโซโลมอน (Reed-Solomon Encoder) การเข้ารหัสคอนโวลูชัน (Convolution Encoder) การเข้ารหัสเกรย์ การมอดูเลชันแบบ OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) การทำ Cyclic Prefix (CP) ซึ่งกระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ เป็นสิ่งช่วยแก้ปัญหาของการติดต่อสื่อสารไร้สายต่าง ๆ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการจำลองแบบเพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่มีต่อกระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้ ออกมาเป็นค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูล (Bit Error Rate : BER) กับระยะทาง และแสดงให้เห็นถึงการติดตั้งสถานีถ่ายทอด ว่ามีผลกระทบต่อค่า BER อย่างไร และใช้ค่า BER นี้ เป็นตัวตัดสินใจ ในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ อีกด้วย และได้ทำการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์โดยแสดงถึงค่า BER ที่แปรผันตามระยะทาง เพื่อเป็นการง่ายในการคำนวณหาตำแหน่งที่จะทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในเบื้องต้น โดยใช้ค่า BER เป็นตัวตัดสินใจ เพื่อให้ได้พื้นที่ครอบคลุมของสถานีถ่ายทอดนี้มีค่า BER ตามที่เราต้องการได้ ซึ่งจะช่วยสร้างความมั่นใจให้กับผู้ให้บริการว่าจะได้รับอัตราเร็วการรับส่งข้อมูลตามที่ต้องการได้อย่างแน่นอน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการหาพื้นที่ครอบคลุมของสถานีถ่ายทอดของระบบไวแมกซ์ โดยพิจารณาที่ค่า BER เป็นปัจจัยหลัก โดยรายละเอียดสามารถอธิบายได้ดังนี้

- เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลกระทบของระยะทางที่มีต่อสมรรถภาพของระบบไวแมกซ์ 802.16j โดยใช้ค่า BER เป็นปัจจัยหลักในการพิจารณา
- เพื่อหาวิธีการออกแบบตำแหน่งติดตั้งสถานีถ่ายทอดหลาย ๆ สถานี เพื่อให้พื้นที่ครอบคลุมมีค่า BER ตามที่กำหนด

### 1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- ใช้โปรแกรมแมทแลบ (MATLAB) ในการจำลองผลของระบบไวแมกซ์ 802.16j
- สร้างสมการคณิตศาสตร์เพื่อหาตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดในการติดตั้ง ให้ได้ BER ตามที่ต้องการมากกว่า 1 สถานี

### 1.4 ขอบเขตงานวิจัย

- ศึกษาโครงสร้างและหลักการทำงานของระบบไวแมกซ์ 802.16j
- ออกแบบและจำลองผลค่า BER โดยใช้โปรแกรมแมทแลบ
- ทำการออกแบบสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการหาตำแหน่งที่ติดตั้งสถานีถ่ายทอดตามที่ต้องการมากกว่า 1 สถานี
- พิจารณาทางกายภาพเท่านั้น

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ผลที่ได้ช่วยในการตัดสินใจที่จะทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดที่ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบไวแมกซ์ 802.16j เพื่อแสดงให้เห็นถึงย่านพื้นที่ครอบคลุมในการทำงานของระบบไวแมกซ์ 802.16j ที่ได้คำนึงถึงผลของการเข้ารหัสต่าง ๆ ในชั้นกายภาพของระบบไวแมกซ์

### 1.6 รายละเอียดวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท

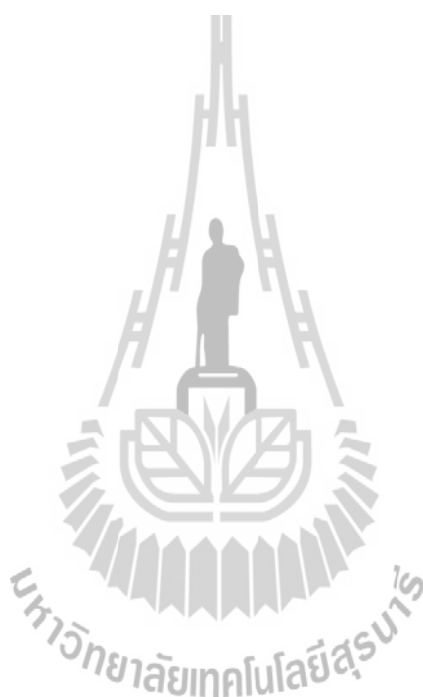
**บทที่ 1** เป็นบทนำกล่าวถึงที่มาและความสำคัญของการทำวิทยานิพนธ์นี้ วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

**บทที่ 2** กล่าวถึงประเภทของการเข้าถึงแบนด์วิธแบบไร้สาย ซึ่งจะเน้นไปที่ชั้นกายภาพระบบไวแมกซ์ การเข้ารหัสต่าง ๆ ของระบบไวแมกซ์ การลดทอนของสัญญาณ รูปแบบของสถานีถ่ายทอด

**บทที่ 3** กล่าวถึงการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับวิธีการหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด แนวคิดในการออกแบบวิธีที่เสนอในวิทยานิพนธ์

**บทที่ 4** กล่าวถึงการจำลองแบบระบบไวแมกซ์ ทั้งที่มีสถานีถ่ายทอดและไม่มีสถานีถ่ายทอด และตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด ที่ระยะต่าง ๆ กัน และได้กล่าวถึงการสร้างสมการในการคำนวณ เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบจำลอง เพื่อเป็นการสะดวก และง่ายในการนำไปใช้งานจริง

**บทที่ 5** กล่าวถึงการสรุปเกี่ยวกับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์ นอกจากนี้ยังรวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้น ข้อเสนอแนะแนวทางแก้ไข และแนวทางการพัฒนาในอนาคต



## บทที่ 2

### เทคโนโลยีการเข้าถึงแบนด์กว้างแบบไร้สาย

ในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงการสื่อสารไร้สายของระบบไวแมกซ์ ระหว่างอุปกรณ์สื่อสารกับสถานีฐาน หรือเรียกว่าแอร์อินเตอร์เฟซ (Air interface) มาตรฐานของระบบไวแมกซ์โครงสร้างของระบบ (Frame Structure) แบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่ใช้ในระบบไวแมกซ์รูปแบบสถาปัตยกรรมของสถานีถ่ายทอด

#### 2.1 บทนำ

จากการพัฒนาที่เพิ่มมากขึ้นของเครือข่ายดิจิทัล ทำให้เกิดความต้องการสำหรับรูปแบบของเครือข่ายการติดต่อสื่อสารไร้สายแบบใหม่ ที่ให้ค่าความจุที่สูงขึ้นและอุตสาหกรรมทางด้านการติดต่อสื่อสารก็มีการเปลี่ยนแปลงเช่นกัน เนื่องจากความต้องการของผู้ใช้บริการที่สูงขึ้น เช่น การประชุมสัมมนาทางโทรทัศน์ (Video Conference) หรือ มัลติมีเดีย (Multimedia) และจากการใช้งานที่เพิ่มสูงขึ้นของเครือข่ายคอมพิวเตอร์และอินเทอร์เน็ตนั้น เป็นผลทำให้มีความต้องการในการติดต่อสื่อสารเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลให้เกิดความต้องการความจุที่เพิ่มมากขึ้น และความน่าเชื่อถือในระบบการติดต่อสื่อสารไร้สาย

การติดต่อสื่อสารบรอดแบนด์นั้น ทำให้เกิดการเชื่อมต่อกันที่สูงขึ้นกว่าพันล้านของผู้ใช้งานทั้งหมดทั่วโลก ดังนั้น ในการพัฒนามาตรฐานบรอดแบนด์ไร้สาย และเทคโนโลยีแบบใหม่จะเป็นสิ่งที่ช่วยก้าวข้ามในเรื่องของพื้นที่ครอบคลุมไร้สายได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการติดต่อสื่อสารไร้สายแบบดิจิทัลที่ได้ปรากฏขึ้นมาในช่วงระยะเวลาเมื่อไม่กี่ปีที่ผ่านมา แต่อย่างไรก็ตาม การพัฒนาอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีการติดต่อสื่อสารไร้สาย (Wireless LANs) และความต้องการในการใช้งานอินเทอร์เน็ตที่เติบโตขึ้นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล เป็นผลทำให้เกิดความต้องการสำหรับวิธีการใหม่ ๆ ที่จะให้ค่าความจุของช่องสัญญาณที่สูงขึ้นของระบบเครือข่ายไร้สาย

ไวแมกซ์ เป็นชื่อเรียกมาตรฐานเครือข่ายไร้สาย ที่มีจุดมุ่งหมายสำหรับรูปแบบการใช้งานร่วมกันสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้งานกับมาตรฐาน 802.16 โดยไวแมกซ์หรือมาตรฐาน 802.16 ได้ถูกกำหนดขึ้น โดย IEEE ซึ่งเป็นองค์กรที่มีหน้าที่ในการกำหนดมาตรฐานเกี่ยวกับการสื่อสารของอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ โดยไวแมกซ์นั้น ได้ถูกจัดอยู่ในประเภทของ Wireless Metropolitan Area Network (WMAN) ซึ่งก็คือ เทคโนโลยีการเข้าถึงไร้สายในพื้นที่เขตเมืองหรือพื้นที่ขนาดใหญ่ และให้การติดต่อสื่อสารบรอดแบนด์ไร้สายร่วมกันทั้งแบบประจำที่ (Fixed) แบบเคลื่อนที่

แบบเข้า ๆ (Portable) และแบบเคลื่อนที่เร็ว ๆ (Mobility) ซึ่งเป็นตัวเลือกอีกทางหนึ่งของการติดต่อสื่อสารแบบไร้สาย เช่น Wireless-Fidelity (Wi-Fi) และเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการเชื่อมต่อโดยใช้สาย เช่น สายผู้เช่าเชิงดิจิทัล (Digital Subscriber Line : DSL) และ T1/E1/ ดังนั้น ไวแมกซ์จึงได้กลายเป็นอีกหนึ่งวิธีในการพัฒนาอุตสาหกรรมบรอดแบนด์ นอกจากนี้ อุปกรณ์ที่ใช้กับเทคโนโลยีไวแมกซ์นั้นยังสามารถใช้งานร่วมกับเทคโนโลยีอื่นได้อีกด้วย เพื่อให้เกิดการใช้งานที่ประโยชน์สูงสุด

## 2.2 มาตรฐานของระบบไวแมกซ์

IEEE 802.16 เป็นกลุ่มการทำงานที่ตั้งขึ้นโดยสถาบัน IEEE ในปี ค.ศ. 1999 ซึ่งอยู่ภายใต้มาตรฐานของ IEEE 802 LAN/MAN (Local Area Network/Metropolitan Area Network) โดยมีคณะกรรมการที่มีมาตรฐาน โดยมาตรฐานแรกของ 802.16 ได้รับการอนุมัติในเดือนธันวาคม 2001

- IEEE 802.16: เป็นมาตรฐานพื้นฐานของ 802.16 ที่ถูกปล่อยออกมาในปี ค.ศ. 2001 ซึ่งใช้สำหรับการเชื่อมโยงข้อมูลพื้นฐานความเร็วสูง ที่ความถี่ระหว่าง 11-66 GHz
- IEEE 802.16a: เป็นมาตรฐานที่มีการทำงานที่ความถี่ระหว่าง 2-11 GHz เนื่องจากสัญญาณที่มีความถี่ต่ำนั้น สามารถทะลุผ่านสิ่งกีดขวางได้และทำให้สามารถเชื่อมต่อในแนวสายตา ระหว่างตัวรับส่งสัญญาณ ในทางการพาณิชย์นั้นมีความสนใจสำหรับการใช้งานที่ความถี่ต่ำ ซึ่งภายใต้มาตรฐานนี้ IEEE 802.16a ได้รับการอนุมัติเมื่อเดือนมกราคม ค.ศ. 2001 ซึ่งจะช่วยให้การใช้งานไวแมกซ์มีความยืดหยุ่นที่ดีและยังรักษาระดับอัตราการรับส่งข้อมูลและระยะในการใช้งาน ได้เป็นอย่างดี และมาตรฐานนี้ยังรองรับเครือข่ายแบบเมช (Mesh Network) อีกด้วย โดยสามารถขยายพื้นที่ครอบคลุมของเครือข่ายและทำการเพิ่มวิสัยทัศน์ (Throughput) ได้อีกด้วย
- IEEE 802.16b: มาตรฐานนี้ได้ทำการเพิ่มแถบความถี่สเปคตรัมเป็น 5 และ 6 GHz ซึ่งให้ค่าคุณภาพการให้บริการ (Quality Of Service : QOS) ที่รับประกันได้ในเรื่องของการรับส่งข้อมูลสำหรับการใช้งานแบบทันที (Real-Time) และเพื่อให้เกิดความแตกต่างกันสำหรับการให้บริการในแต่ละระดับชั้นสำหรับทราฟฟิกที่แตกต่างกัน
- IEEE 802.16c: มาตรฐานนี้ได้ถูกกำหนดให้ใช้งานที่ความถี่ 10-66 GHz ซึ่งย่านความถี่ที่สูงนี้สามารถใช้แบนด์วิดท์ที่เพิ่มขึ้นได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ แต่สัญญาณไม่สามารถผ่านสิ่งกีดขวางได้จึงมีการใช้การส่งสัญญาณในแนวสายตาเท่านั้น
- IEEE 802.16d: ได้ถูกอนุมัติในเดือนมิถุนายน ค.ศ. 2004 ซึ่งมาตรฐาน IEEE 802.16d ได้พัฒนามาจากมาตรฐาน 802.16a โดยส่วนที่ได้เพิ่มเข้าไปนั้น มีจุดประสงค์เพื่อทำการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานสำหรับ 802.16 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของการทราฟฟิกของสัญญาณขาขึ้น

- IEEE 802.16e: เป็นเครือข่ายมาตรฐานของเทคโนโลยีระหว่างสถานีฐานแบบประจำที่ และแบบเคลื่อนที่ โดยมาตรฐานนี้ทำให้เกิดการส่งต่อ (Hand-Off) ในขณะที่มีการรับส่งสัญญาณที่ ความเร็วสูงสำหรับการติดต่อสื่อสารของผู้ใช้ที่เคลื่อนที่ด้วยยานพาหนะ ซึ่งรองรับการเคลื่อนที่ที่มี ความเร็วสูงถึง 110-130 กม./ชม. โดยที่ผู้ใช้บริการสามารถติดต่อสื่อสารด้วยอุปกรณ์ส่วนตัว ได้ เช่น มือถือ โน้ตบุ๊ก
- IEEE 802.16f: เป็นมาตรฐานที่ถูกกำหนดขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 2005 โดยถูกกำหนดขึ้นเพื่อ ใช้กำหนดเกี่ยวกับฐานข้อมูลสารสนเทศการจัดการ (Management Information Base : MIB) สำหรับ ชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง (Medium Access Control layer : MAC layer) และชั้นกายภาพ (Physical layers : PHY layer) และวิธีในการจัดการที่สัมพันธ์กัน
- IEEE 802.16g: เป็นมาตรฐานที่ถูกกำหนดขึ้นโดยให้มีความสอดคล้องกับอุปกรณ์และ การให้บริการแบบทำงานร่วมกันและประสิทธิภาพในการจัดการเครือข่ายข้อมูล
- IEEE 802.16h: เป็นมาตรฐานที่กำหนดออกมาเพื่อใช้ในการปรับปรุงกลไก โดยการ ปรับปรุงวิธีการและชั้นควบคุมส่วนกลางให้ดีขึ้น เพื่อทำการขยายระบบจำพวกที่ความถี่ที่ได้รับการ ยกเว้นบนพื้นฐานของระบบ IEEE 802.16 และเพื่อให้เป็นการง่ายในการขยายของระบบดังกล่าว ที่มีผู้ใช้งานเป็นหลัก
- IEEE 802.16i: เป็นมาตรฐานที่ถูกกำหนดขึ้นมาเพื่อทำการปรับปรุงให้ดีขึ้นในส่วน ของการเคลื่อนที่ของ MIB สำหรับ MAC และ PHY ตลอดจนกระบวนการจัดการร่วมกัน
- IEEE 802.16j: เป็นมาตรฐานที่ถูกกำหนดขึ้น โดยมีการนำสถานีถ่ายทอดมาใช้งาน สำหรับ Mobile Multihop Relay (MMR) โดยมีทั้งฟังก์ชันและรูปแบบการใช้งานร่วมกันเพื่อเพิ่ม พื้นที่ครอบคลุม วิสัยสามารถ และความจุของระบบภายในเครือข่าย 802.16
- IEEE 802.16k: เป็นการเชื่อมต่อทางอากาศขั้นสูง โดยมีอัตราการรับส่งข้อมูล 100 Mbps สำหรับการใช้งานแบบเคลื่อนที่ และให้อัตราเร็วการรับส่งข้อมูลสูงถึง 1 Gbps สำหรับการ ใช้งานแบบประจำที่
- IEEE 802.16m: เป็นการเชื่อมต่อทางอากาศขั้นสูง โดยมีอัตราการรับส่งข้อมูล 100 Mbps สำหรับการใช้งานแบบเคลื่อนที่ และให้อัตราเร็วการรับส่งข้อมูลสูงถึง 1 Gbps สำหรับการ ใช้งานแบบประจำที่ โดยใช้กับระบบเซลล์ลูลาร์ที่มีพื้นที่ครอบคลุมของมหภาค (Macro) และจุลภาค (Micro) ซึ่งไม่มีการจำกัดแบนด์วิดท์ในการใช้งาน (ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็น 20 MHz หรือสูงกว่า)



## 2.3 ข้อกำหนดของระบบไวแมกซ์

มาตรฐานระบบไวแมกซ์ ได้มีการกำหนดรูปแบบในการเชื่อมต่อกันทางอากาศสำหรับ IEEE 802.16d ให้มีการทำงานที่ความถี่ย่าน 2-11 GHz โดยการเชื่อมต่อกันทางอากาศนี้ รวมถึงชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลางและชั้นกายภาพด้วย

### 2.3.1 ชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง (MAC layer)

ในบางฟังก์ชันที่ให้บริการกับผู้ใช้บริการ ผู้ให้บริการได้เพิ่มการส่งข้อมูลในรูปแบบของเฟรมและทำการควบคุมการเข้าถึงสื่อกลางไร้สายที่ใช้งานร่วมกัน ชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลางเป็นชั้นที่มีตำแหน่งอยู่เหนือตำแหน่งของชั้นกายภาพ

โปรโตคอลการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลางต้นแบบนั้น ถูกเพิ่มเข้ามาเพื่อรองรับคุณสมบัติทางกายภาพหลายอย่างและให้บริการที่ตอบสนองความต้องการสำหรับสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน แต่โดยแท้จริงแล้วนั้น ได้ถูกออกแบบมาเพื่อให้ใช้งานกับโครงสร้างเครือข่ายแบบหนึ่งจุดไปยังหลายจุด (Point-to-Multipoint Topology Networks) โดยใช้สถานีฐานในการควบคุมอย่างอิสระพร้อม ๆ กัน ซึ่งในขั้นตอนการเข้าถึงและการจัดสรรแบนด์วิดท์นั้นจะต้องรองรับได้หลายร้อยจุดหมายปลายทางต่อช่องสัญญาณ ซึ่งจุดหมายปลายทางนั้นอาจจะถูกใช้งานร่วมกันโดยผู้ใช้หลาย ๆ คน ดังนั้น โปรโตคอลการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลางจะทำการกำหนดวิธีการเมื่อสถานีฐานหรือผู้ใช้งานเริ่มใช้งานการรับส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณ โดยขณะที่สัญญาณขาลงนั้นจะใช้เครื่องส่งเพียงแคตัวเดียว แต่สำหรับสัญญาณขาขึ้นนั้นจะมีสัญญาณจากผู้ใช้หลายคน โปรโตคอลการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลางจะใช้เทคนิคการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access : TDMA) ซึ่งทำให้ใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ผู้ใช้หลายคนก็จะมีความต้องการการให้บริการที่แตกต่างกันอย่างมาก เช่น การรับส่งเสียงและข้อมูล การเชื่อมต่อกันทางอินเทอร์เน็ต โปรโตคอล และการส่งสัญญาณเสียงผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต (Voice Over Internet Protocol : VoIP) เพื่อที่จะรองรับความต้องการของการให้บริการที่หลากหลายนั้น ชั้น MAC จะต้องรองรับทั้งกราฟฟิกแบบต่อเนื่องและแบบเป็นช่วง ๆ โดยการปรับความเร็วของข้อมูลและการประวิงเวลาเพื่อรองรับความต้องการของแต่ละการบริการ นอกจากนี้ก็จะมีกลไกการทำงานของการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลาง สำหรับความแตกต่างของคุณภาพการให้บริการ เพื่อรองรับความต้องการของโปรแกรมต่าง ๆ

ปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลก็ยังคงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอยู่อย่างมาก ทั้งในเรื่องของการมอดูเลชันและรูปแบบการเข้ารหัสได้ถูกกำหนดให้กระจายอยู่ในโปรไฟล์ ซึ่งได้ทำการปรับเทียบและปรับตัวสำหรับแต่ละรูปแบบไปยังแต่ละผู้ใช้บริการ ทำให้สามารถใช้งานประสิทธิภาพแบนด์วิดท์ และทำมิให้อัตราการรับส่งข้อมูลที่เหมาะสม และยังเพิ่มค่าความจุของระบบขึ้นอีกด้วย โดยในส่วนของกลไกการร้องขอนั้น ได้ถูกออกแบบมาให้สามารถปรับขนาดได้

ซึ่งมีประสิทธิภาพและสามารถแก้ไขได้ด้วยตัวเอง โดยให้ระบบสามารถปรับขนาดได้จากหนึ่งผู้ใช้งานถึงหนึ่งร้อยผู้ใช้งาน โดยคุณสมบัติที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลคือ การขอส่งข้อมูลซ้ำอัตโนมัติ (Automatic Repeat reQuest : ARQ) รวมถึงการรองรับสำหรับโครงสร้างแบบเมชมากกว่าสถาปัตยกรรมเครือข่ายแบบจุดต่อหลายจุด ซึ่งความเป็นไปได้ของการทำงานสำหรับโครงสร้างแบบเมชนั้น จะทำการติดต่อสื่อสารระหว่างผู้ใช้งานด้วยกัน ซึ่งช่วยปรับปรุงขีดความสามารถของระบบ และมาตรฐานนี้ยังสามารถรองรับการควบคุมพลังงานอัตโนมัติ (Automatic Power Control) กลไกการรักษาความปลอดภัยและการเข้ารหัสได้อีกด้วย

### 2.3.2 ชั้นกายภาพ (PHY layer)

มาตรฐาน 802.16d ได้กำหนดกระบวนการที่แตกต่างกันที่สามารถใช้ร่วมกับชั้นการควบคุมการเข้าใช้สื่อกลางซึ่งจะทำการเชื่อมโยงกันแบบ End-to-End ที่เชื่อถือได้ โดยในชั้นกายภาพมีข้อกำหนดการใช้งานดังนี้

- A Single Carrier (SC) modulated air interface
- A 256 – point Fast Fourier Transform (FFT) OFDM multiplexing scheme
- A 2048 – point FFT Orthogonal Frequency Division Multiple Access

(OFDMA) scheme

โดย SC ที่เชื่อมต่อกันทางอากาศนั้น ถูกใช้สำหรับการรับส่งข้อมูลในแบบ LOS ส่วนระบบ OFDM อีก 2 มาตรฐาน ถูกใช้สำหรับการรับส่งข้อมูลแบบ NLOS เนื่องจากความเรียบง่ายของขั้นตอนในการปรับเท่า (Equalization) สำหรับสัญญาณหลายคลื่นพาห์ (Multicarrier Signal) โดยมาตรฐานระบบไวแมกซ์แบบประจำที่ ในชั้นกายภาพได้กำหนดให้ใช้ 256 FFT OFDM และนอกจากนี้ระบบไวแมกซ์แบบประจำที่ยังสามารถรองรับการให้บริการได้ถึง 5 กม. โดยมีอัตราการรับส่งข้อมูลสูงสุดอยู่ที่ 70 Mbps ซึ่งใช้แบนด์วิธ 20 MHz และให้ผู้ใช้เชื่อมต่อสู่อินเตอร์เน็ตได้ด้วยรูปแบบ LOS กับสถานีฐาน

คุณสมบัติตามหลักการของระบบไวแมกซ์มีรายละเอียดดังนี้

- การใช้รูปแบบการมอดูเลชัน OFDM จะทำให้มีรูปแบบในการรับส่งสัญญาณต่าง ๆ โดยใช้คลื่นพาห์ย่อยที่แตกต่างกันพร้อม ๆ กัน เนื่องจากคลื่น OFDM ประกอบไปด้วยคลื่นพาห์หลาย ๆ พาห์ที่ตั้งฉากกัน และเฟดดิ้งที่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ (Selective Fading) ถูกใช้เป็นข้อเสยของคลื่นพาห์ซึ่งง่ายต่อการปรับเท่า

- การออกแบบการมอดูเลชันแบบปรับตัวและโครงสร้างการเข้ารหัสนั้นจะขึ้นอยู่กับช่องสัญญาณและเงื่อนไขของการแทรกสอด โดยจะมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบในการมอดูเลชัน เพื่อให้เกิดความทนทานที่เหมาะสมที่สุดต่อช่องสัญญาณในขณะนั้น เพื่อให้ได้มาซึ่งอัตราเร็วการรับส่งข้อมูลที่เร็วที่สุด เนื่องจากแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันที่มีในระบบไวแมกซ์นั้น

มีความสามารถในการทนทานต่อสภาพช่องสัญญาณที่แตกต่างกัน และให้อัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลที่แตกต่างกันอีกด้วย ซึ่งในการปรับตัวแบบนี้ เป็นวิธีการที่ทำให้ใช้แบนด์วิดท์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด

- รองรับรูปแบบการสื่อสารทั้งการสื่อสารสองทางด้วยวิธีการแบ่งเวลา (Time Division Duplex : TDD) และการสื่อสารสองทางด้วยวิธีการแบ่งความถี่ (Frequency Division Duplex : FDD) โดยสามารถปรับเปลี่ยนไปได้ตามข้อกำหนดของแต่ละประเทศ

- มีเทคนิคการแก้ไขความผิดพลาดแบบล่วงหน้า (Forward Error Correction : FEC) ที่ทนทาน ซึ่งถูกใช้ในการตรวจจับและแก้ไขข้อมูลที่ผิดพลาด เพื่อเพิ่มวิสัยความสามารถ โดยโครงสร้างของ FEC นี้ใช้รูปแบบการเข้ารหัสรีด โข โลมอนเชื่อมกับการเข้ารหัสคอนโวลูชัน และตามด้วยกระบวนการวางสลับ (Interleaving) และยังมีทางเลือกอีกหลายทางในการเลือกใช้งาน คือ Block Turbo Coding (BTC) และ Convolution Turbo Coding (CTC)

- มีการใช้งานแบนด์วิดท์ช่องสัญญาณที่ความถี่ตั้งแต่ 1.25-20 MHz จึงทำให้มีความยืดหยุ่นที่ในการสร้างย่านความถี่ที่แตกต่างกันอย่างหลากหลายจากช่องสัญญาณที่มีอยู่อย่างมากมายบนโลกใบนี้ ความยืดหยุ่นนี้ทำให้การรับส่งสัญญาณบนระยะทางที่ไกลได้ง่ายขึ้น และมีการทำงานของพื้นที่ให้บริการที่เหมาะสม ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญมากในการออกแบบเซลล์ และโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับย่านความถี่ที่ค่อนข้างอนุญาต ซึ่งแต่ละประเทศก็จะมีการกำหนดที่แตกต่างกัน

- มีการรองรับการรับส่งข้อมูลด้วยเทคนิคไดเวอร์ซิตี (Diversity) เพื่อที่จะทำให้ระบบดีขึ้นในสภาพแวดล้อมของการจางหายโดยผ่าน Spatial Diversity ซึ่งในระบบนี้จะเพิ่มความจุของช่องสัญญาณ อุปกรณ์ของตัวส่งสัญญาณ Space Time Coding (STC) ให้การส่งข้อมูลที่อิสระ เพื่อลดระดับการจางหายตามที่ต้องการ และป้องกันการเกิดสัญญาณแทรกสอดได้อีกด้วย อีกทั้งยังมีการใช้เทคนิค Maximum Ratio Combining (MRC) ที่เครื่องที่ใช้รับสัญญาณ เพื่อเพิ่มความสามารถของระบบอีกด้วย

- มีการรองรับการใช้งานด้วยเทคนิคเสาอากาศเก่ง (Smart Antenna) ซึ่งสามารถทำการปรับบีบไปในทิศทางที่เครื่องรับอยู่ได้ และได้มีการป้องกันสัญญาณรบกวนระหว่างช่องสัญญาณที่ติดกันและเพิ่มความหนาแน่นของสเปกตรัมและอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio : SNR) โดยเสาอากาศเก่งมีพื้นฐานอยู่ 2 แบบ คือ Multiple Beam (Direct Antenna) และอีกอย่างหนึ่งคือ Adaptive Antenna System (AAS) โดยแบบแรก เราจะใช้การกำหนดจำนวนบีบที่เหมาะสมในการส่ง หรือใช้บีบนำทางด้วยเสาอากาศที่ออกแบบ และประเภทที่สอง ใช้กับเสาอากาศจำนวนหลายต้น ด้วยแบบรูปลำคลื่นที่หลากหลาย ทำให้เสาอากาศเก่งกลายเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจที่จะนำไปใช้กับการเข้าถึงบอร์ดแบนด์ไร้สาย

- รองรับเทคนิคการมัลติเพล็กซ์หรือแบ่งใช้เชิงเวลา (Time Division Multiplex : TDM) และเทคนิคการมัลติเพล็กซ์หรือแบ่งใช้เชิงความถี่หรือสหสัญญาณแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiplex : FDM) โดยจะใช้เทคนิค TDM เมื่อมีการใช้งานร่วมกันระหว่างการติดต่อสื่อสารด้วยระบบเซลลูล่า และจะใช้เทคนิค FDM ในการติดต่อสื่อสารด้วยระบบไร้สาย

## 2.4 โครงสร้างพื้นฐานของระบบไวแมกซ์

เนื้อหาส่วนนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบไวแมกซ์สำหรับมาตรฐานที่ใช้กันแบบประจำที่ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนได้ คือ ภาคส่ง และภาครับ

### ภาคส่ง (Transmitter)

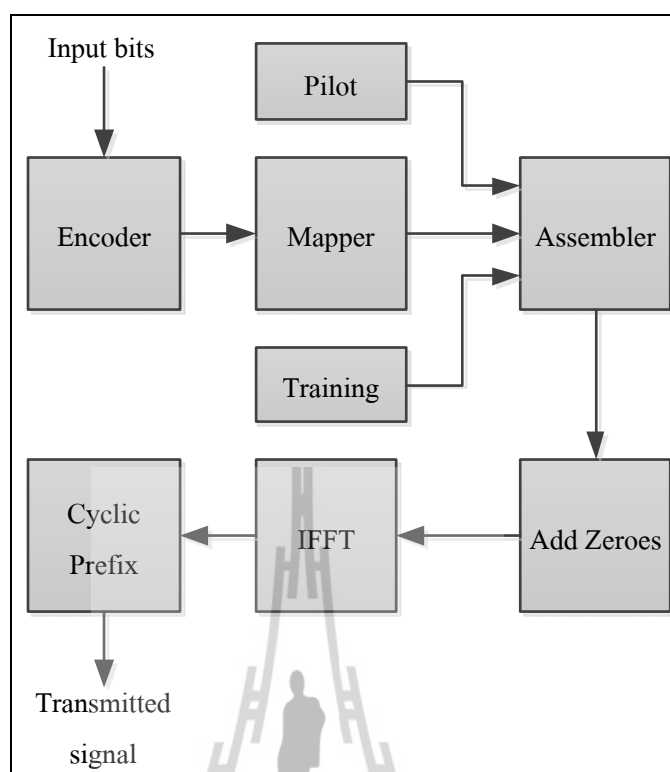
จากรูปที่ 2.1 สามารถแสดงให้เห็นถึงกระบวนการทำงานต่าง ๆ ที่ภาคส่งของระบบไวแมกซ์ได้ ซึ่งจะได้กล่าวเป็นลำดับ ดังนี้

โดยในลำดับแรกนั้น ข้อมูลจากแหล่งข้อมูลจะถูกทำการ Random และหลังจากนั้นจะทำการ เข้ารหัส แล้วจึงทำการมอดูเลชันบิต ไปเป็นสัญลักษณ์ และต่อมาก็ทำการจัดเรียงข้อมูลที่มีทั้งหมด 256 subcarrier ซึ่งประกอบด้วย 192 Data Subcarrier 1 Zero DC 8 Pilots Subcarrier และ 55 Guard Carrier

หลังจากผ่านกระบวนการ Assembling แล้ว สัญญาณจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของโดเมนเวลาโดย Inverse Fast Fourier Transformer (IFFT) algorithm และในตอนสุดท้ายได้มีการเพิ่ม CP เพื่อป้องกันการเกิดแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ (Inter Symbol Interference)

### 2.4.1 แหล่งกำเนิด (Source)

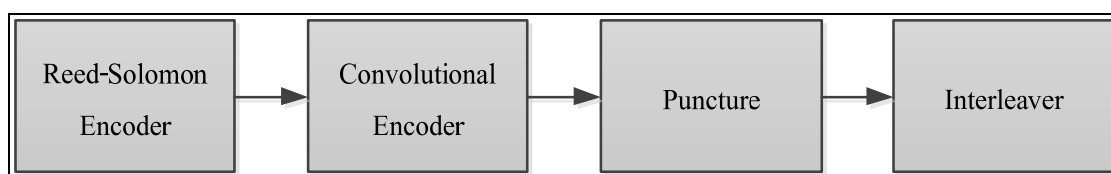
ข้อมูลบิตที่สร้างขึ้นมาจะต้องผ่านการทำ Random ก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการต่อไป โดยกระบวนการนี้ถูกใช้เพื่อลดความน่าจะเป็นของการส่งของ Non-Modulated Subcarriers โดยกระบวนการนี้จะดำเนินการบนแต่ละชุดข้อมูล (Burst Data) ทั้งขาขึ้นและขาลง ซึ่งอยู่ที่การจัดสรรข้อมูลของ Data Block (การทำ Subchannel บน โดเมนความถี่และสัญลักษณ์ OFDM บนโดเมนเวลา)



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมที่ภาคส่งของระบบไวแมกซ์

#### 2.4.2 การเข้ารหัส (Encoder)

รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการในการเข้ารหัสในระบบไวแมกซ์ ซึ่งประกอบไปด้วยการเข้ารหัสรีดโซโลมอนและการเข้ารหัสคอนโวลูชัน ซึ่งการเข้ารหัสทั้งสองอย่างนี้รวมเรียกว่า FEC โดยข้อมูลชุดแรกจะผ่านกระบวนการเข้ารหัสแต่ละอันอย่างเป็นระเบียบ โดยเริ่มแรกทำการเข้ารหัสรีดโซโลมอนก่อนแล้วจึงทำการเข้ารหัสคอนโวลูชัน ซึ่งเป็นการเข้ารหัสที่มีความยืดหยุ่นสูงเนื่องจากการทำพังเจอร์ (Puncture) และมีการใช้อัตราเร็วการเข้ารหัสที่แตกต่างกัน และในส่วนสุดท้ายของการเข้ารหัสก็คือการวางสลับเพื่อป้องกันการเกิด Error Burst



รูปที่ 2.2 กระบวนการเข้ารหัสในระบบไวแมกซ์

รูปแบบในการปรับเปลี่ยนความเร็วของการเข้ารหัสได้นั้น โดยถูกออกแบบโดยใช้เงื่อนไขของช่องสัญญาณ เพื่อทำการหาระดับการป้องกันความผิดพลาดที่ดีที่สุดให้แก่ผู้ใช้ โดยแต่ละรูปแบบของ FEC จะทำการจับคู่กับรูปแบบของการมอดูเลชันแต่ละแบบ ซึ่งจะมีความทนทานและประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน จากตารางที่ 2.1 บอกถึงขนาดของบล็อกและอัตราเร็วของการเข้ารหัสที่ใช้สำหรับแต่ละการมอดูเลชัน

ในส่วนเงื่อนไขของช่องสัญญาณที่ใช้ในการตัดสินใจนั้น ผู้ใช้จะทำการรายงานถึงสภาพของช่องสัญญาณในปัจจุบันไปยังสถานีฐาน ซึ่งสถานีฐานจะทำการกำหนดอัตราเร็วการเข้ารหัสจากการรายงานสภาพช่องสัญญาณนี้ โดยจะถูกเลือกมาใช้สำหรับการส่งข้อมูลขาลงนี้ ดังนั้น ผู้ใช้ที่เจอกับเงื่อนไขของช่องสัญญาณที่เลวร้าย (มีค่า SNR ที่ต่ำในขณะนั้น) จะเลือกใช้กระบวนการ FEC ที่สามารถทนต่อสภาพช่องสัญญาณที่เลวร้ายนี้ได้ ในขณะที่ โดยกระบวนการนี้เรียก การปรับตัวการมอดูเลชันและเข้ารหัส (Adaptive Modulation and Coding : AMC)

ในส่วนถัดไปจะเป็นการบอกถึงการทำงานในส่วนต่าง ๆ ของการเข้ารหัสในระบบไวแมกซ์

#### 1) การเข้ารหัสรีดโซโลมอน

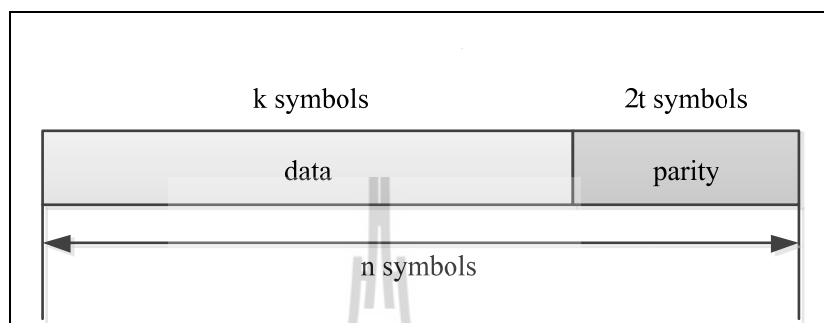
การเข้ารหัสรีดโซโลมอนเป็นการแก้ไขความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นสัญลักษณ์ ซึ่งเป็นการแก้ไขที่ได้ผลดีมาก เพราะว่ามีสัญลักษณ์จะมีอยู่หลายบิตด้วยกัน (แก้ไขความผิดพลาดที่เกิดจาก Error Bursts ได้ดี)

การเข้ารหัสรีดโซโลมอนถูกกำหนดด้วย  $(n, k, t)$  ที่มีขนาด  $m$  บิต หมายความว่า ตัวเข้ารหัสรับข้อมูลมา  $k$  สัญลักษณ์จากทั้งหมด  $m$  บิต และเพิ่ม  $2t$  สัญลักษณ์ จะได้คำรหัส (Code Word) จำนวน  $n$  สัญลักษณ์

ตารางที่ 2.1 รูปแบบการมอดูเลชันและการเข้ารหัสในระบบไวแมกซ์

Modulation	RS Code	CC Code Rate	Overall Code Rate
BPSK	(12,12,0)	1/2	1/2
QPSK	(32,24,4)	2/3	1/2
QPSK	(40,36,2)	5/6	3/4
16-QAM	(64,48,4)	2/3	1/2
16-QAM	(80,72,4)	5/6	3/4
64-QAM	(108,96,6)	3/4	2/3
64-QAM	(120,108,6)	5/6	3/4

ความสามารถในการแก้ไขความผิดพลาดต่าง ๆ ของการเข้ารหัสแบบรีดโซโลมอนนั้น ถูกอธิบายโดย  $(n - k)$  ซึ่งถูกกำหนดจากส่วนซ้ำซ้อน (Redundancy) ในบล็อก ถ้าตำแหน่งของสัญลักษณ์ที่ผิดพลาดไม่ถูกรู้ก่อนหน้านั้น เมื่อนั้นการเข้ารหัสรีดโซโลมอนจะสามารถทำการแก้ไขได้ถึง  $t$  สัญลักษณ์ ซึ่งค่า  $t$  สามารถอธิบายได้ดังสมการที่ (2.1)



รูปที่ 2.3 การเข้ารหัสรีดโซโลมอน

$$t = \frac{(n - k)}{2} \quad (2.1)$$

โดยที่  $n$  คือ จำนวนของไบต์หลังจากเข้ารหัส

$k$  คือ จำนวนของไบต์ก่อนเข้ารหัส

$t$  คือ จำนวนของข้อมูลไบต์ที่สามารถตรวจจับได้

ในการเข้ารหัสนั้น พหุนามกำเนิด (Generator Polynomial) ของการเข้ารหัสแบบรีดโซโลมอน เขียนได้ดังสมการที่ (2.2)

$$g(x) = \sum_{i=0}^{2t} g_{2^i} x^{2^i} = g_0 + g_1 + g_2 x^2 + \dots + g_{2^t} x^{2^t} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $g_i \in GF(2^m)$  ดีกรีของพหุนามจำนวนพหุนามกำเนิดคือ  $2t$  ดังนั้นจึงสามารถที่จะกำหนดจากจำนวนรากที่ต่อเนื่องจำนวน  $2t$  ราก หรือเมื่อเขียนเป็นรูปทั่วไปจะได้ดังสมการที่ (2.3)

$$g(x) = \prod_{i=j_0}^{j_0+2t-1} (x - \alpha^i) \quad (2.3)$$

ปกติแล้วจะให้  $j_0 = 1$  แต่บางกรณี  $j_0 \neq 1$  ก็ได้ เช่น  $2(j_0 + t) = 2^m$   
ในกรณีต้องการสัมประสิทธิ์  $g(x)$  แบบสมมาตร

- การเข้ารหัสเชิงระบบ

เนื่องจากว่ารหัสรีดโซโลมอนเป็นรหัสวนรอบ การเลื่อน (ไปทางขวา) ของคำรหัสก็ยังคงเป็นคำรหัสอยู่ เช่นนี้ลองเลื่อน  $k$  ข้อมูลไปจนขวาสุด แล้วเติมส่วน  $2t$  ตำแหน่งทางด้านหน้า เราก็จะได้รหัสรีดโซโลมอนเชิงระบบ การกระทำดังกล่าวในเชิงคณิตศาสตร์ก็คือ เรากำลังทำ  $x^{(n-k)}m(x)$  ต่อมาทำการหาร  $x^{(n-k)}m(x)$  ด้วย  $g(x)$  ก็จะมีเศษเหลือ ซึ่งก็คือ พหุคูณนั่นเองโดยแสดงไว้ในสมการที่ (2.4)

$$x^{(n-k)}m(x) = Q(x)g(x) + p(x) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $Q(x)$  คือผลหารที่ได้และ  $g(x)$  คือเศษเหลือ และเมื่อเราสนใจเฉพาะเศษเหลือจึงเขียนใหม่ได้เป็นตามสมการที่ (2.5)

$$p(x) = x^{(n-k)}m(x) \bmod q(x) \quad \text{หรือ} \quad p(x) = x^{2t}m(x) \bmod q(x) \quad (2.5)$$

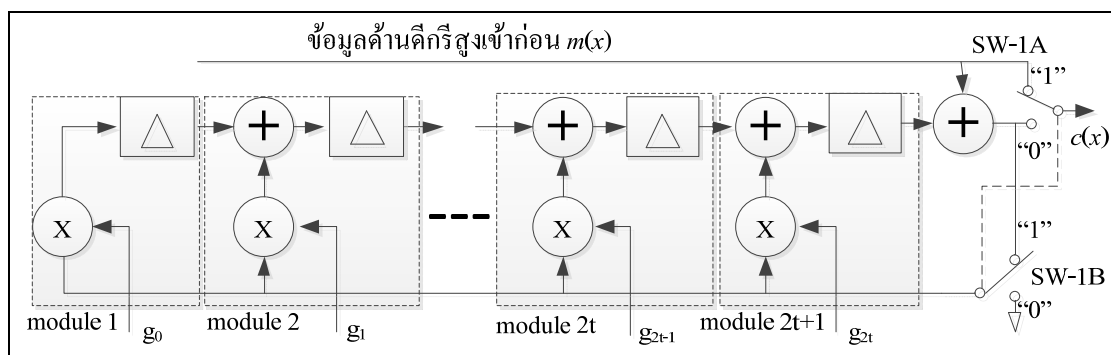
ดังนั้นเราจึงเขียนคำรหัสเชิงระบบได้ดังสมการที่ (2.6)

$$c(x) = p(x) + x^{2t}m(x) \quad (2.6)$$

- การเข้ารหัสโดยรีจิสเตอร์

รีจิสเตอร์ป้อนกลับเลื่อนเชิงเส้น (Linear-Feedback Shift Register : LFSR) ซึ่งใช้คำนวณการหารเศษเหลือ หรือมอดูโล สามารถนำมาใช้ในการเข้ารหัสได้เป็นอย่างดีข้อมูลซึ่งดีกรีสูงเข้ามาก่อน จะถูกส่งออกไปพร้อม ๆ กับการไหลคเข้าสู่วงจรหารเหลือเศษที่เป็น LFSR เมื่อครบจำนวน  $k$  ข้อมูล (หรือ  $k$  สัญลักษณ์) แล้วสวิทช์ SW-1 จะสวิทช์ไปทางตรงกันข้ามเพื่อให้ผลเศษหารเลื่อนออกไป (ช่วงนี้จะไม่มีการป้อนกลับใด ๆ)





รูปที่ 2.4 รูปวงจรสำหรับการเข้ารหัสรีดโซโลมอนเชิงระบบ

ตามที่ได้มีการกำหนดค่าไว้ในมาตรฐานระบบไวแมกซ์นั้น การเข้ารหัสรีดโซโลมอนจะต้องถูกจัดให้อยู่ในรูปของ RS (255,239,8) ที่มีการใช้ฟิลด์กาลัว (Galois Field : GF) คือ  $GF(2^8)$  ซึ่ง พหุนามพื้นฐาน (Primitive Polynomial) และ พหุนามกำเนิดที่ใช้ในระบบการเข้ารหัสนั้น ได้แสดงไว้ในสมการที่ (2.7) และ (2.8) ตามลำดับ

$$p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1 \quad (2.7)$$

$$g(x) = (x + \lambda^0)(x + \lambda^1)(x + \lambda^2) \dots (x + \lambda^{2^t-1}) \quad (2.8)$$

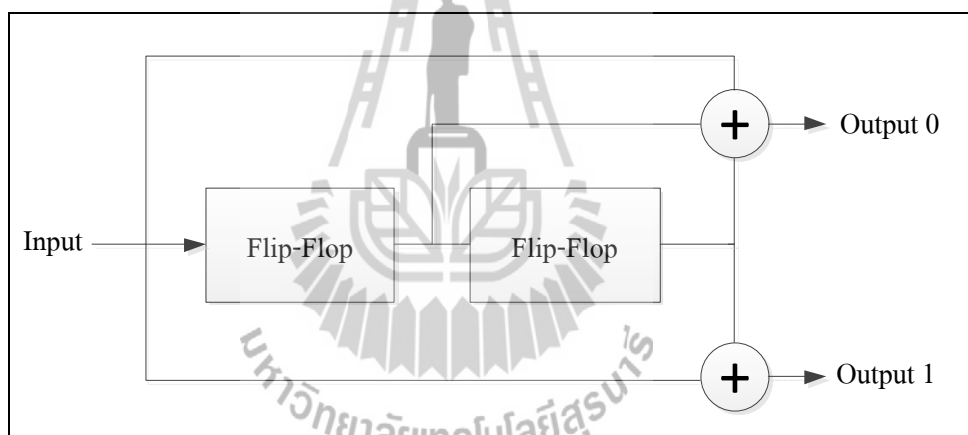
## 2) การเข้ารหัสคอนโวลูชัน

หลังจากที่เข้ารหัสรีดโซโลมอนแล้ว ข้อมูลบิตที่ได้จากการเข้ารหัสรีดโซโลมอนก็จะถูกเข้ารหัสคอนโวลูชันอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งการเข้ารหัสคอนโวลูชันเป็นความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลอินพุตเรียงลำดับอย่างต่อเนื่อง โดยข้อมูลที่เข้ามาจะผ่านตัว shift register (Flip-Flop) และ Modulo-2 adder (Exclusive or) การหาเอาต์พุตของภาคเข้ารหัสจะทำโดยนำข้อมูลที่อยู่ใน shift register บวกแบบ Modulo-2 adder ซึ่งจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.5 ซึ่งจากวงจรการเข้ารหัสจะมี อัตราการเข้ารหัส (Rate) เท่ากับ 1/2 และค่า Constraint Length (K) เท่ากับ 3 โดยจะใช้พหุนามกำเนิดเพื่อแสดงตำแหน่งของข้อมูลใน shift register ที่จะนำมาหาค่าเอาต์พุตโดยการบวกแบบ Modulo-2 คือ  $g_0$  เท่ากับ 58 และ  $g_1$  เท่ากับ 78 โดยในการทำงานนั้น จะดึงข้อมูลที่จะเข้ารหัสมาครั้งละ 1 บิต ( $k = 1$ ) เข้ามาภายในวงจร ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่อยู่ในตำแหน่งต่าง ๆ ใน shift register ถูกเลื่อนเข้ามาอยู่ในตำแหน่งถัดไป ต่อจากนั้นจะมีการนำข้อมูลทั้งหมดที่เก็บไว้ใน shift register

มาทำการหาเอาที่พู่ทจำนวน 2 บิต ( $n = 2$ ) ซึ่งอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ  $1/2$  ( $\text{Rate} = k/n = 1/2$ ) ที่เป็นผลลัพธ์ส่งออกไปจากภาคเข้ารหัส

### การวิเคราะห์การทำงานของวงจรการเข้ารหัสคอนโวลูชัน

จากวงจรการเข้ารหัสคอนโวลูชัน ที่มีการรับข้อมูลที่จะทำการเข้ารหัสเข้ามาภายในวงจรครั้งละ 1 บิต จากนั้นจึงทำการคำนวณหาค่าของค้ำรหัสที่จะถูกส่งออกไปเป็นผลลัพธ์ของภาคเข้ารหัสจำนวน 2 บิต โดยการคำนวณหาค่าค้ำรหัสในแต่ละครั้งนั้น จะมีการนำข้อมูลที่อยู่ใน shift register จำนวน 3 บิต ( $K$ ) มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรเข้ารหัสนั้น จะมีการแทนการทำงานต่าง ๆ ของวงจร ด้วยตัวแปรที่เรียกว่าพหุนามกำเนิดซึ่งจะเป็นตัวแปรที่ใช้แสดงถึงลักษณะของการคำนวณหาค่าผลลัพธ์ในการเข้ารหัสของ O/P แต่ละตัวโดยในกรณีของวงจรเข้ารหัสตัวอย่างในรูปที่ 2.5 นั้น จะสามารถแสดงการทำงานต่าง ๆ ของวงจรได้ด้วยพหุนามกำเนิดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.5 แสดงการเข้ารหัสคอนโวลูชันแบบ  $K = 3$

$$g_1 = [1 \ 1 \ 1] \quad (2.9)$$

$$g_2 = [1 \ 0 \ 1] \quad (2.10)$$

ซึ่งในการคำนวณหาค่าของข้อมูลที่ได้หลังจากการเข้ารหัสนั้น จะสามารถนำข้อมูลที่ได้จากค่าของพหุนามกำเนิดมาทำการคำนวณหาค่าของผลลัพธ์ที่ได้จากการเข้ารหัส โดยการนำข้อมูลที่จะทำการเข้ารหัสมาทำการคอนโวลูชันกับค่าของพหุนามกำเนิดดังสมการ

$$O/P = [\text{input}] * g_i \quad (2.11)$$

$$O/P1 = [1\ 0\ 0\ 1] * [1\ 0\ 1] = 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0 \quad (2.12)$$

$$O/P2 = [1\ 0\ 0\ 1] * [1\ 1\ 1] = 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1 \quad (2.13)$$

ดังนั้น ค่าของคำรหัสที่ได้จากการเข้ารหัสข้อมูลนั้น จะเกิดจากข้อมูลที่คำนวณได้จาก O/P1 และตามด้วย O/P2 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ 11 01 01 11 01 01 ซึ่งจากการคำนวณต่าง ๆ ในการหาผลลัพธ์ของวงจรเข้ารหัสนั้น สามารถที่จะคำนวณได้จากการหาค่าของการทำคอนโวลูชัน ดังนั้น จึงมีการเรียกรูปแบบในการเข้ารหัสข้อมูลในลักษณะนี้ว่าเป็นการเข้ารหัสคอนโวลูชัน และเมื่อนำมาเขียนรวมกันจะได้เป็นพหุนามกำเนิดของวงจรเข้ารหัสจะมีลักษณะดังสมการที่ (2.4)

$$G = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.14)$$

โดยในบางกรณีนั้น จะมีการแทนค่าของพหุนามกำเนิดด้วยเลขฐาน 8 เพื่อแสดงถึงข้อมูลที่อยู่ในพหุนามกำเนิด โดยในกรณีของวงจรตัวอย่างนั้นจะมีการแทนค่าของพหุนามกำเนิดด้วยเลข 58 และ 78 และสำหรับข้อมูลในการเข้ารหัสนั้น จะมีการแบ่งข้อมูลที่จะทำการเข้ารหัสออกเป็น  $n$  ชุด โดยที่แต่ละชุดนั้นมีขนาดเท่ากับ  $k_0$  บิต ซึ่งในการทำงานนั้นจะมีการดึงข้อมูลเข้ามาภายในวงจรในแต่ละครั้งนั้น จะมีการนำข้อมูลจำนวน  $k_0$  บิต มาทำการประมวลผลเพื่อหาค่าคำรหัสจำนวน  $n_0$  บิตเพื่อส่งออกไปจากวงจร โดยที่จะมีการทำงานในลักษณะนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งข้อมูลทุกบิตถูกนำมาเข้ารหัสทั้งหมด และผลลัพธ์ที่ออกจากวงจรเข้ารหัสจะกลับเข้าสู่ภาวะข้อมูลทั้งหมดเป็น 0 ทั้งหมด จึงถือว่าเป็นการสิ้นสุดของการเข้ารหัสข้อมูล ดังนั้น สำหรับการเข้ารหัสคอนโวลูชัน นั้นจะมีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ

$$R = \frac{nk_0}{(n + L - 1)n_p} \quad (2.15)$$

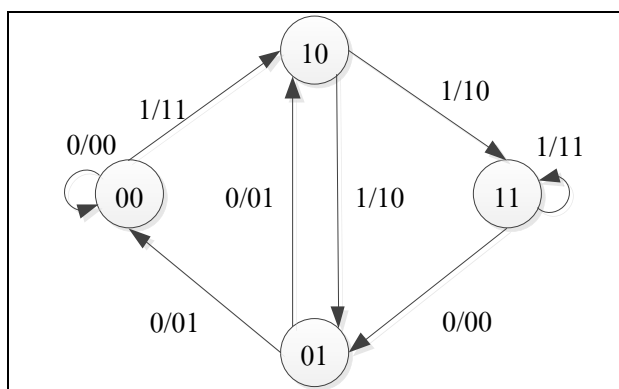
และในกรณีที่ค่า  $n$  มีค่ามากกว่าค่า  $L$  มาก ๆ จะได้ค่าอัตราการใช้รหัสมีค่าเท่ากับ

$$R = \frac{k_0}{n_0} \quad (2.16)$$

ในการวิเคราะห์การทำงานต่าง ๆ ของวงจรการเข้ารหัสคอนโวลูชันนั้น นอกจากจะมีการใช้สมการของพหุนามกำเนิดแล้ว จะมีการแสดงการทำงานต่าง ๆ ของวงจรเข้ารหัส โดยการใช้รูปภาพในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ในวงจรเข้ารหัสที่ถูกป้อนเข้ามา ณ เวลานั้น และค่าของคำรหัสที่จะถูกส่งออกไป เมื่อมีข้อมูลในกรณีต่าง ๆ ป้อนเข้ามา ซึ่งรูปแบบแผนภาพที่ใช้ในการแสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัสข้อมูลนั้น จะมีอยู่ทั้งหมด 3 รูปแบบ คือ State diagram Tree diagram และ Trellis diagram ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- **ไดอะแกรมสถานะ (State diagram)**

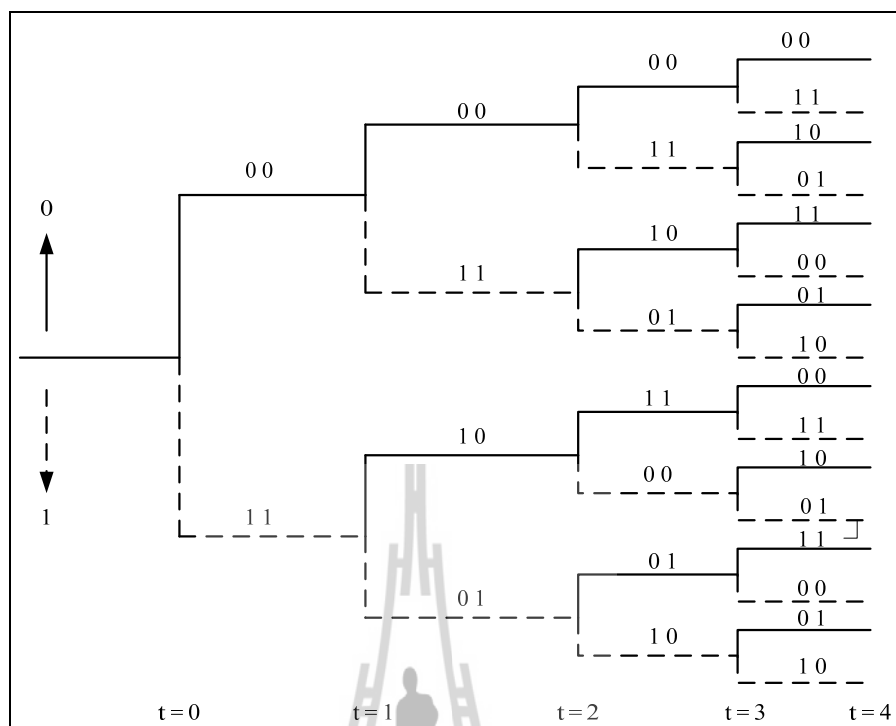
ไดอะแกรมสถานะจะแสดงค่าของข้อมูลใน shift register และเอาที่พุดของตัวเข้ารหัส ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.6 ตัวเลขที่อยู่ในวงกลมแต่ละวงนั้น จะหมายถึงสถานะที่เกิดขึ้น ของข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ใน shift register ซึ่งในกรณีของวงจรเข้ารหัสที่ใช้เป็นตัวอย่างนั้น จำนวนสถานะ (State) ทั้งหมดเท่ากับ 4 และสำหรับลูกศรที่แสดงไว้ในรูปนั้นจะแสดงถึงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงการทำงานจากสถานะหนึ่ง ไปอีกสถานะหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ป้อนเข้ามา ณ เวลานั้น ๆ เช่น กรณีข้อมูลที่เก็บไว้มีค่าเป็น 00 เมื่อมีข้อมูล 1 เข้ามาจะมีผลทำให้ข้อมูลที่เก็บไว้ถูกเปลี่ยนเป็น 10 และจะมีการส่งค่า 11 ออกไปจากวงจร (แทนด้วยสัญลักษณ์ 1/11 ดังรูป) แต่ถ้าหากว่ามีการป้อนข้อมูล 0 เข้ามา วงจรก็จะมีสถานะเป็น 00 เหมือนเดิมและจะมีการส่งค่า 00 ออกไปจากวงจร (แทนด้วยสัญลักษณ์ 0/00 ดังรูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 ไคอะแกรมสถานะของการเข้ารหัส

- ไคอะแกรมต้นไม้ (Tree diagram)

สำหรับไคอะแกรมต้นไม้ นั้น เป็นการพิจารณาถึงลักษณะของการทำงานของวงจรเข้ารหัสข้อมูล โดยที่จะมีการพิจารณาถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการป้อนข้อมูลต่าง ๆ เข้าไปในวงจรการเข้ารหัสเป็นหลัก ซึ่งลักษณะของไคอะแกรมต้นไม้ มีลักษณะดังรูปที่ 2.7 ในการแสดงการทำงานของวงจรการเข้ารหัสคอนโวลูชัน โดยใช้ไคอะแกรมต้นไม้ นั้นจะเป็นการพิจารณาการทำงานโดยการคำนึงถึงข้อมูลที่ป้อนเข้ามาและถูกส่งออกไปจากภาคเข้ารหัสเป็นหลัก ซึ่งในการพิจารณานั้น จะเริ่มต้นจากตำแหน่งรากของไคอะแกรมต้นไม้ ในกรณีของรูปที่ 2.7 นั้นจะอยู่ในตำแหน่งซ้ายมือสุดของรูป ซึ่งจะมีการนำข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามาภายในวงจรเข้ารหัส เป็นตัวกำหนดทิศทาง การเดินของข้อมูลในไคอะแกรมต้นไม้ โดยในกรณีของไคอะแกรมต้นไม้ ตัวอย่างนั้นจะกำหนดให้มีการเลื่อนตำแหน่งไปข้างบน เมื่อมีการรับข้อมูล 0 เข้ามา และจะเลื่อนตำแหน่ง ลงล่าง เมื่อมีการรับข้อมูล 1 เข้ามา ซึ่งหลังจากที่มีการเลื่อนตำแหน่งที่ใช้พิจารณาแล้ว จะมีการพิจารณาถึงข้อมูลที่ถูกระงับออกไปจากทางภาคเข้ารหัส ณ เวลานั้น ๆ จากข้อมูลที่อยู่เหนือเส้นทาง ในตำแหน่งที่มีการพิจารณา

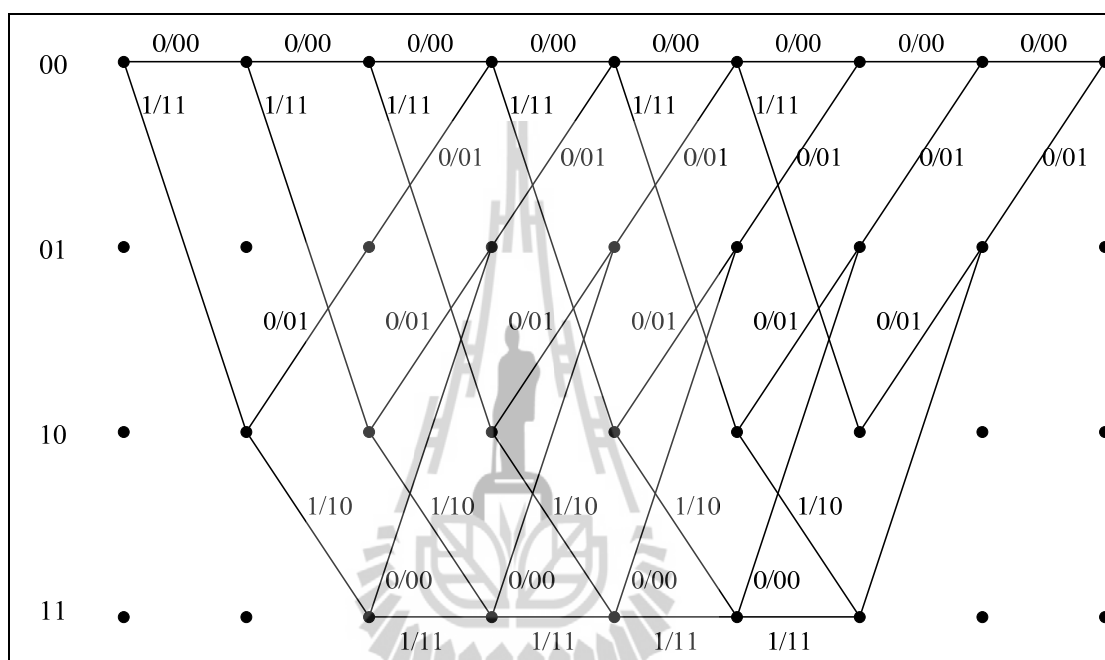


รูปที่ 2.7 ไคอะแกรมต้นไม้ของการเข้ารหัส

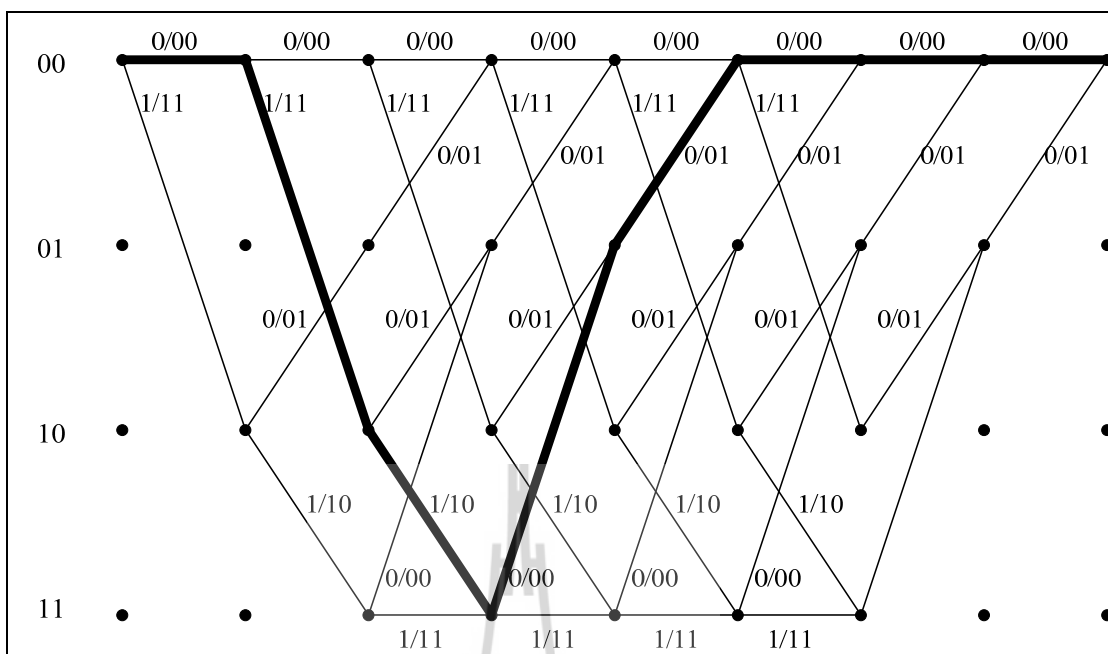
- ไคอะแกรมเทรลลิส (Trellis diagram)

การแสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัสโดยใช้ไคอะแกรมเทรลลิสนั้น จะเป็นการแสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัสโดยใช้ไคอะแกรมสถานะ มาเปลี่ยนแปลงลักษณะให้อยู่ในอีกลักษณะหนึ่งที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงข้อมูลต่าง ๆ ภายในวงจรเข้ารหัสข้อมูลที่ป้อนเข้ามา และคำสั่งที่จะถูกส่งออกไป ณ เวลาต่าง ๆ โดยลักษณะของไคอะแกรมเทรลลิส จะมีลักษณะดังรูปที่ 2.8 ซึ่งเป็นการนำข้อมูลในอดีตมาทำการประมวลผลร่วมกับข้อมูลในเวลานั้น และจะมีการป้อนข้อมูลเข้ามาภายในวงจรครั้งละ 1 บิต ( $k_0 = 1$ ) ซึ่งในกรณีนี้จะมีข้อมูล ที่จะเข้ารหัสทั้งหมด 6 บิต ซึ่งเส้นทางต่าง ๆ ที่อยู่ในไคอะแกรมเทรลลิสนั้น จะแสดงถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงภาวะของวงจร และตัวเลข  $x/y$  ที่อยู่เหนือทางเดินในแต่ละเส้นทางนั้น จะแสดงถึงข้อมูลที่ป้อนเข้ามา และคำสั่งที่จะถูกส่งออกไปเมื่อมีการป้อนข้อมูลนั้นเข้ามา ซึ่งเมื่อพิจารณา ลักษณะของไคอะแกรมเทรลลิสแล้ว จะพบว่ารูปแบบของไคอะแกรมเทรลลิสในแต่ละสถานะการทำงานนั้น จะมีลักษณะที่คล้ายกัน แต่จะมีความแตกต่างกันเฉพาะส่วนหัวและส่วนท้ายซึ่งเป็นผลมาจากข้อมูลที่เก็บอยู่ในวงจรนั้นจะมีค่าเริ่มต้นจากภาวะที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด และจะจบลงที่ภาวะข้อมูลเป็น 0 เช่นกัน ดังนั้นเส้นทางอื่น ๆ ที่ไม่ผ่านจุดที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด ณ จุดเริ่มต้น

และจุดสุดท้ายนั้นจะไม่ถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นขนาดของความยาวในไดอะแกรมเทอร์ลิสจึงขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ถูกลำนำเข้ารหัส ตัวอย่างในการใช้งานไดอะแกรมเทอร์ลิส เช่น กรณีที่มีการป้อนข้อมูลที่มีค่าเท่ากับ 0 1 1 0 0 0 0 0 เข้ามาภายในวงจรจะสามารถใช้ไดอะแกรมเทอร์ลิสในการหาลักษณะของคำรหัสที่เกิดขึ้นได้ดังรูปที่ 2.9 ดังนั้น ข้อมูลที่ได้หลังจากการเข้ารหัสคอนโวลูชันแล้วจะมีค่าเท่ากับ 00 11 10 00 01 00 00 00



รูปที่ 2.8 ไดอะแกรมเทอร์ลิสของการเข้ารหัส



รูปที่ 2.9 การใช้งานโคเดแกรมเทอร์ลิส

### 3) การทำพังเจอร์ (Puncture)

กระบวนการในการทำพังเจอร์นี้ มีหน้าที่ในการสร้างอัตราเร็วการเข้ารหัสที่หลากหลายตามต้องการ โดยการลบบิตออกอย่างเป็นรูปแบบ เพื่อให้ระบบมีความหลากหลายในการแก้ไขความผิดพลาดหลายระดับ โดยอัตราเร็วที่แตกต่างกันที่ใช้คือ  $1/2$   $2/3$   $3/4$  และ  $5/6$  โดยเวกเตอร์พังเจอร์นั้นได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 ซึ่งบิต “0” หมายถึงบิตที่ตัดทิ้ง

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าของเวกเตอร์พังเจอร์สำหรับอัตราเร็วต่าง ๆ ของการเข้ารหัสคอนโวลูชัน

อัตราเร็ว	Puncture Vector
$1/2$	[1]
$2/3$	[1 1 1 0]
$3/4$	[1 1 0 1 1 0]
$5/6$	[1 1 0 1 1 0 0 1 1 0]



#### 4) การวางสลับ (Interleave)

โดยทั่วไปแล้ว กระบวนการวางสลับนี้ ถูกใช้เพื่อกระจายความผิดพลาดของข้อมูล และลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่เกิดจากการแก้ไขได้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการทำ FEC ในการป้องกันการเกิด Frequency Selective Fading และ Burst Error แบบไม่เสียแบนด์วิดท์ หรือขีดความสามารถในการรับส่งข้อมูลแต่อย่างใด โดยการแพร่กระจายข้อมูลที่ผิดพลาดที่เกิดจากการรับส่งข้อมูลที่ผ่านช่องสัญญาณมาเป็นเวลานาน โดยกระบวนการวางสลับทำงานโดยการใส่บัพเฟอร์อาร์เรย์สองมิติ เหมือนกับการที่ข้อมูลที่เข้าสู่บัพเฟอร์เป็นแถว ซึ่งถูกระบุจำนวนของระดับการวางสลับไว้อย่างแน่นอน และจากนั้น ก็จะทำการอ่านเป็นคอลัมน์ โดยผลที่ได้ก็คือ จะเกิดการกระจายตัวของข้อมูลที่ผิดพลาดจากช่องสัญญาณหลังจากทำการวางสลับนี้แล้ว ซึ่งจะช่วยให้สัญลักษณ์ที่ผิดพลาดติดกันน้อยลง ซึ่งจะช่วยให้ง่ายขึ้นในการแก้ไข

ในระบบไวแมกซ์ได้มีการกำหนดมาตรฐานกระบวนการวางสลับไว้ที่ 12 โดยผลกระทบของกระบวนการนี้สามารถเข้าใจได้เหมือนกับการกระจายบิตไปยังสัญลักษณ์ที่แตกต่างกัน แล้วนำรวมกันเพื่อให้ได้สัญลักษณ์แบบใหม่ แต่มีขนาดเท่าเดิมแต่จัดเรียงบิตใหม่เท่านั้น

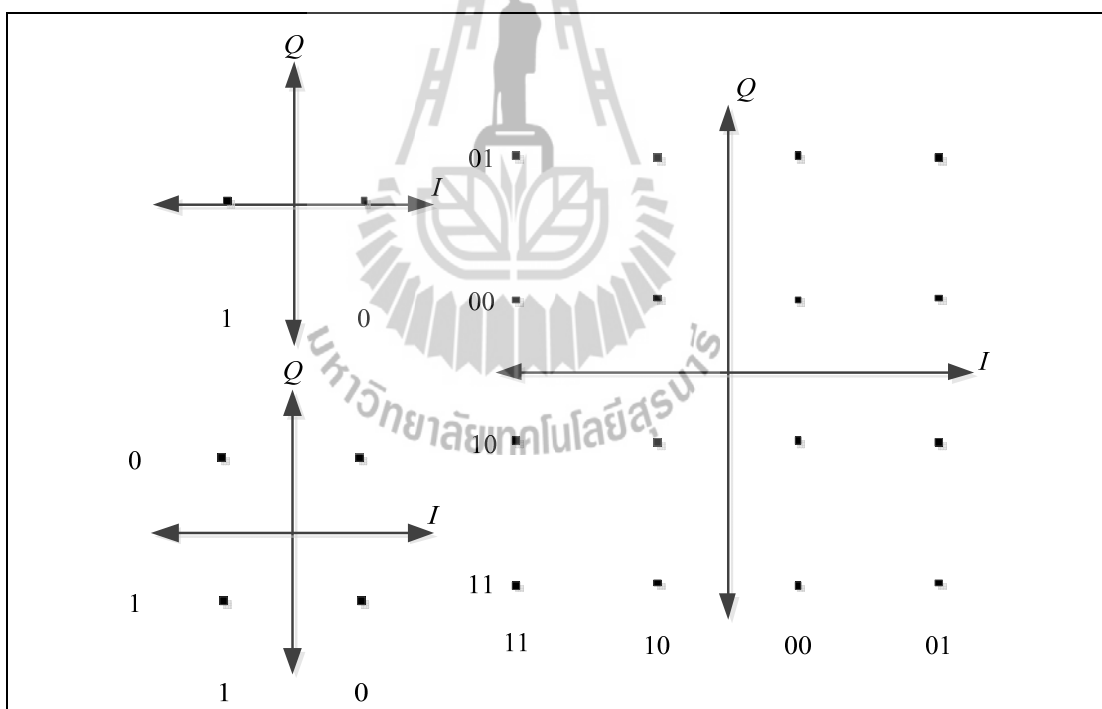
กระบวนการวางสลับในแบบจำลองนั้น มีอยู่ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่หนึ่ง ทำการวางสลับที่มีการป้อนแบบแถวต่อแถว และทำการส่งเมตริกซ์ไปบรรจุเป็นแบบคอลัมน์ต่อคอลัมน์ โดยตัวแปรที่ใช้สำหรับกระบวนการนี้คือจำนวนของแถวและคอลัมน์ที่ประกอบเป็นเมตริกซ์ ขั้นตอนที่สอง ทำการจัดเรียงองค์ประกอบใหม่โดยทำการใส่เข้าไปเป็นเวกเตอร์

A1	A2	A3	A4	A5	A1	B1	C1	D1	E1
B1	B2	B3	B4	B5	A2	B2	C2	D2	E2
C1	C2	C3	C4	C5	A3	B3	C3	D3	E3
D1	D2	D3	D4	D5	A4	B4	C4	D4	E4
E1	E2	E3	E4	E5	A5	B5	C5	D5	E5

รูปที่ 2.10 แสดงตัวอย่างการวางสลับ

### 2.4.3 การมอดูเลชัน (Modulation)

เมื่อสัญญาณผ่านการเข้ารหัส ต่อไปคือขั้นตอนของการมอดูเลชัน โดยการติดต่อกับสื่อสารแบบไร้สายทุกรูปแบบนั้น ใช้รูปเทคนิคการมอดูเลชันในการแมพบิตที่ถูกเข้ารหัสมาแล้วอย่างเป็นรูปแบบ ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณในการติดต่อกับสื่อสารให้ดีขึ้นได้ ดังนั้นบิตที่ถูกทำการแมพไปยังพหุคูณทั้งเฟสและแอมพลิจูด ซึ่งถูกอยู่ในรูปของเวกเตอร์เชิงซ้อน In-Phase และ Quadrature-phase (IQ) โดยการวาด IQ สำหรับรูปแบบการมอดูเลชันนั้น แสดงให้เห็นถึงเวกเตอร์ที่ได้ทำการส่งออกไปสำหรับข้อมูลทั้งหมดที่รวมกัน ซึ่งการเข้ารหัสแบบเกรย์นั้นเป็นวิธีการสำหรับการจัดวางของจุดที่อยู่ติดกันในกลุ่มวางบนแผนภาพแต่ต่างกันเพียงบิตเดียว การเข้ารหัสนี้จะช่วยให้ BER ทั้งหมดลดน้อยลง โดยทำการลดความผิดพลาดบิตหลาย ๆ บิตที่เกิดจากความผิดพลาดของหนึ่งสัญลักษณ์ โดยการมอดูเลชันที่รองรับในระบบไวแมกซ์คือ BPSK 4-QAM และ 16-QAM ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดง Constellation Maps ของ BPSK 4-QAM และ 16-QAM

นอกจากกลไกการปรับการมอดูเลชันและการเข้ารหัสที่ใช้ในการรับส่งข้อมูลข้างด้วยจุดประสงค์เพื่อช่วยให้การส่งสัญลักษณ์ต่อบิตที่ส่งออกไปมีความหลากหลายที่ขึ้นอยู่กับเงื่อนไขของช่องสัญญาณ

#### 2.4.4 Pilot Symbols

สัญลักษณ์ไพลอตถูกใช้ในกระบวนการชดเชยความถี่ที่เครื่องรับสัญญาณ ซึ่งถูกใช้สำหรับการประมาณการช่องสัญญาณ ในการวางตำแหน่งของสัญลักษณ์ไพลอตที่เป็นพาทีย่อยในสัญลักษณ์ข้อมูล OFDM นั้น โดยไพลอตเหล่านี้ได้จากตัวกำเนิด Pseudo-Random Binary Sequence (PRBS) ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของโพลีโนเมียล  $x^{11} + x^9 + 1$  โดยเทคนิคการแมพชนิดนี้นั้นจะให้ตัวดำเนินการ  $1-2w_k$  และ  $1-2\bar{w}_k$  ซึ่ง  $w_k$  คือ ลำดับที่ได้จากตัวกำเนิดของ PRBS และ  $\bar{w}_k$  หมายถึง ส่วนกลับของไบนารี โดยตำแหน่งต่าง ๆ ในพาทีย่อยแสดงให้เห็นถึงตำแหน่งที่จะทำการใส่ไพลอตเข้าไป

$$P_{-88} = P_{-38} = P_{63} = P_{88} = 1 - 2w_k \quad (2.17)$$

$$P_{-68} = P_{-18} = P_{13} = P_{38} = 1 - 2\bar{w}_k \quad (2.18)$$

ลำดับเริ่มต้นสำหรับตัวกำเนิด PRBS นั้น จะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับทิศทางในการรับส่งข้อมูล ตัวอย่างเช่น สัญญาณขาขึ้น หรือขาลง โดยลำดับทั้งหมดที่แสดงค่า “ones” ถูกใช้ในสัญญาณขาลง และจะทำการสลับค่าไประหว่าง “ones” และ “zeros” และถ้าบิตเริ่มต้นมีค่าเป็น “one” นั้นหมายถึงนี่เป็นสัญญาณขาขึ้น

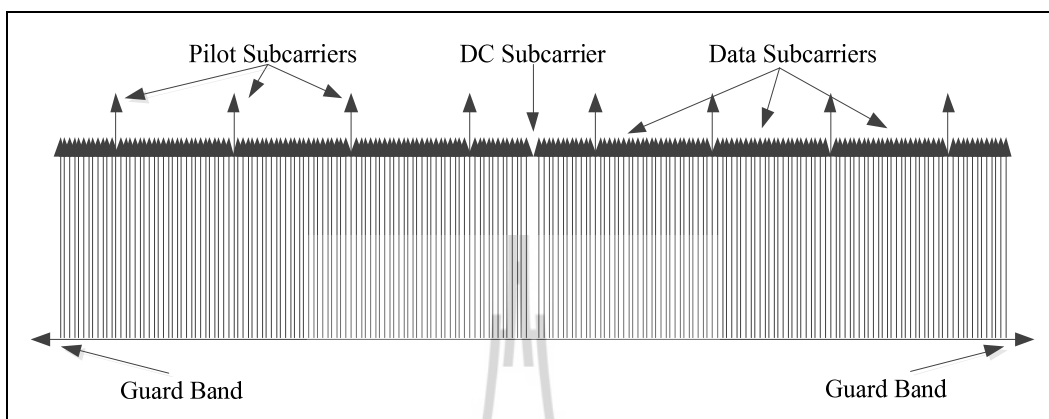
#### 2.4.5 Training Sequence

ในระบบไวแมกซ์นั้น ในส่วนที่เป็นพรีเอมเบิล (Preamble) ของข้อมูลขาขึ้นและขาลงจะประกอบด้วย Training Sequence ซึ่งสามารถแบ่ง Training Sequence ออกเป็น 3 ประเภท โดย Training Sequence นี้จะหาได้จากข้อมูลทางความถี่ซึ่งข้อมูลนี้มีจำนวน 201 subcarrier ( $P_{ALL}$ ) ในการส่งข้อมูลขาลง ใช้พรีเอมเบิลแบบสั้น ซึ่งเป็นการส่งข้อมูลจากสัญลักษณ์ OFDM สั้น ๆ ออกไปก่อน เพื่อใช้สำหรับการซิงโครไนซ์ (Synchronize) ข้อมูลระหว่างภาคส่งและภาครับ ส่วน Training Sequence แบบที่ 2 จะเป็น Training Sequence แบบยาวซึ่งใช้สำหรับการประมาณช่องสัญญาณที่ภาครับ และ Training Sequence แบบสุดท้ายจะใช้สำหรับการส่งข้อมูลแบบ Space Time Code (STC) ซึ่งการส่งข้อมูลแบบนี้ต้องใช้สายอากาศหลายต้น ดังนั้นจึงต้องส่งพรีเอมเบิลไปทุก ๆ สายอากาศพร้อม ๆ กัน

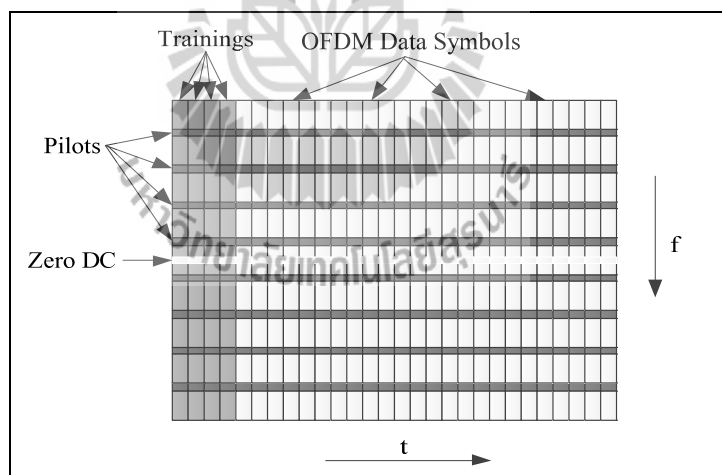
#### 2.4.6 Assembler

ไวแมกซ์มีข้อกำหนดให้ใช้ 256 FFT OFDM ในชั้นกายภาพ ซึ่งจะมีสัญญาณพาทีย่อยอยู่ 3 ส่วนใหญ่ ๆ คือ ส่วนของสัญญาณข้อมูล (Data) ส่วนของสัญญาณนำ (Pilot) และส่วนของ

สัญญาณศูนย์ (Null) จากทั้งหมดที่มีอยู่ 256 พาย์ย่อยนั้น จะใช้สำหรับสัญญาณข้อมูล 192 สัญญาณ พาย์ย่อย ส่วนสัญญาณนำใช้ 8 สัญญาณพาย์ย่อย ส่วนสัญญาณพาย์ย่อยที่เหลือจะเป็นสัญญาณศูนย์ ที่ถูกใส่ไปยังด้านข้างสำหรับป้องกันสัญญาณ และทำการใส่สัญญาณพาย์ย่อยศูนย์ตรงกลาง



รูปที่ 2.12 อธิบายถึงความถี่ OFDM



รูปที่ 2.13 โครงสร้างของข้อมูล OFDM ที่ผ่านการจัดเรียงแล้ว

ในการสร้างสัญลักษณ์ OFDM นั้น จะต้องมีการจัดรูปแบบสัญญาณพาย์ให้ได้ ตามที่ต้องการ โดยจะมีขั้นตอนในการทำอยู่สองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรก จะทำการใส่พาย์ย่อยของ สัญญาณนำและ Zero DC ระหว่างข้อมูลด้วยกระบวนการของการเรียงต่อกันในแนวตั้ง และ ต่อจากนั้นจะทำการผนวกเข้าด้วยสัญลักษณ์ที่อยู่ส่วนหน้าของแต่ละชุดข้อมูลในทางแนวนอน

สัญญาณนำพห่วยจะถูกใส่เข้าไปอยู่ตำแหน่งตามที่ได้กำหนดไว้ คือ ตำแหน่งที่ 13 38 63 88 114 139 164 และ 189 ในส่วนของ Zero DC นั้น จะถูกใส่เข้าไปที่ตำแหน่งตรงกลาง ซึ่งก็คือ 101 โดยหลังจากการเรียงลำดับเช่นนี้แล้วจึงจะทำการนำ Training Symbols วางไว้ที่ตำแหน่งเริ่มต้นของแต่ละชุดข้อมูล

#### 2.4.7 Guard Band

ตามมาตรฐานของระบบไวแมกซ์ เทคนิค OFDM ในชั้นกายภาพนั้น ใช้ความถี่พห่วย 256 ในการส่งรับส่งข้อมูล โดยพห่วยทั้งหมดที่ใช้นั้นจะต้องผ่านกระบวนการทำ IFFT ก่อน

หลังจากกระบวนการเรียงลำดับข้อมูล ที่ได้ทำการจัดเรียงลำดับของ 201 พห่วย จาก 256 พห่วยเท่านั้น ซึ่งอีก 55 พห่วยที่เหลือนั้นก็คือ Guard Band ซึ่งเป็นพห่วยศูนย์ที่วางไว้ที่ส่วนท้ายของโครงสร้าง โดยทำหน้าที่เหมือนแถบป้องกันเพื่อลดการกวนกันของความถี่ที่ติดกันในช่องสัญญาณ

#### 2.4.8 Inverse Fast Fourier Transform

กระบวนการทำ IFFT นี้ถูกใช้เพื่อทำการสร้างสัญญาณไปอยู่ในปริภูมิเวลา โดยสัญลักษณ์ที่ได้รับหลังจากการมอดูเลชันแล้วนั้นจะถูกมองอยู่ในรูปแอมพลิจูดของสัญญาณของจุดศูนย์กลางของไซนูซอยด์ หมายความว่าแต่ละตัวอย่างที่ไม่ต่อเนื่องก่อนการใช้อัลกอริทึม IFFT ที่สอดคล้องกับแต่ละพห่วย

การทำ IFFT เป็นวิธีการที่รวดเร็วในการมอดูเลชันแต่ละพห่วยแบบขนาน ซึ่งเหมือนกับการใช้ตัวมอดูเลตและตัวดีมอดูเลตหลายตัว ดังนั้นกระบวนการ IFFT จึงเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายและเวลาจำนวนมาก ซึ่งก่อนที่จะทำการจำลองแบบนั้นจะต้องมีการจัดเรียงพห่วยก่อน

ซึ่งสมการในการทำ IFFT สามารถเขียนได้ตามสมการที่ (2.19)

$$x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j2\pi ki/N}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.19)$$

#### 2.4.9 Cyclic Prefix

ความทนทานของการรับส่งข้อมูล OFDM นั้นสามารถป้องกันการประวิงเวลาของสัญญาณหลายวิธีได้โดยการใช้เพิ่มความยาวคาบของสัญลักษณ์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำการลดสัญญาณรบกวนระหว่างสัญลักษณ์ ซึ่งแต่ละสัญลักษณ์ OFDM นั้นได้ถูกขยายออกด้วยคาบของ

สัญญาณตัวมันเอง โดยระยะแถบป้องกัน ซึ่งเป็นการลอกแบบจากสัญลักษณ์ข้อมูลจากช่วงสุดท้าย ซึ่งเรียกว่า CP

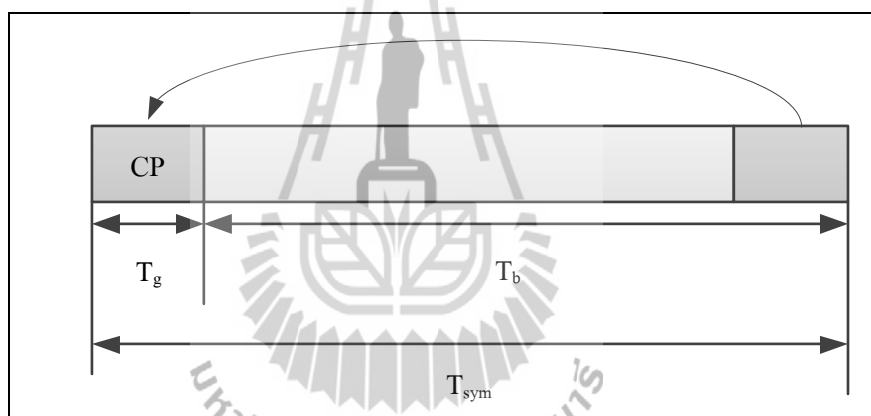
ในการคัดลอกสัญลักษณ์ที่อยู่ตอนท้ายและการผนวกกันเพื่อให้เวลาของสัญลักษณ์ยาวเพิ่มมากขึ้น ดังนั้น ทำให้สัญลักษณ์มีขนาดเป็น

$$T_{\text{sym}} = T_b + T_g \quad (2.20)$$

โดยที่  $T_{\text{sym}}$  คือ คาบของสัญลักษณ์ OFDM ทั้งหมด

$T_b$  คือ คาบของสัญลักษณ์ข้อมูลที่ใช้

$T_g$  คือ คาบของ CP



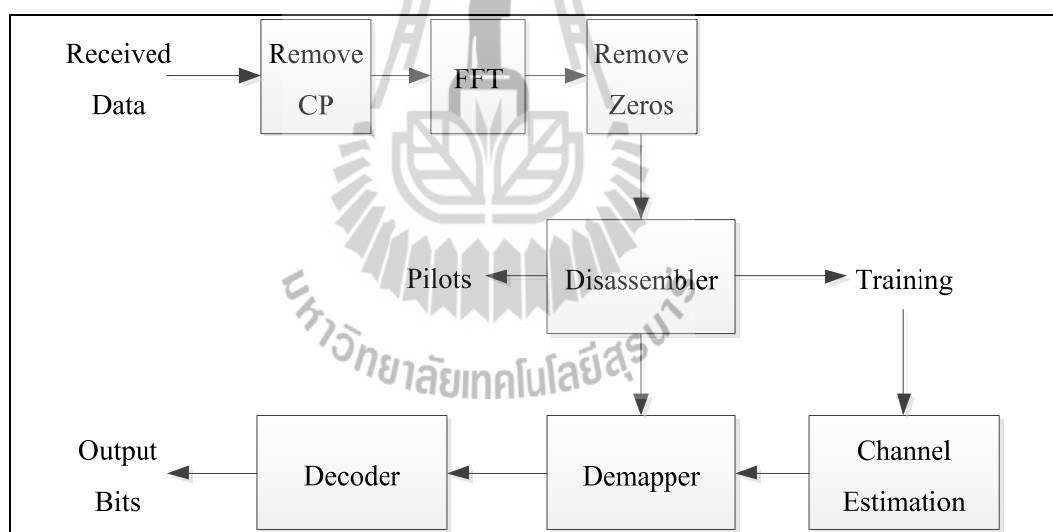
รูปที่ 2.14 โครงสร้างของสัญลักษณ์ OFDM กับ CP

ตัวแปร  $G$  คือตัวกำหนดอัตราส่วนความยาวของ CP ที่เพิ่มเข้าไปเพื่อทำการป้องกันการเกิด ISI โดย CP จะต้องมีความยาวที่มากกว่าการกระจายตัวของช่องสัญญาณ อย่างไรก็ตาม จะต้องทำให้มีขนาดเล็กที่สุด เนื่องจากการสิ้นเปลืองพลังงานของตัวส่งสัญญาณ

$$G = \frac{T_g}{T_b} \quad (2.21)$$

### ภาครับ

รูปที่ 2.15 แสดงแผนภาพของภาครับในระบบไวแมซ์ ซึ่งจะเป็นการเอาส่วนที่เป็น CP ออก จากนั้นก็ทำกระบวนการ FFT (Fast Fourier Transform) เพื่อเป็นการเปลี่ยนให้สัญญาณกลับมาอยู่ที่ปริภูมิความถี่ ซึ่งสัญลักษณ์ OFDM นั้นประกอบไปด้วย Data Subcarrier Pilots Subcarrier และ Zero DC Subcarrier และ Guard Bands บางส่วน ดังนั้น กระบวนการในการกระจายแต่ละ Subcarrier นี้ มีขั้นตอนแรกโดยการกำจัด Guard Band และทำการจัดเรียงข้อมูลใหม่เพื่อทำการดึงเอา Data Subcarriers Pilots Subcarrier และ Training Subcarriers ซึ่งสัญญาณ Trainings ที่ได้นั้น จะนำมาใช้เพื่อทำการประมาณช่องสัญญาณ (Channel Estimation) โดยการคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ในการประมาณช่องสัญญาณนี้ จะถูกใช้ในขั้นตอนการทำ Demapper เพื่อทำการปรับแก้ของข้อมูล และทำการชดเชยการจางหายแบบเลือกความถี่ของรูปแบบช่องสัญญาณที่แพร่กระจายแบบหลายวิถีทาง เมื่อข้อมูลที่ได้รับผ่านการ demapped แล้วก็จะเข้าสู่กระบวนการถอดรหัสสัญญาณต่อไป



รูปที่ 2.15 แสดงแผนภาพของภาครับระบบไวแมซ์

#### 2.4.10 การทำกระบวนการ FFT

จากที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 2.4.8 เกี่ยวกับอัลกอริธึมของ IFFT ว่าเป็นวิธีที่รวดเร็วในการมอดูเลชันกลุ่มของสัญญาณพาห่อย่อยแบบขนาน ซึ่งทั้ง FFT หรือ IFFT นั้นเป็นกระบวนการแบบ Linear Pair ดังนั้น FFT จึงเป็นกระบวนการที่จำเป็นในการเปลี่ยนสัญญาณ

กลับไปอยู่ในปริภูมิของความถี่อีกครั้งหนึ่ง โดยสมการที่นำมาใช้สามารถอธิบายได้ตามสมการที่ 2.22

$$X[k] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi ki/N}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2.22)$$

#### 2.4.11 การตัดส่วน Guard Band ออก

หลังจากทำกระบวนการ FFT แล้ว จากนั้นจะตัดส่วนที่เป็น Guard Band ออกเพื่อจะได้ข้อมูลออกมา

#### 2.4.12 การแยกข้อมูลออก (Disassembler)

กระบวนการแยกข้อมูลออกนี้ มีความหมายเหมือนกับการแยกสัญญาณออกจากกันทั้งในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ เพื่อให้ได้ Data Training และ Pilots โดยสัญลักษณ์ทั้งสามประเภทนี้ จะเป็นสิ่งที่ได้หลังจากที่ผ่านกระบวนการแยกข้อมูลออกนี้

#### 2.4.13 การประมาณช่องสัญญาณ

ในการส่งข้อมูลแบบ ไร้สาย ข้อมูลที่ถูกส่งจากภาคส่งย่อมมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากผ่านช่องสัญญาณ ซึ่งเกิดจากสัญญาณรบกวน ส่วนที่ภาครับยังได้รับผลกระทบจากสัญญาณหลายวิธีซึ่งมีสัญญาณมาถึงที่ภาครับหลาย ๆ สัญญาณพร้อม ๆ กัน ดังนั้นที่ภาครับจึงต้องมียุทธศาสตร์ในการหาสัญญาณที่ถูกต้อง ในการหาสัญญาณที่ถูกต้องนี้จำเป็นต้องรู้ Channel Impulse Response (CIR) ซึ่งใช้ในการประมาณช่องสัญญาณ โดยปกติการประมาณช่องสัญญาณจะสามารถรู้จากลำดับบิตที่ส่งมาจากภาคส่ง ซึ่งจะส่งมาเป็นระยะ ๆ โดยจะนำมาเปรียบเทียบกับ CIR

#### 2.4.14 การดีมอดูเลชัน

การดีมอดูเลชันเป็นการเปลี่ยนจากสัญญาณในลักษณะรูปคลื่น เป็นสัญญาณในลักษณะตัวเลขหรือชุดของตัวเลข ซึ่งจะนำมาประมาณเป็นข้อมูลไบนารีหรือสัญลักษณ์ M-ary ต่อไป

#### 2.4.15 การถอดรหัส

ในส่วนนี้เป็นส่วนสุดท้ายในกระบวนการทางภาครับ เป็นการถอดรหัสเพื่อจะได้ข้อมูลที่ส่งมาจากภาคส่ง ซึ่งจะถอดรหัส 3 รูปแบบคือ

##### 1. การ Deinterleaving

การ Deinterleaving เป็นการจัดเรียงบิตใหม่ให้ถูกต้องเหมือนเดิมซึ่งทำกลับกันจากกระบวนการวางสลับ



## 2. การถอดรหัสแบบ Viterbi

การถอดรหัสแบบ Viterbi เป็นที่นิยมในการใช้งานมากที่สุด ในการถอดรหัสคอนโวลูชัน ซึ่งการทำงานของ Viterbi จะเป็นแบบ Maximum Likelihood โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการถอดรหัสจะเป็นเส้นทางเพียงเส้นทางเดียวที่มีความน่าจะเป็นสูงสุดจากเส้นทางทั้งหมดในไดอะแกรมเทรลิสซึ่งมีลักษณะเหมือนกับข้อมูลที่ถูส่งมากที่สุด

รูปแบบการถอดรหัสแบบ Viterbi จะมีอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน ได้แก่ Hard-decision และ Soft-decision

ก) Hard decision สำหรับการดำเนินงานของวงจรถอดรหัสที่ใช้กระบวนการตัดสินใจแบบ Hard decision นั้น จะเป็นการพิจารณาข้อมูลที่รับเข้ามา โดยการพิจารณาว่าข้อมูลที่รับเข้ามาในแต่ละบิตนั้น มีค่าของข้อมูลเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น

ข) Soft decision การถอดรหัสที่มีการใช้กระบวนการตัดสินใจแบบ Soft decision จะเป็นการพิจารณาถึงข้อมูลที่รับเข้ามาได้โดยการทำการตัดสินใจระดับของข้อมูลที่รับเข้ามาได้ โดยการแบ่งระดับของสัญญาณที่ใช้ในการคำนวณหาค่าเมตริกที่มากกว่า 2 ระดับซึ่งผลลัพธ์ที่ได้ นั้น จะได้ข้อมูลและรายละเอียดของข้อมูลที่ส่งมาที่มากกว่ากรณีของ Hard decision ซึ่งข้อมูลที่ได้รับการตัดสินใจนั้น จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าเมตริก เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่รับเข้ามา ณ เวลานั้น ๆ กับข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางต่าง ๆ ณ เวลานั้น ซึ่งจะมีรูปแบบที่ใช้ในการคำนวณที่แตกต่างกันไป

ค) อัลกอริทึมแบบ Viterbi โดยในการทำงานต่าง ๆ นั้นจะต้องมีการคำนวณหาความแตกต่าง ระหว่างข้อมูลที่รับเข้ามา กับค่าที่อยู่ในเส้นทางต่าง ๆ เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการตัดสินใจ โดยกระบวนการที่ใช้ในการทำการค้นหาเส้นทางที่อยู่ในไดอะแกรมเทรลิสที่มีลักษณะใกล้เคียงกับข้อมูลที่รับ ได้มากที่สุด เพื่อจะได้ นำข้อมูลที่ได้จากเส้นทางนั้นมาคำนวณหาค่าของข้อมูลที่ถูส่งมา โดยในกระบวนการในการหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ อัลกอริทึมแบบ Viterbi นั้น จะมีขั้นตอนดังนี้

1) พิจารณาแบ่งข้อมูลที่รับเข้ามาออกเป็นข้อมูลย่อย ๆ จำนวน  $m$  ช่วง ซึ่งแต่ละช่วงนั้นมีขนาดของข้อมูลเท่ากับ  $n_0$  บิต

2) ทำการวาดไดอะแกรมเทรลิสที่มีจำนวนสถานะในการทำงานเท่ากับ  $m$  สถานะ โดยจะมีการพิจารณาเฉพาะเส้นทางที่มีความเป็นไปได้ว่าจะถูกส่งมาเท่านั้น โดยสำหรับที่สถานะของไดอะแกรมเทรลิสตั้งแต่  $L-1$  ขึ้น ไปนั้น ให้วาดเส้นทางที่พุ่งเข้าหาสถานะของวงจรที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด

3) กำหนดค่าตัวแปร  $l = 1$  และทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรเมตริกในสถานะเริ่มต้นที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด ให้มีค่าของเมตริกเท่ากับ 0

4) ทำการคำนวณหาค่าความแตกต่างของข้อมูล ระหว่างข้อมูลที่ได้รับได้ ชุดที่ 1 กับข้อมูลในเส้นทางในการเปลี่ยนแปลงสถานะในโคอะแกรมเทรลิสจากสถานะที่ 1 ไปเป็น  $1+1$

5) นำค่าที่คำนวณได้นั้นไปบวกกับค่าเมตริกสะสมของสถานะ 1 เพื่อหาค่าของเมตริกสะสมในสถานะที่  $1+1$  เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด ในการเปลี่ยนแปลงข้อมูลไปยังสถานะนั้น ๆ โดยในแต่ละสถานะนั้น จะมีจำนวนเส้นทางทั้งหมดจำนวน  $2k_0$  เส้นทางที่จะพุ่งเข้าสถานะเดียวกัน

6) พิจารณา ณ ตำแหน่งในสถานะที่  $1+1$  ในแต่ละสถานะนั้นทำการเลือกเส้นทางที่มีค่าเมตริกสะสมที่มีค่าน้อยที่สุดที่จะพุ่งเข้าหาในแต่ละสถานะ โดยเส้นทางที่ถูกเลือกนั้น จะถูกเรียกว่า Survivor ซึ่งจะเป็เส้นทางที่ถูกเก็บไว้ทำการคำนวณในแต่ละสถานะต่อไป และสำหรับเส้นทางอื่น ๆ ที่ไม่ได้ถูกเลือกนั้น จะถูกเรียกว่า Forgetting โดยจะถูกลบทิ้งออกไปจากระบบการตัดสินใจ

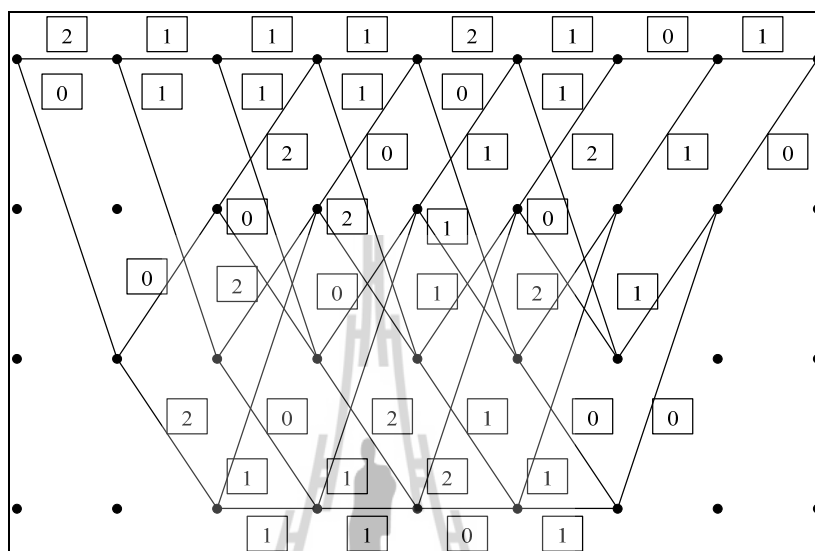
7) ถ้าหากว่า  $1$  นั้นมีค่าเท่ากับ  $m$  แล้วให้ทำงานในขั้นตอนต่อไปได้ แต่ถ้ายังมีค่าน้อยกว่า จะต้องมีการเพิ่มค่า  $1$  ขึ้นไปอีก  $1$  จากนั้นจึงกลับไปทำงานในขั้นตอนที่ 4 ใหม่

8) แต่ถ้ายังมีค่าน้อยกว่า จะต้องมีการเพิ่มค่า  $1$  ขึ้นไปอีก  $1$  จากนั้นจึงกลับไปทำงานในขั้นตอนที่ 4 ใหม่เริ่มต้นพิจารณา ณ สถานะที่  $m+1$  ที่มีสภาวะของข้อมูลสถานะเป็น 0 ทั้งหมด ทำการเลือกเส้นทางที่เป็น Survivor ซึ่งเป็นเส้นทางที่ถูกเลือกที่เหลืออยู่ย้อนกลับไปจนกระทั่งถึงสภาวะเริ่มต้น ของการทำงานที่มีสภาวะในการทำงานเป็น 0 ทั้งหมด ซึ่งเส้นทางที่ได้ นั้นจะเป็นเส้นทางที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้รับมามากที่สุด ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณ หาข้อมูลข่าวสารที่ถูกส่งมา โดยข้อมูลข่าวสารที่จะถูกส่งออกไปจากภาคถอดรหัสนั้นจะเป็นการส่งข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในเส้นทางส่งออกไป ยกเว้นข้อมูล 0 จำนวน  $k_0(L-1)$  บิต ที่อยู่ท้ายสุดนั้นจะถูกตัดทิ้งไป

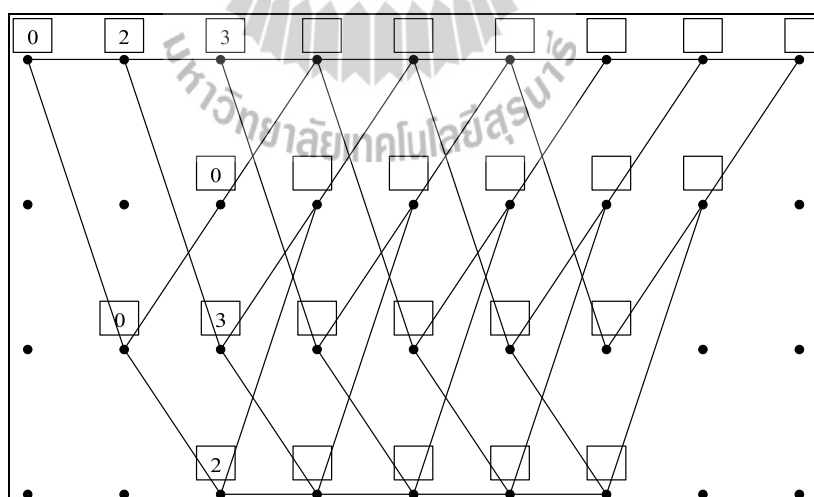
ตัวอย่างเช่นในกรณีวงจรถอดรหัสสำหรับข้อมูลที่ถูกเข้ารหัสด้วยวงจรในรูปที่ 2.5 ซึ่งมีการป้อนข้อมูลดิบจำนวน 6 บิต มีค่าเท่ากับ 1 0 1 0 1 1 ซึ่งเมื่อทำการเข้ารหัสแล้วจะได้คำรหัสที่มีค่าเท่ากับ 1 1 0 1 1 0 0 1 1 0 1 0 0 0 1 จากนั้นพิจารณาในกรณีที่ข้อมูลของคำรหัสที่ได้รับได้ที่ปลายทางนั้นเกิดความผิดพลาดในการตีความขึ้นจำนวน 1 บิต จึงทำให้ข้อมูลที่ได้รับได้มีค่าเป็น 1 1 0 1 1 0 0 1 1 1 1 0 0 0 1 ดังนั้นในการถอดรหัสโดยใช้วิธีการ Viterbi นั้นจะทำงานโดยเริ่มต้นจากการนำข้อมูลที่ได้มาทำการแบ่งข้อมูลออกชุด ๆ ซึ่งมีขนาดเท่ากับจำนวนของคำรหัสที่วงจรเข้ารหัสส่งออกมาในแต่ละช่วงเวลาซึ่งในกรณีนี้มีค่าเท่ากับ 2 ดังนั้นข้อมูลจะถูกแบ่งออกเป็นชุดได้ดังนี้ 11 01 10 01 11 10 00 01 ซึ่งในการทำงานนั้น จะมีการพิจารณาข้อมูลที่ละชุดเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางต่าง ๆ

ในไดอะแกรมเทอร์ลิสโดยการทำงานในช่วงแรกนั้นจะเป็นการหาความแตกต่างระหว่างข้อมูลที่ได้รับได้และข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางต่าง ๆ ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นการนำข้อมูลที่ได้รับได้ในแต่ละช่วงเวลามาทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางต่าง ๆ โดยในช่วงเวลาที่ 1 นั้น จะเป็นการนำข้อมูล 11 ที่รับได้มาทำการเปรียบเทียบเพื่อหาจำนวนบิตของข้อมูลที่มีความแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับเส้นทางที่ลากจากโหนดเริ่มต้นที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด มายังโหนดที่มีข้อมูลเป็น 00 ในช่วงเวลาถัดไปซึ่งมีข้อมูลในเส้นทางเป็น 0/00 ซึ่งจะพบว่ามีความต่างที่ต่างกันจำนวน 2 บิต และเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นทางที่ลากไปยังโหนดที่มีข้อมูลเป็น 10 จะพบว่ามีความแตกต่างเท่ากับ 0 บิต และในช่วงเวลาที่ 2 จะเป็นการนำข้อมูล 01 ที่รับได้ ณ เวลานั้นมาทำการเปรียบเทียบกับเส้นทางต่าง ๆ ทั้งหมด ณ เวลานั้น ๆ และจะมีการคำนวณเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนครบทุกเส้นทาง จากนั้นในการทำขั้นตอนต่อไปจะเป็นการคำนวณหาค่าเมตริกสะสมของเส้นทางโดยสำหรับ 2 ช่วงเวลาแรกนั้นจะมีการทำงานดังรูปที่ 2.17 โดยในการทำงานนั้นจะเริ่มต้นที่โหนด 00 ที่อยู่ซ้ายบนสุดของรูป ซึ่งกำหนดค่าเมตริกใหม่เป็น 0 จากนั้นจึงพิจารณาโหนดถัดไปที่เชื่อมต่อกับโหนด 00 ซึ่งมี 2 โหนดด้วยกัน โดยจะทำการนำเมตริกที่อยู่ในเส้นทางนั้นมาบวกกับเมตริกสะสมที่ถูกเก็บไว้ยังโหนดที่พิจารณา ซึ่ง ณ เวลานั้นคือ โหนด 00 ที่อยู่ซ้ายบนสุด และผลลัพธ์ที่ได้นั้นจะถูกเก็บไว้ในโหนดที่อยู่ปลายทางของเส้นทางนั้น ๆ ซึ่งจะทำงานเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีการพบว่า มีเส้นทางมากกว่า 1 เส้นทาง ที่พุ่งเข้าหาโหนดเดียวกัน ดังเช่นในช่วงเวลาที่ 3 จนถึงช่วงเวลาที่ 8 ซึ่งเมื่อมีเหตุการณ์นี้เกิดขึ้น จะต้องมีการตัดสินใจเพื่อเลือกเส้นทางที่ใช้ในการคำนวณเฉพาะเส้นทางที่มีค่าเมตริกสะสมน้อยที่สุดเท่านั้นมาพิจารณา โดยในช่วงเวลาที่ 3 นั้นจะมีการคำนวณดังรูปที่ 2.18 สำหรับการพิจารณาค่าเมตริกสะสมที่โหนด 00 ในช่วงเวลาที่ 3 นั้น จะเป็นการตัดสินใจเลือกเส้นทางระหว่างเส้นทางที่มาจากโหนด 00 และโหนด 01 ของช่วงเวลาที่ 2 ซึ่งจะทำการเลือกเส้นทางที่มีค่าเมตริกสะสมน้อยที่สุดเท่านั้น โดยสำหรับเส้นทางที่มาจากโหนด 00 จะมีค่าเมตริกสะสมเท่ากับ  $3+1$  เท่ากับ 4 และเส้นทางที่มาจากโหนด 01 มีค่าเท่ากับ  $0+2$  เท่ากับ 2 ดังนั้นจึงเลือกเส้นทางที่มาจากโหนด 01 มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งจะมีการทำงานในลักษณะนี้ ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งคำนวณเมตริกสะสมครบทุกช่วงเวลา จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการค้นหาเส้นทางโดยเริ่มต้นที่โหนด 00 ที่อยู่ขวาสุดของรูป จากนั้นจึงทำการมอย้อนกลับในโหนด ที่อยู่ซ้ายมือที่มีเส้นทางต่อกับโหนด 00 โดยจะทำการเลือกเส้นทางที่ต่อกับโหนดที่มีค่าเมตริกสะสมที่มีค่าน้อยที่สุดเพื่อเลือกเป็นเส้นทางที่ใช้งาน หลังจากนั้นจึงย้ายจุดที่พิจารณาไปยังโหนดถัดไปทางซ้ายมือ ที่อยู่ปลายทางของเส้นทางที่เลือกไว้ ซึ่งจะมีกระบวนการตัดสินใจเช่นเดิมซ้ำอีกครั้ง โดยจะมีการทำงานเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนมีการค้นหาเส้นทางครบทุกช่วงเวลา ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานจะมีลักษณะดังรูปที่ 2.19 หลังจากนั้น จะเป็นการนำข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางที่ถูกเลือกมาใช้ ในการหาข้อมูลคิบที่ส่งมา โดยการพิจารณาถึงข้อมูลที่อยู่ในเส้นทาง

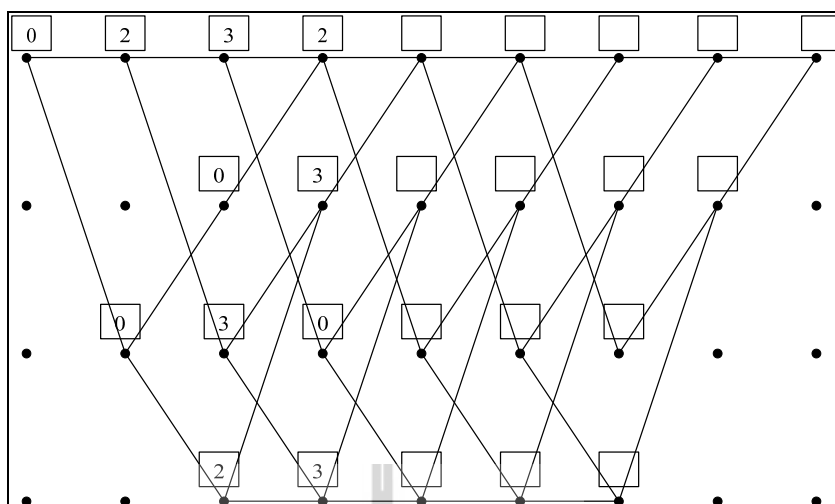
ส่วนต่าง ๆ ซึ่งจากรูปนั้น จะได้ว่า ข้อมูลดิบที่ถอดรหัสได้จะมีค่าเท่ากับ 1 0 1 0 1 1 0 0 โดยใน 2 บิตสุดท้ายจะไม่ถูกนำมาพิจารณาเนื่องจากเป็นข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามาเพื่อใช้ในการคำนวณ ดังนั้นข้อมูลดิบที่ได้จากการถอดรหัสจะมีค่าเท่ากับ 1 0 1 0 1 1



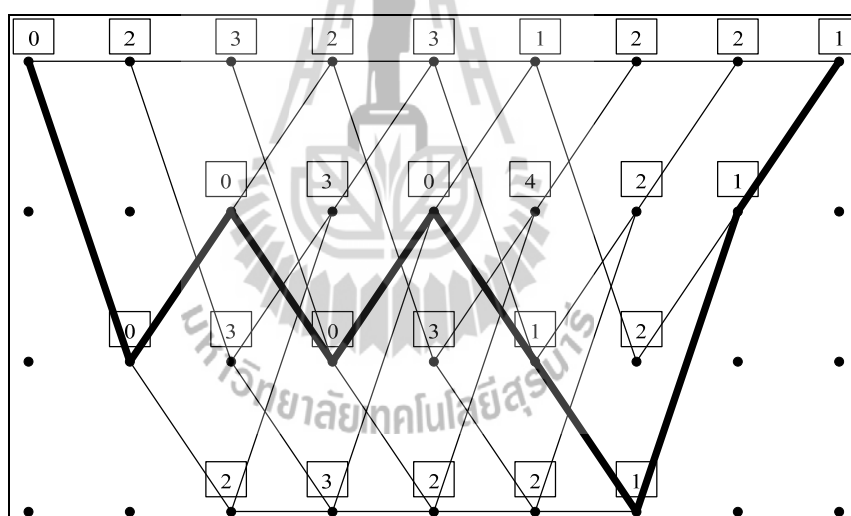
รูปที่ 2.16 การถอดรหัสแบบ Viterbi (1)



รูปที่ 2.17 การถอดรหัสแบบ Viterbi (2)



รูปที่ 2.18 การถอดรหัสแบบ Viterbi (3)



รูปที่ 2.19 การถอดรหัสแบบ Viterbi (4)

### 3. การถอดรหัสแบบรีดโซโลมอน

ในส่วนนี้เป็นการถอดรหัสส่วนสุดท้าย ซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการถอดรหัสเพื่อจะได้ข้อมูลที่มาจากภาคส่ง การถอดรหัสแบบรีดโซโลมอนก็จะถอดรหัสกลับจากการเข้ารหัสแบบรีดโซโลมอน ดังนั้นหลังจากการถอดรหัสที่มีคำรหัสเท่ากับ  $n$  เมื่อถอดรหัสแล้วข้อมูลจะมีขนาดเท่ากับ  $k$  เมื่อ  $n = 255$  และ  $k = 239$

## 2.5 แบบจำลองช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบไวแมกซ์

ในการสื่อสารแบบไร้สายจำเป็นต้องมีความแม่นยำในการอธิบายช่องสัญญาณแบบไร้สาย ซึ่งในแบบจำลองช่องสัญญาณนั้นขึ้นอยู่กับแต่ละสภาพแวดล้อม เช่น ในการสื่อสารยุคแรก จะมีสถาปัตยกรรมที่มีสถานีฐานและสถานีลูกข่ายสื่อสารกันแบบ LOS ซึ่งระบบมีเซลล์เดียว และไม่มี การคิด Co-Channel Interference ต่อมาในการสื่อสารยุคที่สอง ระบบมีรูปแบบสถาปัตยกรรมแบบหลายเซลล์ ที่มีการติดต่อสื่อสารแบบ NLOS ซึ่งในเนื้อหาส่วนนี้จะกำหนดแบบจำลองการแพร่กระจายคลื่นที่มีสถาปัตยกรรมแบบหลายเซลล์

### 2.5.1 แบบจำลอง Free Space Path Loss

แบบจำลอง Free Space Path Loss นี้เป็นแบบจำลองขั้นพื้นฐานที่ใช้ในการทำนาย และเป็นแบบจำลองอย่างง่าย โดยแบบจำลองนี้มีส่วนประกอบเฉพาะระยะทางและความถี่เท่านั้น ดังแสดงในสมการที่ 2.23 โดยในงานวิจัยนี้ จะใช้แบบจำลองนี้เมื่อทำการรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานกับสถานีถ่ายทอด หรือระหว่างสถานีถ่ายทอดด้วยกันเอง

$$PL_f = 32.4 + 20\log_{10} d_{km} + 20\log_{10} f_{MHz} \quad (2.23)$$

โดยที่  $PL_f$  คือ Free Space Path Loss หน่วยเป็น dB

$d_{km}$  คือ ระยะทาง หน่วยเป็น กิโลเมตร

$f_{MHz}$  คือ ความถี่ หน่วยเป็น MHz

### 2.5.2 แบบจำลอง Path Loss Modified Stanford University Interim (SUI)

ภูมิภาคประเทศที่มี Path Loss มาก คือ บริเวณที่เต็มไปด้วยเนินเขา (ประเภท A) ส่วนภูมิภาคประเทศที่มี Path Loss น้อย จะเป็นบริเวณที่ราบเรียบ และมีต้นไม้เบาบาง (ประเภท C) และที่ที่มี Path Loss กลาง ๆ ถูกจัดให้อยู่ในประเภท B ซึ่งสูตรในการหา SUI Path Loss หาได้จาก

$$L = A + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_h + S \quad (2.24)$$

โดยที่  $L$  คือ ค่าการสูญเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้น

$A$  คือ Free Space Loss ที่อิงกับระยะทาง  $d_0$

$\gamma$  คือ Path Loss Exponent โดยมีค่าดังสมการที่ (2.25)

$$\gamma = \left( a - bh_b + \frac{c}{h_b} \right) \quad (2.25)$$

โดยที่  $h_b$  คือ ความสูงของสถานีฐานจากพื้นดิน ( $10 \text{ เมตร} \leq h_b \leq 80 \text{ เมตร}$ )

$a, b$  และ  $c$  คือ ค่าคงที่ ซึ่งดูได้จากตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แสดงค่า SUI Terrain

Constant	Terrain A	Terrain B	Terrain C
A	4.6	4.0	3.6
B	0.007	0.007	0.0065
C	12.6	17.1	20

โดยที่  $d$  คือ ระยะห่างระหว่างสถานีฐานกับเครื่องรับสัญญาณ ( $d \geq d_0$ )

$d_0$  คือ มีค่า 100 เมตร

$X_f$  คือ Frequency-Correction Factor โดยมีค่าดังสมการที่ (2.26)

$$X_f = 6 \log_{10} \left( \frac{f}{2000} \right) \quad (2.26)$$

โดยที่  $f$  คือ ความถี่

$X_b$  คือ Correction Factor สำหรับความสูงของเครื่องรับสัญญาณ

$$X_b = -10.8 \log_{10} \left( \frac{h_m}{2} \right) \quad \text{สำหรับ Terrain Type a และ b} \quad (2.27)$$

$$X_b = -10.8 \log_{10} \left( \frac{h_m}{2} \right) \quad \text{สำหรับ terrain type c} \quad (2.28)$$

โดยที่  $h_m$  คือ ความสูงของเครื่องรับสัญญาณจากพื้นดิน

$S$  คือ Shadowing Factor สำหรับการแจกแจงแบบสุ่มของ Log-Normally  
โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 8.2 ถึง 10.5 dB

โดยงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองนี้เมื่อทำการรับส่งข้อมูลระหว่างสถานีฐานกับ  
ผู้ใช้งานหรือระหว่างสถานีถ่ายทอดกับผู้ใช้งาน

### 2.5.3 RMS Delay Spread

ค่า RMS Delay Spread เป็นไปตามการแจกแจงแบบ Log-Normal ซึ่งแบบจำลองนี้  
มีค่า RMS Delay Spread ดังสมการ

$$\tau_{\text{rms}} = T_1 d^\epsilon y \quad (2.29)$$

โดยที่  $d$  คือ ระยะทางในหน่วยกิโลเมตร

$T_1$  คือ ค่าเฉลี่ยของ  $\tau_{\text{rms}}$  ที่ระยะ  $d=1$  กม.  $\epsilon$  มีค่าระหว่าง 0.5-1

$y$  คือ ความแปรปรวนของ Log-Normal

### 2.5.4 Fade Distribution หรือ K-Factor

สัญญาณที่มีแบนด์แคบ จะมีลักษณะการแจกแจงแบบริเซียน (Ricean Distribution)  
ซึ่งพารามิเตอร์ที่สำคัญของการแจกแจงแบบนี้คือ ค่า K-Factor ซึ่งสามารถแสดงส่วนประกอบกำลัง  
ที่เป็นแบบประจำที่ (Fixed) หรือเป็นแบบกระเจิง (Scatter) จากผลการทดลองที่บริเวณอ่าวในรัฐ  
ซานฟรานซิสโก ที่ความถี่ 2.4 GHz ความสูงของสายอากาศภาคส่งประมาณ 20 เมตร ซึ่งการแจก  
แจงของ K-Factor นี้เป็นแบบ Log-Normal ซึ่งมีค่าเฉลี่ยขึ้นอยู่กับฤดู ความสูง ของสายอากาศ ความ  
กว้างของลำคลื่นของสายอากาศ และระยะทาง ในที่นี้มีความเบี่ยงเบนมาตรฐานประมาณ 8 dB  
จากผลการทดลองนี้สามารถหาค่า K-Factor ได้ดังนี้

$$K = F_s F_h F_b K_0 d^\gamma u \quad (2.30)$$

โดยที่  $F_s$  คือ Factor ที่ขึ้นอยู่กับฤดู โดย  $F_s = 1$  ในฤดูร้อน  $F_s = 2.5$  ในฤดูหนาว

$F_h$  คือ Factor ที่ขึ้นอยู่กับความสูงของสายอากาศภาครับ โดย  $F_h = (h/3)^{0.46}$



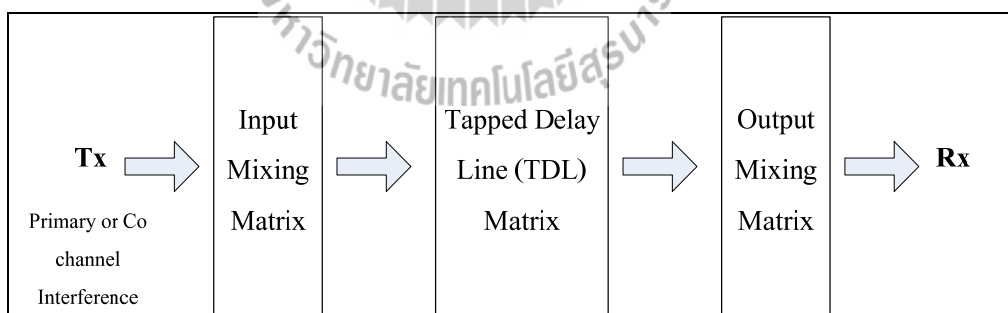
- $F_b$  คือ Factor ที่ขึ้นอยู่กับความกว้างของลำคลื่น ซึ่งมีค่า  $F_b = (b/17)^{-0.62}$
- $K_0$  และ  $\gamma$  คือ Regression Coefficient ซึ่ง  $K_0 = 10, \gamma = -0.5$
- $u$  คือ ตัวแปร Log-Normal ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 dB และความเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 8 dB
- $y$  คือ ความแปรปรวนของ Log-Normal

### 2.5.5 Antenna Gain Reduction Factor (GRF)

Factor นี้ใช้สำหรับพิจารณา link budget ของสายอากาศภาครับ จากผลการทดลองที่วัดในบริเวณชานเมือง โดยความสูงของสายอากาศที่สถานีฐานสูง 43 เมตร สายอากาศที่ภาครับสูง 5.2 10.4 และ 16.5 เมตร และสายอากาศภาครับมีความกว้างของลำคลื่น  $10^\circ$  สำหรับค่า GRF ที่สายอากาศภาครับสูง 5.2 เมตร นั้นมีค่าเท่ากับ 10 dB ส่วนค่า GRF ที่สายอากาศภาครับสูง 10.4 และ 16.5 เมตร จะมีค่าประมาณ 7 dB

### 2.5.6 แบบจำลองช่องสัญญาณ Modified Stanford University Interim (SUI)

ในแบบจำลองนี้จะแบ่งรูปแบบของช่องสัญญาณออกเป็น 6 รูปแบบ ซึ่งถูกเลือกมาจากสามภูมิภาคในสหรัฐอเมริกา ซึ่งแบบจำลองนี้เหมาะสำหรับใช้ในการจำลองผลออกแบบพัฒนาและใช้ในการทดสอบเทคโนโลยีที่เหมาะสมกับการสื่อสารแบนด์กว้างแบบไร้สายแบบหนึ่งซึ่งค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ถูกเลือกมาจากแบบจำลองที่ได้กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 2.20 โครงสร้างของแบบจำลองช่องสัญญาณ SUI

โครงสร้างของช่องสัญญาณ SUI ที่แสดงในรูปที่ 2.20 แบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน คือ

- 1) Input Mixing Matrix ใน ส่วนนี้ จะเป็น ความสัมพันธ์ ระหว่างสัญญาณอินพุต เมื่อใช้สายอากาศส่งหลายต้น

2) Tapped Delay Line Matrix ในส่วนนี้จะจะเป็น multipath fading ของช่องสัญญาณ ที่มี tapped delay line 3 tap ซึ่งในแต่ละ tap นั้นจะเป็นแบบ non uniform delay และอัตราขยาย มีการแจกแจงแบบริเชียน ที่มี K-Factor > 0 หรือเป็นแบบเรย์ลี (Rayleigh) ที่มี K-Factor = 0

3) Output Mixing Matrix ในส่วนนี้จะเป็นการสัมพันธ์ระหว่างสัญญาณเอาต์พุต ที่มีการใช้สายอากาศภาครับหลายต้น

ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI (Erceg et al., 2001) สามารถสรุป ได้ดังตารางที่ 2.4 ถึงตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.4 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของช่องสัญญาณ SUI

ประเภทของภูมิภาค		รูปแบบช่องสัญญาณ SUI	
C		SUI-1 SUI-2	
B		SUI-3 SUI-4	
A		SUI-5 SUI-6	
ค่า K-Factor ต่ำ			
Doppler	Low delay spread	Moderate delay spread	High delay spread
Low	SUI-3		SUI-5
High		SUI-4	SUI-6
ค่า K-Factor สูง			
Doppler	Low delay spread	Moderate delay spread	High delay spread
Low	SUI-1 SUI-2		
High			

ตารางที่ 2.5 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่องสัญญาณ SUI 1

SUI-1 Channel				
	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Units
Delay	0	0.4	0.9	$\mu s$
Power (omni Ant.)	0	-15	-20	dB
90% K-Fact. (omni)	4	0	0	
75% K-Fact. (omni)	20	0	0	
Power (30° Ant.)	0	-21	-32	dB
90% K-Fact. (30°)	16	0	0	
75% K-Fact. (30°)	72	0	0	
Doppler	0.4	0.3	0.5	Hz
Ant. Corelation : $\rho_{ENV} = 0.7$		Terrain Type : C		
Gain Reduction Factor : $GRF = 0$ dB		Omni Antenna : $\tau_{RMS} = 0.111 \mu s$		
Normalization Factor : $F_{omni} = -0.1771$ dB		Overall K : K = 3.3 (90%); K = 10.4 (75%)		
$F_{30^\circ} = -0.0371$ dB		30° antenna : $\tau_{RMS} = 0.042 \mu s$		
		Overall K : K = 14.0 (90%); K = 44.2 (75%)		



ตารางที่ 2.6 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่องสัญญาณ SUI 2

SUI-2 Channel				
	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Units
Delay	0	0.4	1.1	$\mu s$
Power (omni Ant.)	0	-12	-15	dB
90% K-Fact. (omni)	2	0	0	
75% K-Fact. (omni)	11	0	0	
Power (30° Ant.)	0	-18	-27	dB
90% K-Fact. (30°)	8	0	0	
75% K-Fact. (30°)	36	0	0	
Doppler	0.2	0.15	0.25	Hz
Ant. Corelation : $\rho_{ENV} = 0.5$		Terrain Type : C		
Gain Reduction Factor : $GRF = 2$ dB		Omni Antenna : $\tau_{RMS} = 0.202 \mu s$		
Normalization Factor : $F_{omni} = -0.393$ dB		Overall K : K = 1.6 (90%); K = 5.1 (75%)		
$F_{30^\circ} = -0.0768$ dB		30° antenna : $\tau_{RMS} = 0.069 \mu s$		
		Overall K : K = 6.9 (90%); K = 21.8 (75%)		



ตารางที่ 2.7 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในช่องสัญญาณ SUI 3

SUI-3 Channel				
	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Units
Delay	0	0.4	0.9	$\mu s$
Power (omni Ant.)	0	-5	-10	dB
90% K-Fact. (omni)	1	0	0	
75% K-Fact. (omni)	7	0	0	
Power (30° Ant.)	0	-11	-22	dB
90% K-Fact. (30°)	3	0	0	
75% K-Fact. (30°)	19	0	0	
Doppler	0.4	0.3	0.5	Hz
Ant. Correlation : $\rho_{ENV} = 0.4$		Terrain Type : B		
Gain Reduction Factor : $GRF = 3$ dB		Omni Antenna : $\tau_{RMS} = 0.264 \mu s$		
Normalization Factor : $F_{omni} = -1.5113$ dB		Overall K : K = 0.5 (90%); K = 1.6 (75%)		
$F_{30^\circ} = -0.3573$ dB		30° antenna : $\tau_{RMS} = 0.123 \mu s$		
		Overall K : K = 2.2 (90%); K = 7.0 (75%)		



ตารางที่ 2.8 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในช่องสัญญาณ SUI 4

SUI-4 Channel				
	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Units
Delay	0	1.5	4	$\mu s$
Power (omni Ant.)	0	-4	-8	dB
90% K-Fact. (omni)	0	0	0	
75% K-Fact. (omni)	1	0	0	
Power (30° Ant.)	0	-10	-20	dB
90% K-Fact. (30°)	1	0	0	
75% K-Fact. (30°)	5	0	0	
Doppler	0.2	0.15	0.25	Hz
Ant. Corelation : $\rho_{ENV} = 0.3$		Terrain Type : B		
Gain Reduction Factor : $GRF = 4$ dB		Omni Antenna : $\tau_{RMS} = 1.257 \mu s$		
Normalization Factor : $F_{omni} = -1.9218$ dB		Overall K : K = 0.2 (90%); K = 0.6 (75%)		
$F_{30^\circ} = -0.4532$ dB		30° antenna : $\tau_{RMS} = 0.563 \mu s$		
		Overall K : K = 1.0 (90%); K = 3.2 (75%)		

ตารางที่ 2.9 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในช่องสัญญาณ SUI 5

SUI-5 Channel				
	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Units
Delay	0	4	10	$\mu s$
Power (omni Ant.)	0	-5	-10	dB
90% K-Fact. (omni)	0	0	0	
75% K-Fact. (omni)	0	0	0	
50% K-Fact. (omni)	2	0	0	
Power (30° Ant.)	0	-11	-22	dB
90% K-Fact. (30°)	0	0	0	
75% K-Fact. (30°)	2	0	0	
50% K-Fact. (30°)	7	0	0	
Doppler	2	1.5	2.5	Hz
Ant. Corelation : $\rho_{ENV} = 0.3$		Terrain Type : A		
Gain Reduction Factor : $GRF = 4$ dB		Omni Antenna : $\tau_{RMS} = 2.842 \mu s$		
Normalization Factor : $F_{omni} = -1.5113$ dB		Overall K : K = 0.1 (90%); K = 0.3 (75%)		
$F_{30^\circ} = -0.3573$ dB		K = 1.0 (50%)		
		30° antenna : $\tau_{RMS} = 1.276 \mu s$		
		Overall K : K = 0.4 (90%); K = 1.3 (75%)		
		K = 4.2 (50%)		

ตารางที่ 2.10 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในช่องสัญญาณ SUI 6

SUI-6 Channel				
	Tap 1	Tap 2	Tap 3	Units
Delay	0	14	20	$\mu s$
Power (omni Ant.)	0	-10	-14	dB
90% K-Fact. (omni)	0	0	0	
75% K-Fact. (omni)	0	0	0	
50% K-Fact. (omni)	1	0	0	
Power (30° Ant.)	0	-16	-26	dB
90% K-Fact. (30°)	0	0	0	
75% K-Fact. (30°)	2	0	0	
50% K-Fact. (30°)	5	0	0	
Doppler	0.4	0.3	0.5	Hz
Ant. Corelation : $\rho_{ENV} = 0.3$		Terrain Type : A		
Gain Reduction Factor : $GRF = 4$ dB		Omni Antenna : $\tau_{RMS} = 5.240 \mu s$		
Normalization Factor : $F_{omni} = -0.5683$ dB		Overall K : K = 0.1 (90%); K = 0.3 (75%)		
$F_{30^\circ} = -0.1184$ dB		K = 1.0 (50%)		
		30° antenna : $\tau_{RMS} = 2.370 \mu s$		
		Overall K : K = 0.4 (90%); K = 1.3 (75%)		
		K = 4.2 (50%)		

### ข้อดีของระบบSUI

1. เป็นวิธีการที่ง่ายในการที่จะวิเคราะห์เป็นลำดับขั้นตอน
2. มีความใกล้เคียงกับแบบจำลองของการแผ่กระจายพลังงาน
3. มีการกำหนดตัวแปรเกี่ยวกับลักษณะภูมิประเทศ และปัจจัยอื่น ๆ อย่าง

ตรงไปตรงมา

แบบจำลองนี้ จะให้ผลของการเชื่อมโยงและแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณหา ระยะที่จะนำไปใช้งานเบื้องต้นในการออกแบบ โดยเริ่มจากการกำหนดขอบเขตพื้นที่ครอบคลุม โดยประมาณ

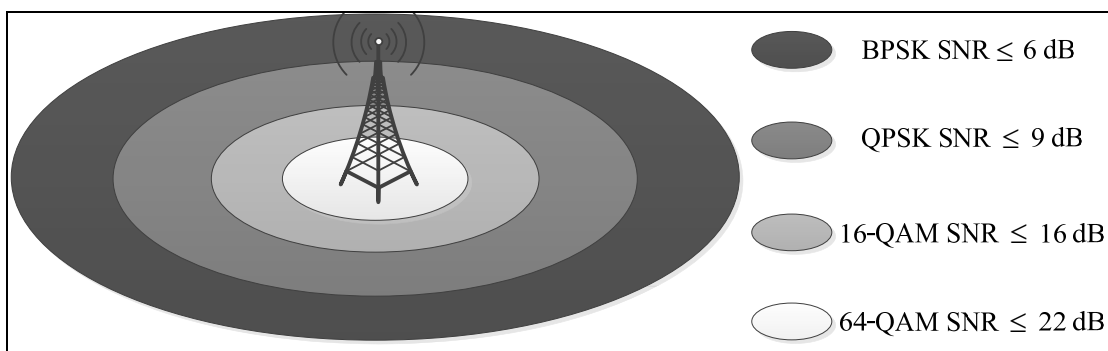


## 2.6 การมอดูเลชันแบบปรับตัว (Adaptive Modulation and Coding : AMC)

จากความต้องการที่เพิ่มสูงขึ้นสำหรับการใช้อินเทอร์เน็ตผ่านอุปกรณ์ในขณะที่กำลังเคลื่อนที่ได้ นั้น ทำให้คลื่นความถี่วิทยุที่ใช้งานเกิดความไม่เพียงพอกับผู้ใช้บริการ และเกิดความ ต้องการสำหรับรูปแบบในการส่งคลื่นวิทยุอย่างมีประสิทธิภาพเป็นอย่างมากเพื่อรองรับการรับส่ง ข้อมูลที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูง ทำให้ความยุ่งยากในการให้บริการเพิ่มมากขึ้น

ในระบบการติดต่อสื่อสารแบบเก่า นั้น จะออกแบบการรับส่งข้อมูลสำหรับสถานการณ์ที่ เลวร้ายที่สุดของช่องสัญญาณ ทำให้เกิดการรับส่งสัญญาณที่เกิดค่า BER ที่น้อยกว่าที่กำหนดไว้ ด้วยรูปการปรับตัวการมอดูเลชัน ซึ่งถูกออกแบบมาเพื่อทำการติดตามคุณภาพช่องสัญญาณ โดยการ ปรับปริมาณงานช่องสัญญาณไปยังสภาพของช่องสัญญาณที่เกิดขึ้นจริง โดยเทคนิคเหล่านี้มี ประโยชน์สำหรับการรบกวนที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติใน ส่วน Time-Varying ของช่องสัญญาณไร้ สายสำหรับระดับของกำลังงานในการส่งสัญญาณที่แตกต่างกัน, อัตราการรับส่งสัญญาณ รูปแบบ การเข้ารหัสสัญญาณ ขนาดของแผนภาพหมุดดาว หรือการรวมกันของพารามิเตอร์ต่าง ๆ เหล่านี้ เพื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพโดยเฉลี่ยของสเปกตรัมที่ใช้เชื่อมโยงกัน ซึ่งคือ จำนวนบิตข้อมูลที่ ส่งออกไปต่อแบนด์วิดท์ที่ใช้

AMC นั้นเป็นกระบวนการหนึ่งที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพสเปกตรัมของ Time-Varying ของช่องสัญญาณไร้สายเพื่อรักษาค่า BER ไว้ โดย AMC ไม่เพียงแต่ปรับการมอดูเลชันเท่านั้น ยังทำการปรับรูปแบบของ FEC เพื่อทำการปรับอัตราการเข้ารหัสต่าง ๆ เพื่อให้เหมาะสมสำหรับ สภาพช่องสัญญาณขณะนั้น ตัวอย่างเช่น ในช่วงเวลาที่สภาพช่องสัญญาณเลวร้าย หรือมีค่า SNR ที่ต่ำ จะทำการปรับรูปแบบการมอดูเลชัน เพื่อให้ทนต่อสภาพช่องสัญญาณที่เลวร้ายได้ดีขึ้น แต่จะทำให้มีอัตราเร็วการรับส่งข้อมูลที่ต่ำ และทำการปรับรูปแบบของการเข้ารหัสเพื่อให้มีอัตรา การเร็วการเข้ารหัสที่สอดคล้องกับการมอดูเลชัน ในทางตรงกันข้าม ในช่วงเวลาที่สภาพ ช่องสัญญาณที่ดี หรือมีค่า SNR ที่สูง จะทำการปรับรูปแบบการมอดูเลชันให้มีอัตราการรับส่งข้อมูล ที่สูงขึ้น และทำการปรับรูปแบบการเข้ารหัสเพื่อให้มีอัตราเร็วการเข้ารหัสที่สอดคล้องกับการมอ ดูเลชัน ดังแสดงในรูปที่ 2.21 จากรูปที่แสดงให้เห็นว่า รูปแบบการมอดูเลชัน มีผลต่อพื้นที่ ครอบคลุมในการรับส่งข้อมูลอีกด้วย ซึ่งแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันและการเข้ารหัส นั้น จะให้พื้นที่ ครอบคลุมในการรับส่งข้อมูลที่ไม่เท่ากัน โดยที่การรับส่งข้อมูลสำหรับพื้นที่ครอบคลุมที่กว้าง จะมี อัตราการรับส่งข้อมูลที่ต่ำ แต่ในการรับส่งข้อมูลในพื้นที่ครอบคลุมขนาดเล็กจะมีอัตราการรับส่ง ข้อมูลที่สูง



รูปที่ 2.21 แสดงรูปแบบของการปรับการมอดูเลชันและการเข้ารหัสของระบบไวแมกซ์

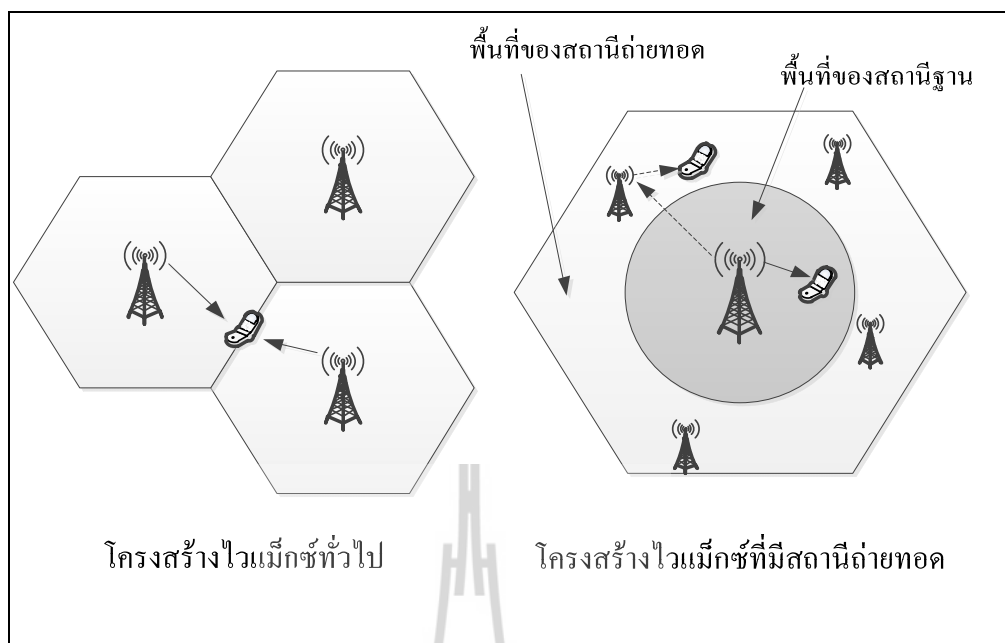
## 2.7 สถานีถ่ายทอดในระบบไวแมกซ์ 802.16j

เป็นการนำสถานีถ่ายทอดเข้ามาใช้ในระบบ ซึ่งมีทั้งสถานีถ่ายทอดแบบประจำที่ (Fixed Multi Hop) และแบบเคลื่อนที่ได้ (Mobile Multi Hop : MMR) โดยฟังก์ชันและการทำงานร่วมกันของสถานีถ่ายทอดนี้เพื่อทำการเพิ่มพื้นที่ครอบคลุม วัสดุศาสตร์ และความจุระบบของเครือข่าย 802.16

### 2.7.1 สถาปัตยกรรมเครือข่ายของ 802.16j

รูปที่ 2.21 เป็นการเปรียบเทียบสถาปัตยกรรมของเครือข่ายระหว่าง MMR กับเครือข่ายไวแมกซ์แบบทั่วไป ซึ่งเป็นการง่ายในการหาข้อแตกต่างระหว่างตัวของมันเองในเครือข่าย MMR ซึ่งระบบ MMR นั้นเป็นระบบที่ใช้สถานีเคลื่อนที่ในการติดต่อสื่อสารกับสถานีฐาน โดยผ่านตัวกลางอย่างสถานีถ่ายทอด ในสถาปัตยกรรมเครือข่ายทั่วไปของไวแมกซ์นั้น สัญญาณจะถูกถ่ายโอนระหว่างสถานีฐานและสถานีที่เคลื่อนที่ปลายทาง แต่ในสถาปัตยกรรมเครือข่าย MMR เซลล์ทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็น 2 บริเวณ คือ บริเวณของสถานีฐานและบริเวณของสถานีถ่ายทอดซึ่งผู้ใช้ที่อยู่ใกล้กับสถานีฐานและอยู่ในบริเวณของสถานีฐานก็จะทำการเชื่อมต่อโดยตรงกับสถานีฐาน ในขณะที่ผู้ใช้ที่อยู่ในบริเวณของสถานีถ่ายทอดที่อยู่นอกบริเวณของสถานีฐานก็จะทำการเชื่อมต่อเข้ากับสถานีถ่ายทอด

สถาปัตยกรรมเครือข่ายของ MMR และไวแมกซ์นั้น โดยทั่วไปแล้วผู้ใช้จะมีบทบาทเหมือนกันในการรับส่งข้อมูลกับสถานีฐานหรือสถานีถ่ายทอดที่ใกล้ที่สุด ซึ่งสถานีฐานและสถานีถ่ายทอดก็จะมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

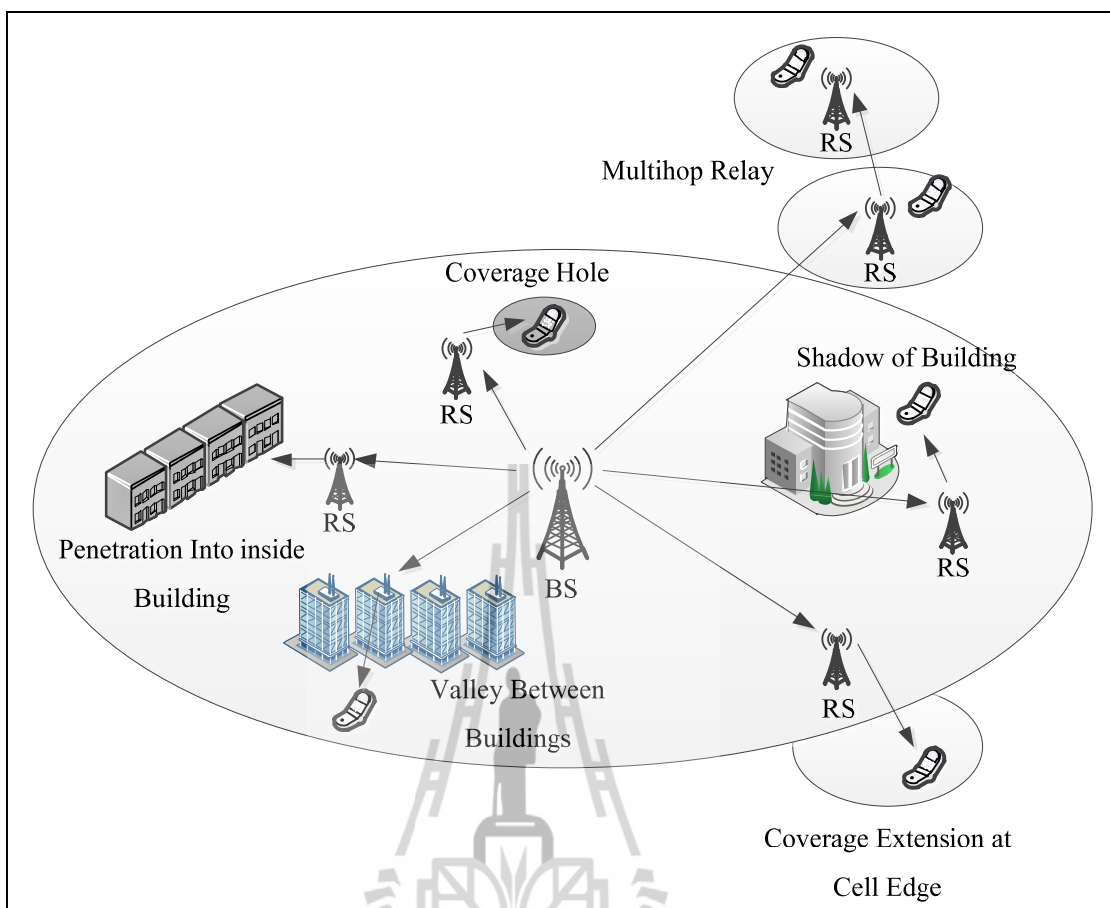


รูปที่ 2.22 แสดงให้เห็นถึง โครงสร้างของไวแมกซ์แบบทั่วไป และแบบที่มีสถานีถ่ายทอด

- **สถานีฐาน**
  1. เพิ่มการรองรับสำหรับการเชื่อมโยงกับ MMR
  2. เพิ่มการรองรับสำหรับการมารวมกันของกราฟฟิคจากผู้ใช้งานหลายคน
  3. โพรโตคอล MAC เพื่อรองรับการติดต่อสื่อสารแบบหลายฮอประหว่างสถานีฐานและสถานีถ่ายทอด
- **สถานีถ่ายทอด**
  1. รองรับการทำงานแบบ Point-to-MultiPoint (PMP) และแบบ MMR
  2. รองรับการทำงานร่วมกันของกราฟฟิคจากผู้ใช้งานหลายคน
  3. โพรโตคอล MAC เพื่อรองรับการติดต่อสื่อสารแบบหลายฮอประหว่างสถานีถ่ายทอด

### 2.7.2 แบบจำลองที่นำมาใช้งานใน 802.16j

จากวิธีการต่าง ๆ ที่แตกต่างกันในการที่จะไปใช้งาน และประเภทที่หลากหลายของการให้บริการต่าง ๆ มีแบบจำลองอยู่สี่แบบที่ถูกคาดการณ์ว่าจะถูกนำมาใช้ในระบบ 802.16j



รูปที่ 2.23 ตัวอย่างการใช้งานของสถานีถ่ายทอดแบบประจำที่

1) แบบจำลองที่นำมาใช้มีโครงสร้างพื้นฐานแบบประจำที่

แบบจำลองนี้นั้น สถานีฐานจะถูกประจำที่ด้วยโครงสร้างพื้นฐานของผู้ให้บริการ โดยสถานีถ่ายทอดจะมีทั้งระยะที่ง่ายและซับซ้อน ในรูปที่ 2.22 สถานีถ่ายทอดถูกนำมาใช้ในการขยายพื้นที่ครอบคลุมที่ขอบของเซลล์เพื่อให้มีพื้นที่ครอบคลุมสำหรับภายในบริเวณอาคาร เพื่อให้ครอบคลุมสำหรับผู้ใช้ในบริเวณที่เป็นจุดอับเนื่องจากการจางหายของสัญญาณและการบังสัญญาณระหว่างตึก และเพื่อให้การเข้าถึงสำหรับกลุ่มของผู้ใช้งานที่อยู่นอกพื้นที่ครอบคลุมของสถานีฐาน

2) แบบจำลองที่นำมาใช้ให้ครอบคลุมพื้นที่ภายในตึก

การใช้งานแบบจำลองประเภทนี้จะทำในตึก เช่น อุโมงค์ รถไฟฟ้าใต้ดิน โดยสถานีถ่ายทอดจะทำงานเองด้วยโครงสร้างพื้นฐานของผู้ให้บริการหรือผู้ใช้บริการและจะต้องเป็นไปอย่างง่ายและราคาถูก ในรูปแบบการใช้งานนี้สถานีถ่ายทอดจะเป็นแบบประจำที่หรือ

แบบเคลื่อนที่ก็ได้ โดยจะต้องเป็นตำแหน่งที่ดำเนินการและใช้งานได้ ตัวอย่างหนึ่งในรูปแบบการ ใช้งานครอบคลุมภายในตึกซึ่งเป็น RSs แบบเคลื่อนที่ที่อยู่ภายในตึก โดยจะรับสัญญาณจากสถานี ฐานและทำการส่งต่อไปยังผู้ใช้งานที่อยู่ภายในตึก หรือทำการส่งข้อมูลระหว่างสถานีถ่ายทอดที่อยู่ ภายในอาคารขนาดใหญ่ เช่น ที่อยู่อาศัย สำนักงาน

### 3) แบบจำลองที่นำมาใช้ให้ครอบคลุมพื้นที่แบบชั่วคราว

การใช้งานแบบจำลองนี้สถานีถ่ายทอดจะไม่อยู่ประจำที่ และจะถูกนำไปใช้งาน แบบชั่วคราว ตัวอย่างเช่น เมื่อมีการแข่งขันกีฬาซึ่งจัดขึ้นบางครั้ง เราจำเป็นต้องใช้สถานีถ่ายทอด อื่น ๆ ช่วยสถานีฐานหรือสถานีถ่ายทอดแบบประจำที่ เพื่อให้ครอบคลุมหรือความถี่ที่ต้องการ นอกจากนี้ RSs แบบชั่วคราวยังสามารถใช้ในสถานที่ที่สถานีถ่ายทอดใช้งานไม่ได้

### 4) แบบจำลองที่นำมาใช้ให้ครอบคลุมพื้นที่บนยานพาหนะที่เคลื่อนที่

การใช้งานแบบจำลองนี้สถานีถ่ายทอดจะถูกติดตั้งบนยานพาหนะที่เคลื่อนที่ ได้ เช่นรถบัส รถไฟ และยังทำการเชื่อมต่อไปยังสถานีฐานหรือสถานีถ่ายทอดด้วยการเชื่อมต่อ ขณะเคลื่อนที่ได้ โดยสถานีถ่ายทอดจะช่วยให้การเข้าถึงเชื่อมต่อไปยัง MS/SS โดยสถานีถ่ายทอด สามารถเคลื่อนที่ไปยังเส้นทางที่กำหนด โดยสถานีถ่ายทอดจะถูกใช้เมื่อรถไฟเดินทางผ่านอุโมงค์ ซึ่งอยู่ในการครอบคลุมของ RSs

ในวิทยานิพนธ์นี้ เราจะสนใจแบบจำลองแบบประจำที่เท่านั้น

## 2.7.3 ประเภทของสถานีถ่ายทอด

ในการใช้งานระบบสถานีถ่ายทอดของระบบไวแมกซ์นั้น มีประเภทของสถานี ถ่ายทอดที่แบ่งตามลักษณะการทำงานอยู่ 3 ประเภท คือ

### 1) Amplify and Forward

เป็นสถานีถ่ายทอดที่รับสัญญาณมาจากสถานีฐานหรือผู้ใช้งาน แล้วทำการ ขยายสัญญาณก่อนที่จะทำการส่งต่อไปยังสถานีฐานหรือผู้ใช้งาน โดยสถานีถ่ายทอดประเภทนี้นั้น มีกระบวนการทำงานอย่างง่ายและมีการประวิงเวลาของสัญญาณน้อย แต่ในการขยายสัญญาณ เพียงอย่างเดียวนั้น มีความหมายว่าได้ทำการขยายสัญญาณครบถ้วนด้วย

### 2) Demodulation and Forward

เป็นสถานีถ่ายทอดที่รับสัญญาณมาจากสถานีฐานหรือผู้ใช้งาน แล้วทำการดี มอดูเลชันสัญญาณ แล้วทำการมอดูเลชันอีกครั้ง และทำการขยายสัญญาณจึงทำการส่งต่อไปยัง สถานีฐานหรือผู้ใช้งาน โดยสถานีถ่ายทอดประเภทนี้มีกระบวนการทำที่เป็นกระบวนการทำที่ง่าย และมีการประวิงเวลาของกระบวนการต่ำ แต่ไม่สามารถป้องกันความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากทำดีมอดู เลชันข้อมูลที่ผิดพลาดได้

### 3) Decode and Forward

เป็นสถานีถ่ายทอดที่รับสัญญาณมาจากสถานีฐานหรือผู้ใช้งาน แล้วทำการดีมอดูเลชันสัญญาณ ถอดรหัสสัญญาณ แล้วทำการเข้ารหัสสัญญาณ ต่อด้วยการทำมอดูเลชัน และจึงทำการขยายสัญญาณก่อนทำการส่งต่อไปยังสถานีฐานหรือผู้ใช้งาน โดยสถานีถ่ายทอดประเภทนี้มีกระบวนการทำงานที่มีค่าประวิงเวลาที่นานมาก แต่สามารถแก้ไขข้อมูลที่ผิดพลาดที่รับมาได้ ก่อนที่จะทำการส่งออกไป

## 2.8 สรุปเนื้อหาในบทที่ 2

เนื้อหาที่ได้กล่าวในบทนี้จะเป็นการอธิบายถึงระบบไวแมกซ์ ซึ่งเป็นมาตรฐานที่มีอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูง ในระบบไวแมกซ์นี้จะกล่าวถึง แอร์อินเตอร์เฟซของระบบไวแมกซ์ ซึ่งจะอธิบายการทำงานในชั้น Medium Access Control และชั้น PHY Layer และจะกล่าวถึงโครงสร้างของระบบไวแมกซ์ ซึ่งจะแบ่งเป็น โครงสร้างของภาคส่ง และโครงสร้างของภาครับ จากนั้นจะเป็นการอธิบายแบบจำลองช่องสัญญาณที่ใช้ในระบบไวแมกซ์ ซึ่งก็คือ ช่องสัญญาณ SUI ในช่องสัญญาณ SUI นี้จะมีทั้งหมด 6 รูปแบบ ซึ่งจะครอบคลุมลักษณะภูมิประเทศทั้งหมด จากนั้นเป็นการอธิบายการมอดูเลชันแบบปรับตัว ซึ่งเป็นเทคนิคในระบบไวแมกซ์ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งข้อมูล คือ จะทำการปรับรูปแบบการมอดูเลชันให้เหมาะสมกับลักษณะของช่องสัญญาณนั้น ๆ ซึ่งการมอดูเลชันแบบ BPSK จะสามารถทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดีที่สุด แต่ให้อัตราการรับส่งข้อมูลที่ต่ำที่สุด ส่วนรูปแบบการมอดูเลชันแบบ 64-QAM จะทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้น้อยที่สุด แต่ให้อัตราการรับส่งข้อมูลที่สูงที่สุด ซึ่งเป็นผลทำให้พื้นที่ครอบคลุมที่เกิดจากแต่ละการมอดูเลชันมีขนาดที่ไม่เท่ากัน จากนั้นจะเป็นการอธิบายถึงสถานีถ่ายทอดที่ใช้กับระบบไวแมกซ์ โดยกล่าวถึงรูปแบบการนำไปใช้งาน หรือประเภทของสถานีถ่ายทอดที่นำไปใช้งาน

### บทที่ 3

## การวิเคราะห์สมรรถนะระบบไวแมกซ์ในทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้ จะแสดงถึงการวิเคราะห์กระบวนการต่าง ๆ ของระบบไวแมกซ์ในชั้นกายภาพ ที่ทำให้ระบบไวแมกซ์นั้น มีอัตราในการรับส่งข้อมูลที่สูง และมีความยืดหยุ่นในการนำไปใช้งาน โดยจะวิเคราะห์ผลกระทบในเชิงคณิตศาสตร์ สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันของระบบไวแมกซ์

### 3.1 ผลกระทบของกระบวนการในชั้นกายภาพของไวแมกซ์

กระบวนการต่าง ๆ ในชั้นกายภาพของระบบไวแมกซ์มีอยู่หลายขั้นตอน ในที่นี้จะทำการวิเคราะห์เพียงแค่ผลกระทบของการเข้ารหัสรีดโซโลมอน, การเข้ารหัสคอนโวลูชัน การมอดูเลชัน OFDM และ CP เนื่องจากมีรูปแบบการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ที่ง่าย และสามารถนำไปปรับประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายอีกด้วย

#### 3.1.1 การเข้ารหัสรีดโซโลมอน

การเข้ารหัสรีดโซโลมอนนี้ จะทำด้วย  $GF(256) = GF(2^8)$  โดยที่แต่ละสัญลักษณ์จะประกอบไปด้วยบิตจำนวน 8 บิต โดยการเข้ารหัสรีดโซโลมอนของระบบไวแมกซ์ ถูกกำหนดด้วย  $(n=255, k=239, t=8)$  ซึ่งได้สมการคำนวณหาอัตราลดทอนที่เกิดเนื่องจากกระบวนการนี้ ดังสมการที่ 3.1 (Sean Stamplecoskie)

$$10\log_{10}\left(\frac{1}{2}\right)Rd_{\min} \quad (dB) \quad (3.1)$$

โดยที่  $R$  คือ อัตราเร็วการเข้ารหัส

$d_{\min}$  คือ  $2t+1$

#### 3.1.2 การเข้ารหัสคอนโวลูชัน

การเข้ารหัสคอนโวลูชันแบบไบนารีนี้ เป็นการเข้ารหัสชั้นในของการเข้ารหัสแบบต่อรวมกันของการเข้ารหัสรีดโซโลมอนและการเข้ารหัสคอนโวลูชัน โดยการเข้ารหัสคอนโวลูชันของระบบไวแมกซ์ถูกกำหนดด้วยพหุนามกำเนิดสองตัวที่ใช้ในการเข้ารหัสคือ  $171_{\text{oct}}$  และ  $133_{\text{oct}}$

และเพื่อรองรับอัตราเร็วการเข้ารหัสที่หลากหลายของระบบไวแมกซ์ จะมีการทำ ฟังก์ชันเพื่อทำการปรับขนาดข้อมูลขาออกของการเข้ารหัสให้มีขนาดเท่ากัน เพื่อให้เกิดความ ยืดหยุ่นในการใช้งาน โดยการเข้ารหัสคอนโวลูชันจะมีระยะ  $d_{\text{free}}$  เป็นตัวกำหนด ดังแสดงได้ตาม ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่า  $d_{\text{free}}$  ที่แปรผันตาม Over all Code Rate

	Code Rate			
Over all Code Rate	1/2	2/3	3/4	5/6
$d_{\text{free}}$	10	6	5	4

จะได้การคำนวณหาอัตราลดทอนที่เกิดขึ้น ดังสมการที่ 3.2 และสมการที่ 3.3 (Sean Stamplecoskie)

$$10 \log_{10} \left( \frac{1}{2} \right) R d_{\text{free}} \quad \text{Hard Decision} \quad (dB) \quad (3.2)$$

$$10 \log_{10} R d_{\text{free}} \quad \text{Soft Decision} \quad (dB) \quad (3.3)$$

### 3.1.3 การมอดูเลชัน

การมอดูเลชันคือการแมปสัญลักษณ์ของลำดับข้อมูล ซึ่งจะทำแมปสัญลักษณ์อย่าง เป็นรูปแบบ โดยรูปแบบในการมอดูเลชันที่ใช้ในระบบไวแมกซ์คือ BPSK QPSK 16-QAM และ 64-QAM ซึ่งผลกระทบของการมอดูเลชันเหล่านี้ ที่พิจารณาเฉพาะ SNR ที่มีต่อค่า BER ของระบบ ซึ่งแต่ละรูปแบบในการมอดูเลชัน ก็จะมีลักษณะที่แตกต่างกัน โดยจะได้สมการการคำนวณหาอัตรา ลดทอนที่เกิดเนื่องจากกระบวนการนี้ ดังตารางที่ 3.2 (Andrea Goldsmith)

ในส่วนของงานวิจัยนี้ ได้มีความสนใจถึงค่า BER ซึ่งเราสามารถทำการประมาณ ให้อยู่ในรูปของความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิต (Probability of bit error :  $P_b$ ) ได้ คือ

$$P_b \approx BER \quad (3.4)$$



โดย  $P_b$  คือ ความน่าจะเป็นความผิดพลาดบิต

ตารางที่ 3.2 แสดงสมการ BER ของแต่ละรูปแบบการมอดูเลชัน

Modulation	$P_b(\gamma_b)$
BPSK	$P_b = Q(\sqrt{2\gamma_b})$
QPSK	$P_b = Q(\sqrt{2\gamma_b})$
M-QAM	$P_b = \frac{4}{\log_2 M} Q\left(\sqrt{\frac{3\gamma_b \log_2 M}{M-1}}\right)$

โดย  $\gamma_b$  คือ กำลังงานของสัญญาณต่อกำลังงานสัญญาณรบกวน (SNR)

### 3.1.4 OFDM

กระบวนการทำ OFDM นั้น เราจะใช้ 192 สัญลักษณ์ จากการแมปสัญลักษณ์ โดยจำนวนที่ได้ออกมาจากการเข้ารหัส OFDM จะมีจำนวน 256 สัญลักษณ์ ซึ่งกระบวนการในการเข้ารหัส OFDM จะใช้อัลกอริทึม IFFT ส่วนกระบวนการในการถอดรหัส OFDM จะใช้อัลกอริทึม FFT ในการถอดรหัส ซึ่งจะได้สมการการคำนวณหาอัตราการลดทอนที่เกิดเนื่องจากการกระบวนการทำ OFDM นี้ ดังสมการที่ 3.4 (Sean Stamplecoskie)

$$10 \log \left( \frac{N_{\text{data}}}{N_{\text{fft}}} \right) \text{ (dB)} \quad (3.5)$$

โดย  $N_{\text{data}}$  คือ จำนวนสัญลักษณ์ก่อนทำกระบวนการ FFT

$N_{\text{fft}}$  คือ จำนวนสัญลักษณ์ที่ได้หลังจากการทำ FFT

### 3.1.5 Cyclic Prefix

การสูญเสียเนื่องจากการใส่ CP นี้ เป็นการสูญเสียที่เกิดจากการเพิ่มของสัญญาณรบกวนที่ถูกเพิ่มเข้าไปที่ขาเข้าของตัวรับสัญญาณ โดยสัญญาณข้อมูลจะอยู่ในช่วงของคาบเวลา  $T_b$  และสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นบนคาบของสัญลักษณ์นั้น อธิบายได้ด้วย  $T_s = T_b + T_g$  โดยอัตราส่วนของช่วงเวลาที่เราใช้ในการจำลองแบบคือ  $1/4$  และ  $T_g = G \cdot T_b$  ดังนั้น การคำนวณหาอัตราการลดทอนที่เกิดเนื่องจากการใส่ CP ดังสมการที่ (3.6) (Sean Stamplecoskie)

$$10\log_{10}\left(\frac{T_b}{T_g}\right) \quad (3.6)$$

### 3.2 สมการที่ใช้คำนวณหาค่า BER ที่แปรผันตามค่า SNR

ในการคำนวณหาค่า BER ของระบบไวแมกซ์นั้น เราจะใช้สมการของการหาค่า BER ที่แปรผันตามค่า SNR ของแต่ละการมอดูเลชันเป็นหลัก (ตารางที่ 3.2) และเมื่อได้ทำการใส่ผลกระทบของกระบวนการต่าง ๆ ในระบบไวแมกซ์ และได้ทำการเปรียบเทียบให้ผลที่ได้จากสมการ มีค่าใกล้เคียงกับผลของแบบจำลอง ทำให้เราได้สมการ BER ที่แปรผันตาม SNR สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงสมการ BER ที่แปรผันตาม SNR สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์

Modulation	สมการ BER กับ SNR
BPSK 1/2	$P_b = Q(\sqrt{2 \times SNR})$
QPSK 1/2	$P_b = Q(\sqrt{2 \times SNR \times CC})$
QPSK 3/4	$P_b = \frac{4}{\log_2 4} Q\left(\sqrt{3 \times SNR \times OFDM \times CP \times \frac{\log_2 4}{3}}\right)$
16-QAM 1/2	$P_b = \frac{4}{\log_2 16} Q\left(\sqrt{3 \times SNR \times OFDM \times CP \times d_{free} \times \frac{\log_2 16}{15}}\right)$
16-QAM 3/4	$P_b = \frac{4}{\log_2 16} Q\left(\sqrt{3 \times SNR \times OFDM \times CP \times d_{free} \times \frac{\log_2 16}{15}}\right)$
64-QAM 2/3	$P_b = \frac{4}{\log_2 64} Q\left(\sqrt{3 \times SNR \times CC \times OFDM \times CP \times \frac{\log_2 64}{63}}\right)$
64-QAM 3/4	$P_b = \frac{4}{\log_2 64} Q\left(\sqrt{3 \times SNR \times OFDM \times CP \times \frac{\log_2 64}{63}}\right)$

โดยที่  $RS = \frac{1}{2} \left(\frac{n}{k}\right) d_{\min} =$  ผลกระทบของการเข้ารหัสรีดโซโลมอน (3.7)

$$CC = \frac{1}{2} (CC_{rate}) d_{free} =$$
 ผลกระทบของการเข้ารหัสคอนโวลูชัน (3.8)

$$OFDM = \frac{192}{256} = \text{ผลกระทบของการทำ OFDM} \quad (3.9)$$

$$CP = \frac{T_b}{T_g} = \frac{8}{10} = \text{ผลกระทบของการทำ CP} \quad (3.10)$$

ตารางที่ 3.4 แสดงค่า  $d_{\min}$ ,  $d_{\text{free}}$ , CC code rate และ  $n/k$  สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์

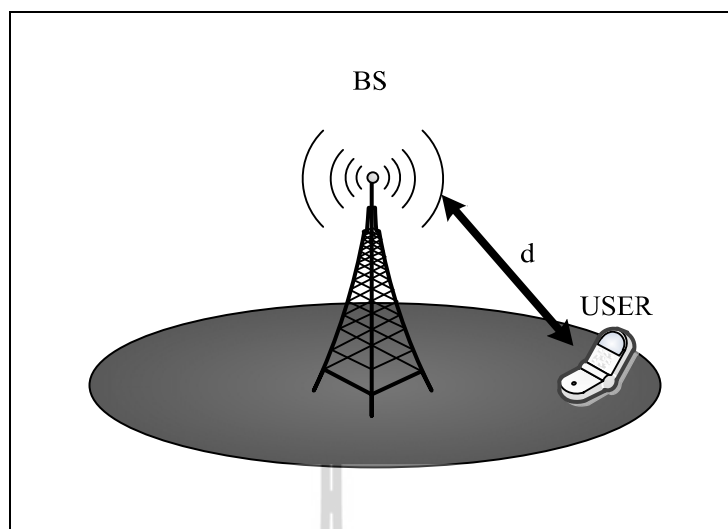
Modulation	$d_{\min}$	$d_{\text{free}}$	CC Code Rate	$n/k$
BPSK 1/2	1	10	1/2	12/12
QPSK 1/2	9	6	2/3	32/24
QPSK 3/4	5	4	5/6	40/36
16-QAM 1/2	17	6	2/3	64/48
16-QAM 3/4	9	4	5/6	64/48
64-QAM 2/3	13	5	3/4	108/96
64-QAM 3/4	13	4	5/6	108/96

### 3.3 สมการที่ใช้คำนวณค่า BER ที่แปรผันตามระยะทาง

#### 3.3.1 สมการสำหรับการติดต่อสื่อสารแบบไม่มีสถานีถ่ายทอด

จากชุดสมการข้างต้นที่กล่าวไปแล้วนั้น เราได้ทำการประยุกต์ชุดสมการเพื่อใช้ในการคำนวณค่า BER ที่แปรผันตามระยะทาง สำหรับแต่ละการมอดูเลชัน เพื่อใช้ในการคำนวณค่า BER ที่ระยะทางต่าง ๆ ได้ เพื่อให้เป็นการง่ายในการคำนวณเบื้องต้น ในการหาพื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์โดยใช้ค่า BER เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ

ซึ่งสมการที่ใช้คำนวณค่า BER ที่แปรผันกับระยะทางนี้ เราได้ทำการประยุกต์ตรงส่วนของค่า SNR จากชุดสมการข้างต้น โดยใช้ค่ากำลังงานส่งของสัญญาณต่ออัตราการผลิตทอน มาแทนที่ค่าของ SNR เพื่อให้สมการมีส่วนประกอบของ BER และระยะทาง โดยมีรูปแบบในการติดต่อสื่อสารดังสมการที่ 3.11 และมีรูปแบบสมการสำหรับแต่ละการมอดูเลชันแสดงได้ตามตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.1 รูปแบบการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับผู้ใช้บริการ

$$P_b = P_b(\text{BS to user}) \quad (3.11)$$

จากตารางที่ 3.4 เราพิจารณาว่าการมอดูเลชันแบบ BPSK

$$P_b = Q(\sqrt{2 \times SNR}) \quad (3.12)$$

เนื่องจาก SNR คืออัตราส่วนระหว่างกำลังงานในการส่งกับกำลังงานของสัญญาณรบกวน ดังนั้นจะได้

$$P_b = Q\left(\sqrt{2 \times \frac{P_{\text{transmit}}}{P_{\text{noise}}}}\right) \quad (3.13)$$

ในที่นี้มีอยู่สองส่วนที่พิจารณาคือ สัญญาณรบกวน ( $P_N$ ) และ Path Loss ( $P_{PL}$ ) ดังนั้นจะได้

$$P_b = Q\left(\sqrt{2 \times \frac{P_{\text{transmit}}}{P_N P_{PL}}}\right) \quad (3.14)$$

โดยในส่วนของ  $P_{PL}$  สำหรับหัวข้อนี้จะใช้ SUI Path Loss จากสมการที่ (2.24) แต่เนื่องจากสมการที่ (2.24) อยู่ในรูปของ dB จึงต้องทำการเปลี่ยนให้เป็น ratio ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$P_{PL} = 10^{\left( A + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10} \quad (3.15)$$

ดังนั้นจะได้สมการแสดงค่า BER ที่แปรผันตามระยะทางสำหรับการมอดูเลชันแบบ BPSK ดังสมการที่ (3.15)

$$P_b = Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{BS}}{P_N 10^{\left( A + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right) \quad (3.16)$$

โดยที่  $P_{BS}$  คือ กำลังงานที่ส่งออกมาจากสถานีฐาน (พิจารณาเฉพาะขาลง)

$d$  คือ ระยะทางระหว่างผู้ใช้บริการกับสถานีฐาน

ตารางที่ 3.5 แสดงสมการ BER ที่แปรผันตามระยะทาง สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์

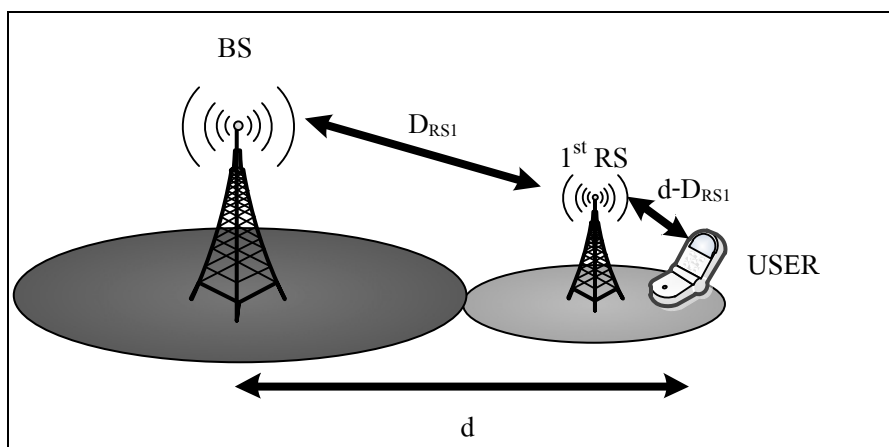
Modulation	BER กับระยะทาง
BPSK 1/2	$P_b = Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{BS}}{P_N 10^{\left( A + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$
QPSK 1/2	$P_b = Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{BS} \times CC}{P_N 10^{\left( A + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$
QPSK 3/4	$P_b = \frac{4}{\log_2 4} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{BS} \times OFDM \times CP \times \log_2 4}{3 P_N 10^{\left( A + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$

ตารางที่ 3.5 แสดงสมการ BER ที่แปรผันตามระยะทาง สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชัน  
ในระบบไวแมกซ์ (ต่อ)

Modulation	BER ที่ระยะทาง
16-QAM 1/2	$P_b = \frac{4}{\log_2 16} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{BS} \times OFDM \times CP \times d_{free} \times \log_2 16}{15 P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}}} \right)$
16-QAM 3/4	$P_b = \frac{4}{\log_2 16} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{BS} \times OFDM \times CP \times d_{free} \times \log_2 16}{15 P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}}} \right)$
64-QAM 2/3	$P_b = \frac{4}{\log_2 64} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{BS} \times CC \times OFDM \times CP \times \log_2 64}{63 P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}}} \right)$
64-QAM 3/4	$P_b = \frac{4}{\log_2 64} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{BS} \times OFDM \times CP \times \log_2 64}{63 P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}}} \right)$

### 3.3.2 สมการสำหรับการติดต่อสื่อสารแบบ 1 สถานีถ่ายทอด

รูปแบบของการติดต่อสื่อสารแบบ 1 สถานีถ่ายทอดนั้น จะมีอยู่ 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกจะเป็นการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับสถานีถ่ายทอดก่อน แล้วขั้นตอนที่สองจึงเป็นการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีถ่ายทอดกับผู้ใช้ โดยจะใช้ Free Space Path Loss สำหรับการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับสถานีถ่ายทอด เนื่องจาก Free Space Path Loss เป็นผลกระทบของการลดทอนของสัญญาณที่ไม่ได้คิดถึง Multipath Fading และ Shadowing ซึ่งเป็นไปตามรูปแบบของการติดต่อสื่อสารกันระหว่างสถานี ส่วนการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีถ่ายทอดกับผู้ใช้งานนั้นจะใช้ SUI Path Loss ที่ให้ผลกระทบของทั้งการลดทอนของสัญญาณ Multipath Fading และ Shadowing ซึ่งเป็นไปตามรูปแบบของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นสำหรับการติดต่อสื่อสารของผู้ใช้บริการกับสถานี ส่วนรูปแบบการทำงานของสถานีฐานที่ใช้พิจารณาสำหรับงานวิจัยนี้จะเป็นแบบ Decode and Forward ซึ่งให้ประสิทธิภาพดีที่สุดในประเภทการทำงานของสถานีถ่ายทอด เนื่องจากมีการแก้ไขบิตที่ผิดพลาดก่อนทำการส่งข้อมูลออกไป ซึ่งมีรูปแบบในการติดต่อสื่อสารดังสมการที่ 3.17 และมีรูปแบบสมการสำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันแสดงได้ตามตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.2 รูปแบบการติดต่อสื่อสารแบบหนึ่งสถานีถ่ายทอด

$$P_b = P_b(BS \text{ to } RS_1) + P_b(RS_1 \text{ to user}) \quad (3.17)$$

พิจารณาที่การมอดูเลชันแบบ BPSK จากสมการที่ (3.16) เมื่อนำมาใส่ในสมการที่ (3.17) จะได้

$$P_b = P_b(BS \text{ to } RS_1) + Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{RS}}{P_N 10^{\left( \frac{A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d-D_{RS1}}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}}} \right) \quad (3.18)$$

ส่วนรูปแบบการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับสถานีถ่ายทอดจะต่างจากการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีกับผู้ใช้บริการตรงส่วนของ Path Loss ดังนั้นจะได้สมการของรูปแบบการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีดังนี้

$$P_b(BS \text{ to } RS_1) = Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{BS}}{P_N 10^{(22.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1} + 20 \log_{10} f) / 10}}} \right) \quad (3.19)$$

เมื่อนำสมการที่ (3.19) แทนในสมการที่ (3.18) จะได้สมการดังนี้

$$P_b = Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{BS}}{P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20 \log_{10} f)/10}}} \right) + Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{RS}}{P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d-D_{RS1}}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right) \quad (3.20)$$

โดยที่  $P_{RS}$  คือ กำลังงานส่งของสถานีถ่ายทอด

$D_{RS1}$  คือ ระยะทางระหว่างสถานีฐานกับสถานีถ่ายทอดสถานีที่ 1

ตารางที่ 3.6 แสดงสมการ BER ที่แปรผันตามระยะทาง แบบ 1 สถานีถ่ายทอด  
สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์

Modulation	BER กับระยะทาง แบบ 1 สถานีถ่ายทอด
BPSK 1/2	$P_b = Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{BS}}{P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20 \log_{10} f)/10}}} \right) + Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{RS}}{P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d-D_{RS1}}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$
QPSK 1/2	$P_b = Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{BS} \times CC}{P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20 \log_{10} f)/10}}} \right) + Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{RS} \times CC}{P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d-D_{RS1}}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$
QPSK 3/4	$P_b = \frac{4}{\log_2 4} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{BS} \times OFDM \times CP \times \log_2 4}{3 P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20 \log_{10} f)/10}}} \right) + \frac{4}{\log_2 4} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{RS} \times OFDM \times CP \times \log_2 4}{3 P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d-D_{RS1}}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$



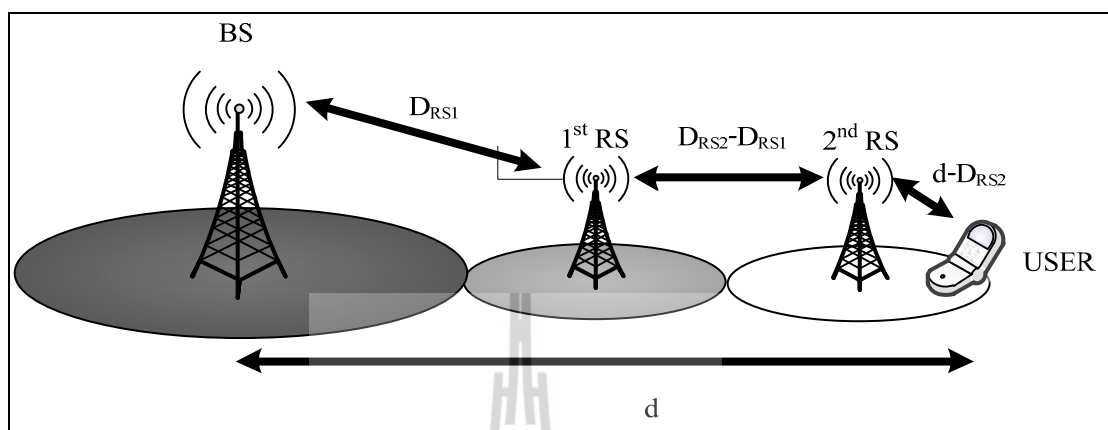
ตารางที่ 3.6 แสดงสมการ BER ที่แปรผันตามระยะทาง แบบ 1 สถานีถ่ายทอด  
สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์ (ต่อ)

16-QAM 1/2	$P_b = \frac{4}{\log_2 16} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{BS} \times OFDM \times CP \times d_{free} \times \log_2 16}{15 P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20 \log_{10} f)/10}}} \right) +$ $\frac{4}{\log_2 16} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{RS} \times OFDM \times CP \times d_{free} \times \log_2 16}{15 P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d-D_{RS1}}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$
16-QAM 3/4	$P_b = \frac{4}{\log_2 16} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{BS} \times OFDM \times CP \times d_{free} \times \log_2 16}{15 P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20 \log_{10} f)/10}}} \right) +$ $\frac{4}{\log_2 16} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{RS} \times OFDM \times CP \times d_{free} \times \log_2 16}{15 P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d-D_{RS1}}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$
64-QAM 2/3	$P_b = \frac{4}{\log_2 64} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{BS} \times CC \times OFDM \times CP \times \log_2 64}{63 P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20 \log_{10} f)/10}}} \right) +$ $\frac{4}{\log_2 64} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{RS} \times CC \times OFDM \times CP \times \log_2 64}{63 P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d-D_{RS1}}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$
64-QAM 3/4	$P_b = \frac{4}{\log_2 64} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{BS} \times OFDM \times CP \times \log_2 64}{63 P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20 \log_{10} f)/10}}} \right) +$ $\frac{4}{\log_2 64} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{RS} \times OFDM \times CP \times \log_2 64}{63 P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d-D_{RS1}}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$

### 3.3.3 สมการสำหรับการติดต่อสื่อสารแบบ 2 สถานีถ่ายทอด

รูปแบบของการติดต่อสื่อสารแบบ 2 สถานีถ่ายทอดนั้น จะมีอยู่ 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกจะเป็นการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับสถานีถ่ายทอดก่อน ต่อมาขั้นตอนที่สองเป็นการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด แล้วในขั้นตอนที่สามจึงเป็นการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีถ่ายทอดกับผู้ใช้บริการ โดยจะใช้ Free Space Path Loss สำหรับการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับสถานีถ่ายทอด และการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีถ่ายทอดกับสถานีถ่ายทอด ส่วนการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีถ่ายทอดกับผู้ใช้งานนั้นจะใช้ SUI Path Loss

ซึ่งมีรูปแบบในการติดต่อสื่อสารดังสมการที่ 3.21 และมีรูปแบบสมการสำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันแสดงได้ตามตารางที่ 3.7



รูปที่ 3.3 รูปแบบการติดต่อสื่อสารแบบสองสถานีถ่ายทอด

$$P_b = P_b (BS \text{ to } RS_1) + P_b (RS_1 \text{ to } RS_2) + P_b (RS_2 \text{ to user}) \quad (3.21)$$

พิจารณาที่การมอดูเลชันแบบ BPSK จากสมการที่ (3.16) เมื่อนำมาใส่ในสมการที่ (3.21) จะได้

$$P_b = P_b (BS \text{ to } RS_1) + P_b (RS_1 \text{ to } RS_2) + Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{RS_2}}{P_N 10^{\left( A + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{|d - D_{RS_2}|}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}}} \right) \quad (3.22)$$

ส่วนรูปแบบการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีฐานกับสถานีถ่ายทอดจะต่างจากการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีกับผู้ใช้บริการตรงส่วนของ Path Loss ดังนั้นจะได้สมการของรูปแบบการติดต่อสื่อสารระหว่างสถานีดังนี้

$$P_b(BS \text{ to } RS_1) = Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{BS}}{P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20 \log_{10} f)/10}}} \right) \quad (3.23)$$

$$P_b(RS_1 \text{ to } RS_2) = Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{RS1}}{P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10}(D_{RS2}-D_{RS1})+20 \log_{10} f)/10}}} \right) \quad (3.24)$$

โดยที่  $P_{RS_1}$  คือ กำลังงานส่งของสถานีถ่ายทอดสถานีที่ 1

$P_{RS_2}$  คือ กำลังงานส่งของสถานีถ่ายทอดสถานีที่ 2

$D_{RS_2}$  คือ ระยะทางระหว่างสถานีฐานกับสถานีถ่ายทอดสถานีที่ 2

เมื่อนำสมการที่ (3.23) และ (3.24) แทนในสมการที่ (3.22) จะได้สมการดังนี้

$$P_b = Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{BS}}{P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20 \log_{10} f)/10}}} \right) + Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{RS1}}{P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10}(D_{RS2}-D_{RS1})+20 \log_{10} f)/10}}} \right) + Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{RS2}}{P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{|d-D_{RS2}|}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right) \quad (3.23)$$

ตารางที่ 3.7 แสดงสมการ BER ที่แปรผันตามระยะทาง แบบ 2 สถานีถ่ายทอด  
สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์

Modulation	BER กับระยะทาง แบบ 2 สถานีถ่ายทอด
BPSK 1/2	$P_b = Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{BS}}{P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20\log_{10} f)/10}}} \right) +$ $Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{RS1}}{P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10}(D_{RS2}-D_{RS1})+20\log_{10} f)/10}}} \right) +$ $Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{RS2}}{P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d-D_{RS2}}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$
QPSK 1/2	$P_b = Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{BS} \times CC}{P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20\log_{10} f)/10}}} \right) +$ $Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{RS1} \times CC}{P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10}(D_{RS2}-D_{RS1})+20\log_{10} f)/10}}} \right) +$ $Q \left( \sqrt{\frac{2 \times P_{RS2} \times CC}{P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d-D_{RS2}}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$
QPSK 3/4	$P_b = \frac{4}{\log_2 4} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{BS} \times OFDM \times CP \times \log_2 4}{3 P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20\log_{10} f)/10}}} \right) +$ $\frac{4}{\log_2 4} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{RS1} \times OFDM \times CP \times \log_2 4}{3 P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10}(D_{RS2}-D_{RS1})+20\log_{10} f)/10}}} \right) +$ $\frac{4}{\log_2 4} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{RS2} \times OFDM \times CP \times \log_2 4}{3 P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d-D_{RS2}}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$
16-QAM 1/2	$P_b = \frac{4}{\log_2 16} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{BS} \times OFDM \times CP \times d_{free} \times \log_2 16}{15 P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20\log_{10} f)/10}}} \right) +$ $\frac{4}{\log_2 16} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{RS1} \times OFDM \times CP \times d_{free} \times \log_2 16}{15 P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10}(D_{RS2}-D_{RS1})+20\log_{10} f)/10}}} \right) +$ $\frac{4}{\log_2 16} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{RS2} \times OFDM \times CP \times d_{free} \times \log_2 16}{15 P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d-D_{RS2}}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$

ตารางที่ 3.7 แสดงสมการ BER ที่แปรผันตามระยะทาง แบบ 2 สถานีถ่ายทอด  
สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์ (ต่อ)

16-QAM 3/4	$P_b = \frac{4}{\log_2 16} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{BS} \times OFDM \times CP \times d_{free} \times \log_2 16}{15 P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20 \log_{10} f)/10}}} \right) +$ $\frac{4}{\log_2 16} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{RS1} \times OFDM \times CP \times d_{free} \times \log_2 16}{15 P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} (D_{RS2}-D_{RS1})+20 \log_{10} f)/10}}} \right) +$ $\frac{4}{\log_2 16} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{RS2} \times OFDM \times CP \times d_{free} \times \log_2 16}{15 P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{ d-D_{RS2} }{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$
64-QAM 2/3	$P_b = \frac{4}{\log_2 64} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{BS} \times CC \times OFDM \times CP \times \log_2 64}{63 P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20 \log_{10} f)/10}}} \right) +$ $\frac{4}{\log_2 64} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{RS1} \times CC \times OFDM \times CP \times \log_2 64}{63 P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} (D_{RS2}-D_{RS1})+20 \log_{10} f)/10}}} \right) +$ $\frac{4}{\log_2 64} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{RS2} \times CC \times OFDM \times CP \times \log_2 64}{63 P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{ d-D_{RS2} }{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$
64-QAM 3/4	$P_b = \frac{4}{\log_2 64} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{BS} \times OFDM \times CP \times \log_2 64}{63 P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} D_{RS1}+20 \log_{10} f)/10}}} \right) +$ $\frac{4}{\log_2 64} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{RS1} \times OFDM \times CP \times \log_2 64}{63 P_N 10^{(32.4+20\gamma \log_{10} (D_{RS2}-D_{RS1})+20 \log_{10} f)/10}}} \right) +$ $\frac{4}{\log_2 64} Q \left( \sqrt{\frac{3 \times P_{RS2} \times OFDM \times CP \times \log_2 64}{63 P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{ d-D_{RS2} }{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \right)$

### 3.4 สรุปเนื้อหาในบทที่ 3

เนื้อหาที่ได้กล่าวในบทนี้ จะเป็นการอธิบายถึงผลกระทบที่เกิดขึ้นกับกระบวนการต่าง ๆ ของระบบไวแมกซ์ในชั้นกายภาพ โดยแสดงอยู่ในรูปสมการทางคณิตศาสตร์ของค่า BER ที่แปรผันตามค่า SNR และกล่าวถึงสมการทางคณิตศาสตร์ในการหาค่า BER ที่แปรผันกับระยะทาง สำหรับแต่ละรูปแบบการเข้ารหัสและการมอดูเลชันของระบบไวแมกซ์ ทั้งแบบที่ไม่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดและแบบที่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอด 1 สถานีและ 2 สถานี

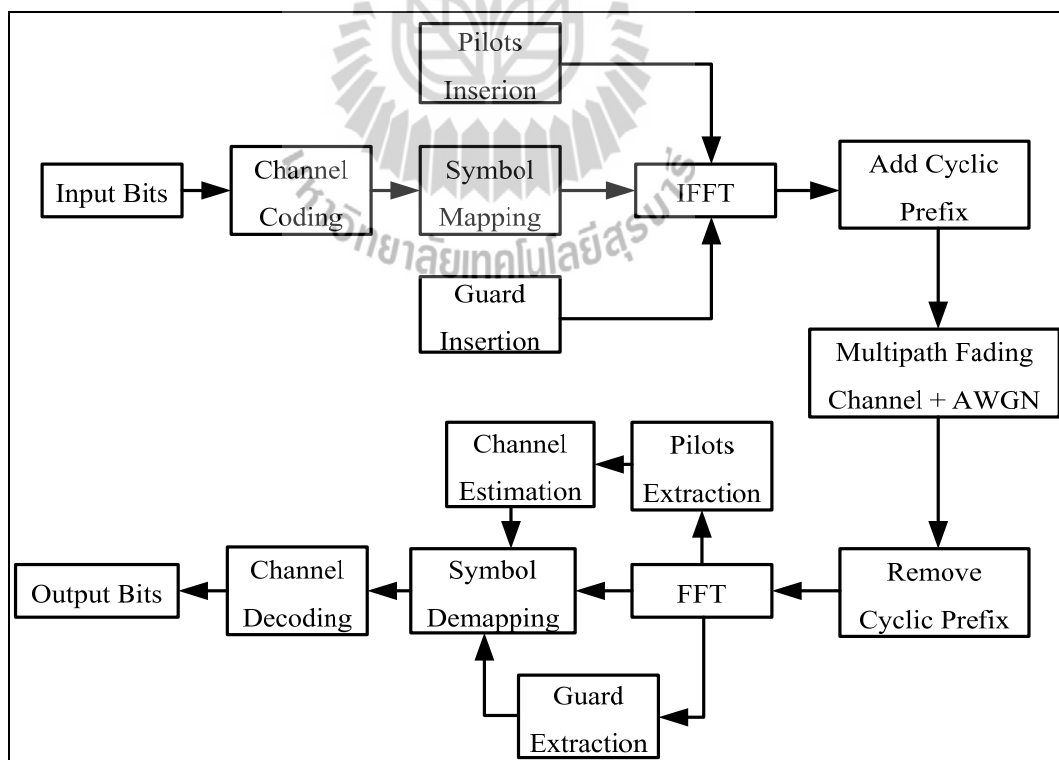
## บทที่ 4

### วิเคราะห์ผลการติดตั้งสถานีถ่ายทอด

เนื้อหาบทนี้จะเป็นการแสดงผลของการทดลอง โดยจะเป็นการจำลองแบบระบบไวแมกซ์ ด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งได้มีส่วนการจำลองแบบระบบไวแมกซ์ การเปรียบเทียบผลของสมการที่ได้ออกแบบกับการจำลองแบบระบบไวแมกซ์ พื้นที่ครอบคลุมที่ได้เมื่อพิจารณาโดยใช้ AMC และ BER พื้นที่ครอบคลุมที่ได้เมื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดเมื่อพิจารณาที่ค่า BER ต่าง ๆ

#### 4.1 การจำลองแบบระบบไวแมกซ์

เป็นการใช้โปรแกรม MATLAB ในการจำลองแบบระบบไวแมกซ์ โดยมีขั้นตอนตามบล็อกไดอะแกรมดังนี้



รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานในชั้นกายภาพของระบบไวแมกซ์



แบบจำลองในระบบไวแมกซ์ในชั้นกายภาพ มีกระบวนการต่าง ๆ มากมาย ซึ่งตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในแบบจำลอง มีการกำหนดค่าดังนี้

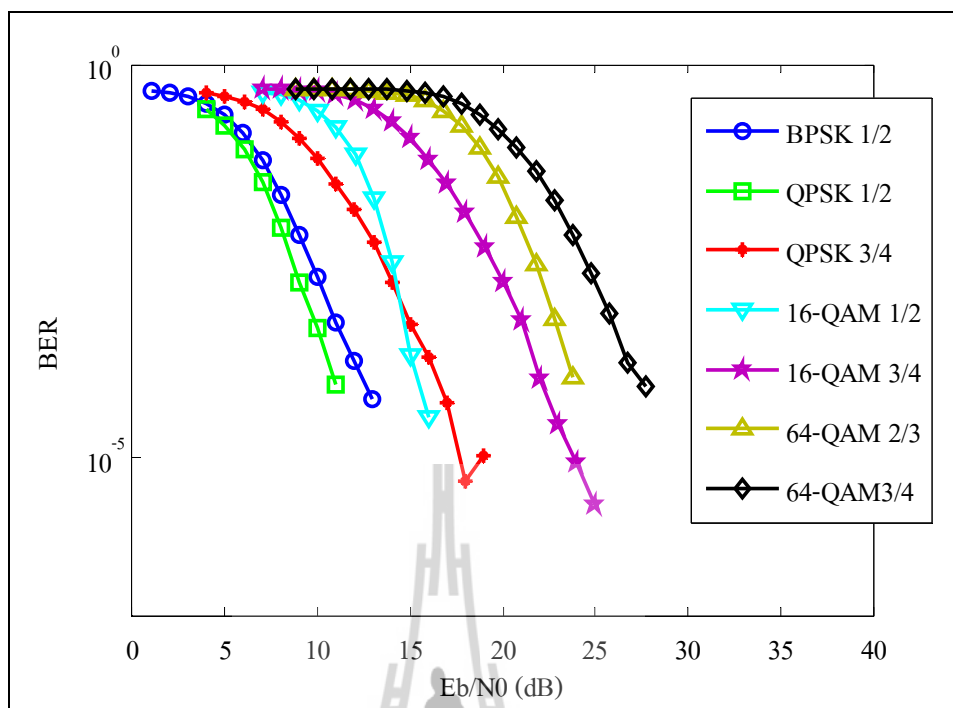
ตารางที่ 4.2 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับแบบจำลองของระบบไวแมกซ์

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
ความถี่	2.5 GHz
ความสูงสถานีฐาน	80 เมตร
ความสูงสถานีถ่ายทอด	30 เมตร
ความสูงของผู้ใช้บริการ	2 เมตร
แบนด์วิดท์	5 MHz
ขนาด OFDM	256 OFDM
CP	1/4
กำลังส่งสถานีฐาน	40 W (46dBm)
กำลังส่งสถานีถ่ายทอด	4 W (36dBm)
ช่องสัญญาณ	Rayleigh Channel (SUI-3)

โดยผลของการทดลองที่ได้จากการจำลองระบบไวแมกซ์ ที่แสดงให้เห็นถึง BER ที่แปรผันกับ  $E_b/N_0$  สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชัน แสดงได้ดังรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทนต่อสัญญาณรบกวนของแต่ละรูปแบบการเข้ารหัสและการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์ โดยรูปแบบการเข้ารหัสที่มีอัตราเร็วที่ต่ำจะสามารถทนต่อสัญญาณรบกวนได้ดีกว่ารูปแบบการเข้ารหัสที่มีอัตราเร็วที่สูง และในทำนองเดียว รูปแบบการมอดูเลชันที่มีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ที่น้อยจะสามารถทนต่อสัญญาณรบกวนได้ดีกว่ารูปแบบการมอดูเลชันที่มีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ที่มาก

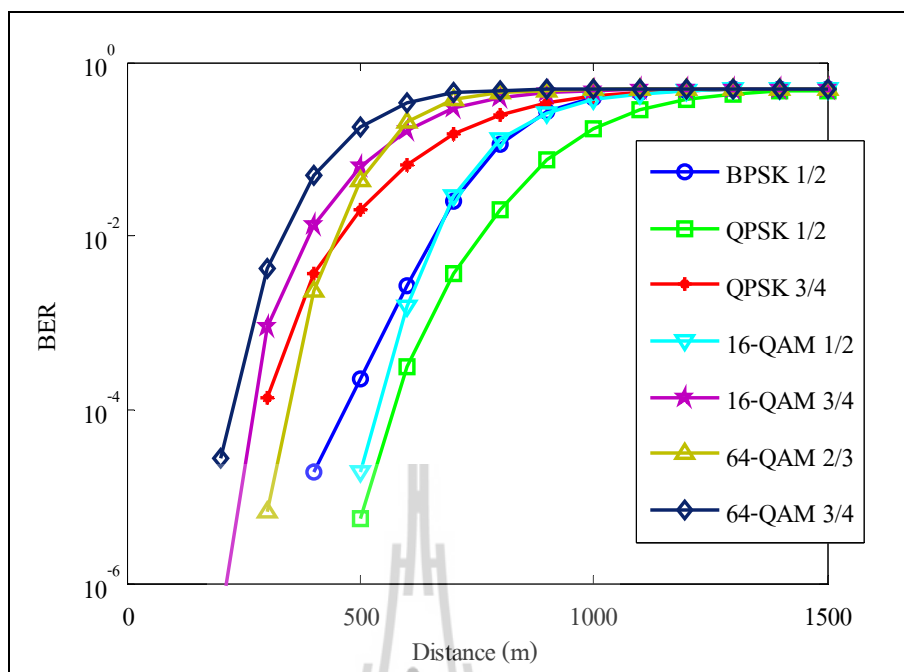




รูปที่ 4.2 แบบจำลอง BER vs  $E_b/N_0$  สำหรับทุกรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์

#### 4.2 การจำลองแบบระบบไวแมกซ์ โดยเปรียบเทียบกับระยะทาง

ในส่วนนี้เป็นการจำลองแบบระบบไวแมกซ์ ที่แสดงให้เห็นถึง BER ที่แปรผันกับระยะทาง ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของระยะทางที่มีต่อค่า BER สำหรับระบบไวแมกซ์ว่าเป็นอย่างไร ซึ่งได้แบ่งตามรูปแบบการมอดูเลชันและการเข้ารหัสของระบบไวแมกซ์ และเพื่อให้เป็นการง่ายในการวิเคราะห์ถึงผลกระทบ ซึ่งเป็นการติดต่อสื่อสารกันระหว่างสถานีฐานกับผู้ใช้บริการ จึงใช้ SUI Path Loss (SUI-3) ในการคำนวณหาอัตราการลดทอนของระยะทางที่เกิดขึ้น ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.3

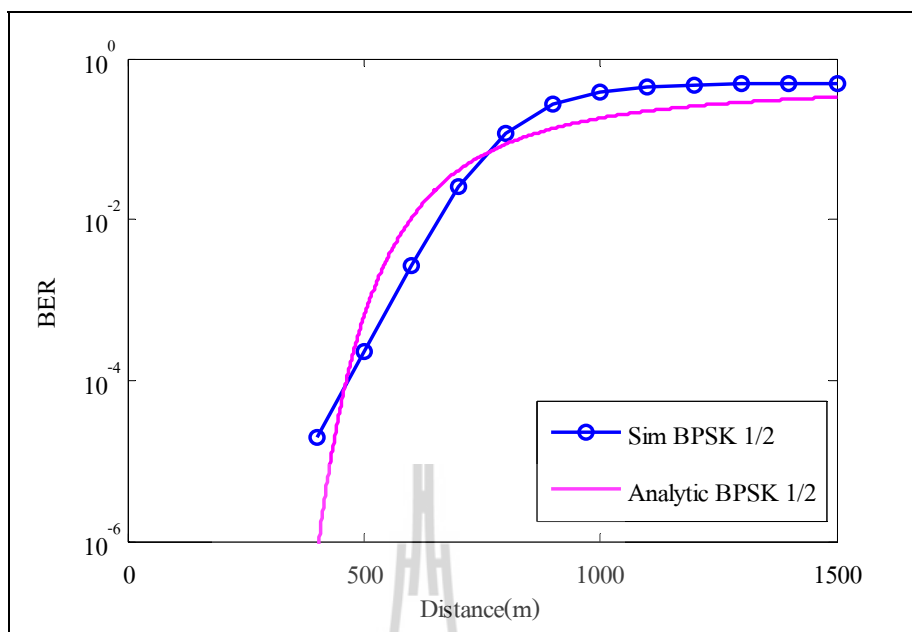


รูปที่ 4.3 แบบจำลอง BER vs Distance สำหรับทุกรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์

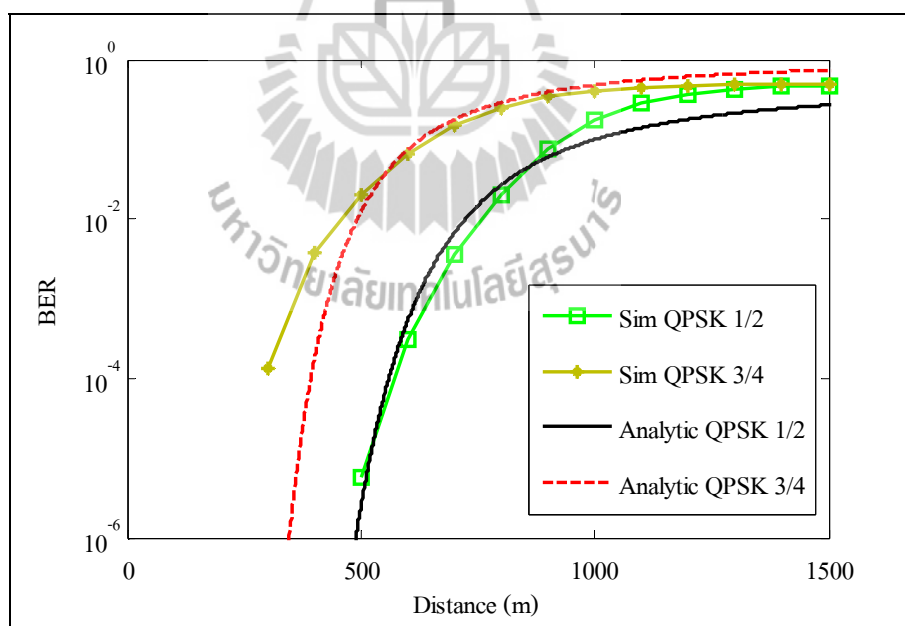
จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงผลกระทบของอัตราการลดทอนสัญญาณที่เกิดขึ้นเนื่องจากระยะทาง โดยเมื่อระยะทางมากขึ้น ก็จะทำให้มีอัตราการลดทอนของสัญญาณเพิ่มสูงขึ้น จึงทำให้มีบิตผิดพลาดมากขึ้นเมื่อระยะทางมากขึ้น จึงทำให้มีค่า BER ที่สูงขึ้น และแต่ละรูปแบบการเข้ารหัสและการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์ ก็จะสามารถทนต่ออัตราการลดทอนของสัญญาณได้ไม่เท่ากัน โดยการเข้ารหัสที่มีอัตราเร็วที่ต่ำจะสามารถทนต่ออัตราการลดทอนของสัญญาณได้ดีกว่ารูปแบบการเข้ารหัสที่มีอัตราเร็วที่สูง และในทำนองเดียวกัน รูปแบบการมอดูเลชันที่มีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ที่น้อย จะสามารถทนต่ออัตราการลดทอนของสัญญาณได้ดีกว่ารูปแบบการมอดูเลชันที่มีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ที่มาก

#### 4.3 การเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองกับผลของสมการคณิตศาสตร์

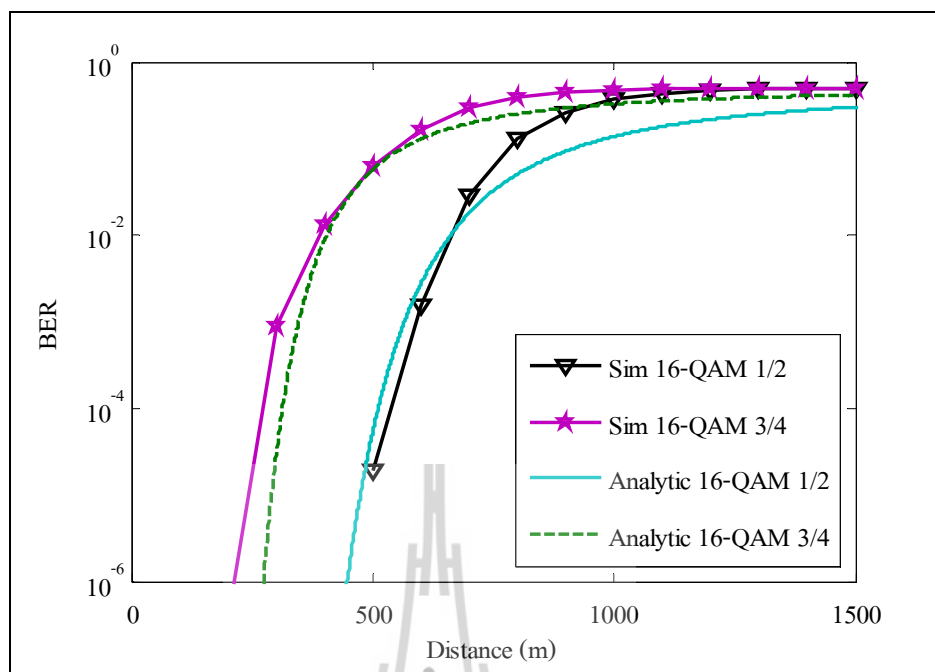
ในส่วนนี้เป็นการเปรียบเทียบผลของแบบจำลองกับผลของสมการคณิตศาสตร์ที่ได้ออกแบบ แสดงให้เห็นผลที่ได้จากสมการว่ามีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองมากน้อยเพียงใดในแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์ ซึ่งผลที่ได้แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.7



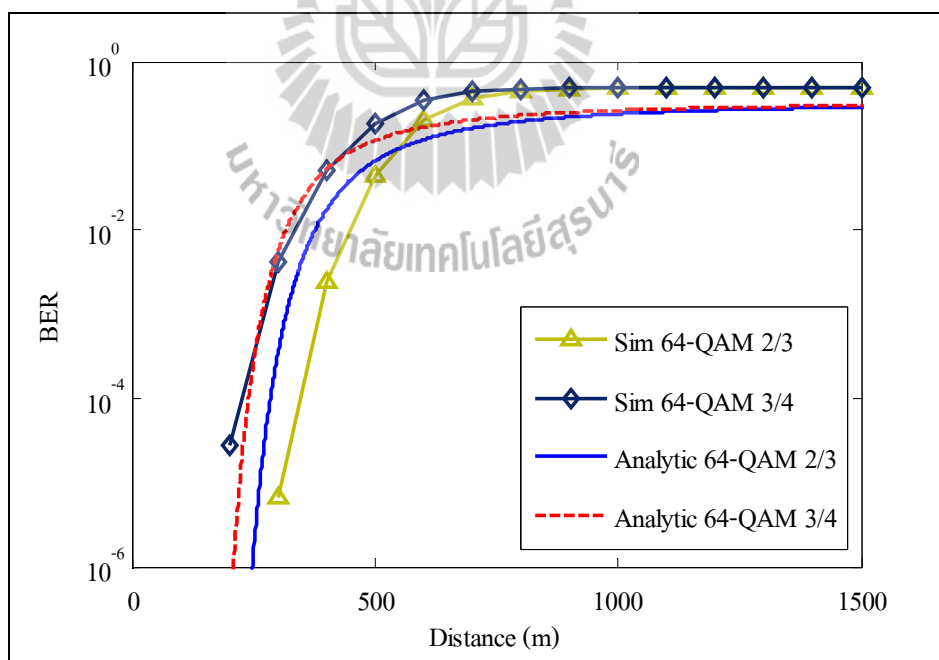
รูปที่ 4.4 Simulation & Analytic Model สำหรับการมอดูเลชั่นแบบ BPSK



รูปที่ 4.5 Simulation & Analytic Model สำหรับการมอดูเลชั่นแบบ QPSK



รูปที่ 4.6 Simulation & Analytic Model สำหรับการมอดูเลชั่นแบบ 16-QAM

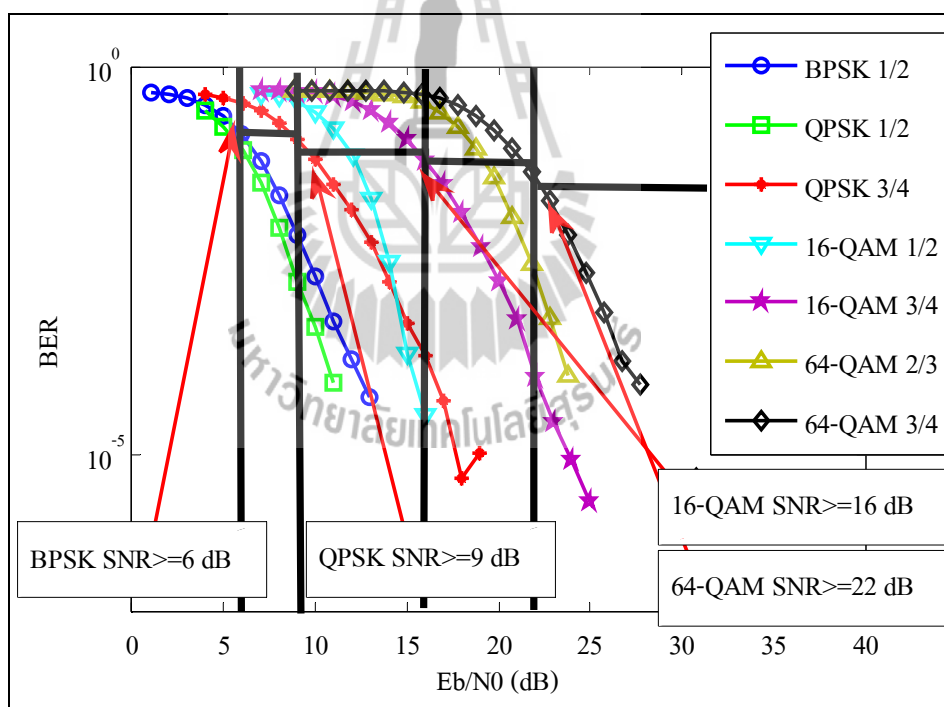


รูปที่ 4.7 Simulation & Analytic Model สำหรับการมอดูเลชั่นแบบ 64-QAM

จากรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.7 แสดงผลของแบบจำลองและผลที่ได้จากสมการที่ได้ทำการ ออกแบบ โดยผลที่ได้มีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งรูปแบบการเข้ารหัสที่มีความเร็วต่ำกว่าจะสามารถ ทนต่ออัตราการลดทอนของสัญญาณได้ดีกว่ารูปแบบการเข้ารหัสที่มีความเร็วสูง และรูปแบบการ มอดูเลชันที่มีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ที่น้อยจะสามารถทนต่ออัตราการลดทอนของสัญญาณ ได้ดีกว่ารูปแบบการมอดูเลชันที่มีจำนวนบิตต่อสัญลักษณ์ที่มาก

#### 4.4 พื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์โดยใช้เทคนิค AMC เป็นตัวพิจารณา

จากรูปที่ 2.21 จะเห็นว่าตามหลักการของ AMC นั้น จะทำการเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลชัน โดยอาศัยค่า SNR เป็นตัวพิจารณา รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงค่า BER ที่ได้จากการใช้ AMC ในการ พิจารณาเพื่อทำการเปลี่ยนรูปแบบในการมอดูเลชันในการติดต่อสื่อสารกันระหว่างสถานีกับ ผู้ใช้บริการ

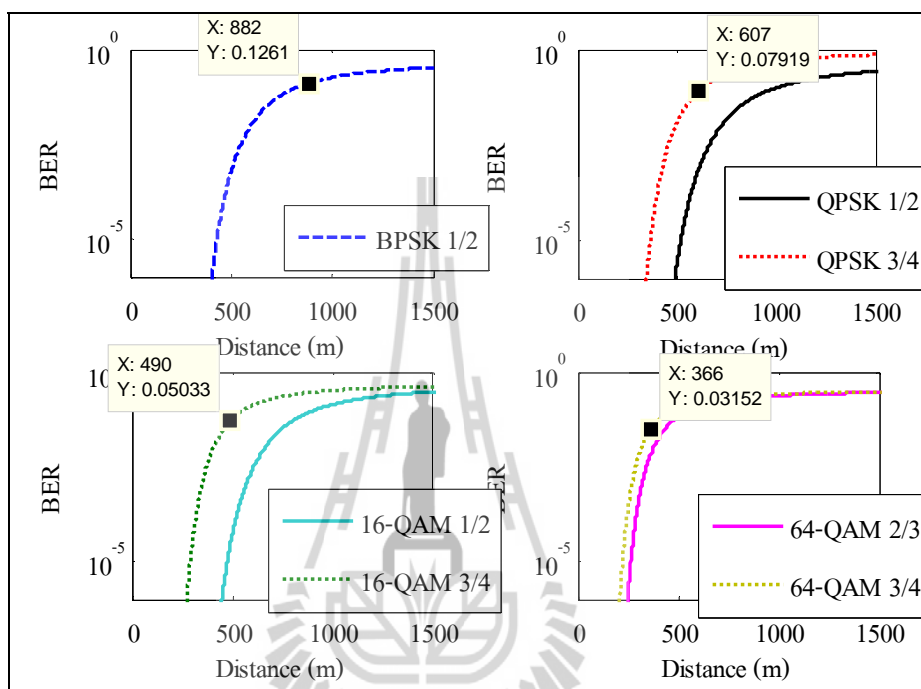


รูปที่ 4.8 ระดับการเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลชันของเทคนิค AMC ในระบบไวแมกซ์

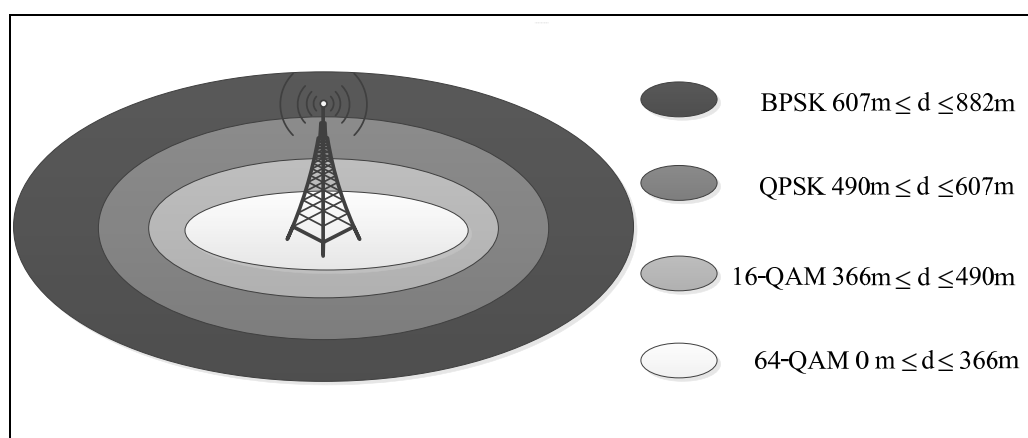
จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการมอดูเลชันแบบ BPSK ที่มีค่า SNR มากกว่าหรือ เท่ากับ 6 dB ซึ่งให้ค่า BER  $10^{-0.9} = 0.1259$  ถัดมาเป็นการมอดูเลชันแบบ QPSK มากกว่าหรือ เท่ากับ SNR 9 dB ให้ค่า BER  $10^{-1.1} = 0.0794$  ถัดมาเป็นการมอดูเลชันแบบ 16-QAM มากกว่าหรือ

เท่ากับ SNR 16 dB ให้ค่า BER  $10^{-1.3} = 0.0501$  และสุดท้ายเป็นการมอดูเลชันแบบ 64-QAM ที่มีค่า SNR มากกว่าหรือเท่ากับ 22 dB ให้ค่า BER  $10^{-1.5} = 0.0316$

จากค่า BER ที่เป็นตัวกำหนดรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์ เราสามารถหาระยะที่ใช้ในการเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลชันได้ตามรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมโดยใช้ AMC เป็นตัวพิจารณา สำหรับการมอดูเลชัน



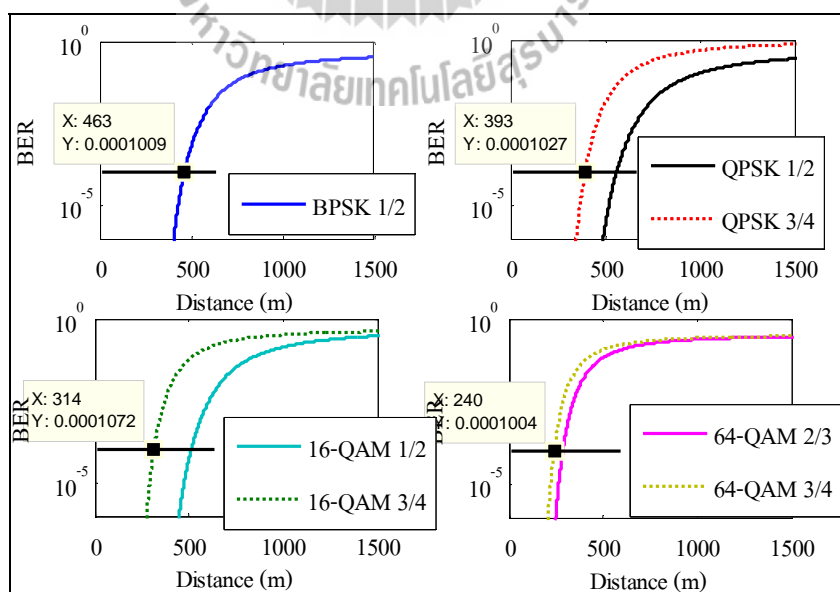
รูปที่ 4.10 แสดงพื้นที่ครอบคลุมสำหรับระบบไวแมกซ์ โดยใช้เทคนิค AMC

รูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10 ได้แสดงให้เห็นถึงระยะหรือรัศมีของพื้นที่ครอบคลุมในแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์ ซึ่งใช้ค่า BER ที่ได้จากการกำหนดค่า SNR ของเทคนิค AMC โดยการมอดูเลชัน BPSK มีรัศมีตั้งแต่ระยะ 607 เมตร ถึง 882 เมตร ต่อไปเป็นการมอดูเลชันแบบ QPSK ซึ่งมีรัศมีตั้งแต่ระยะ 490 เมตร ถึง 607 เมตร ต่อไปการมอดูเลชัน 16-QAM ซึ่งมีรัศมีตั้งแต่ระยะ 366 เมตร ถึง 490 เมตร ลำดับสุดท้ายเป็นการมอดูเลชันแบบ 64-QAM ซึ่งมีรัศมีไม่เกิน 400 เมตร

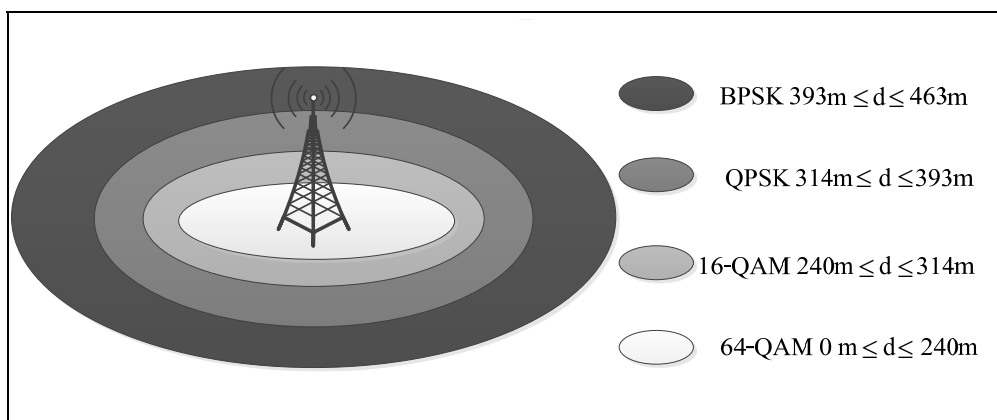
#### 4.5 พื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์โดยใช้ BER $10^{-4}$ เป็นตัวพิจารณา

พื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ ที่ใช้ค่า BER  $10^{-4}$  เป็นตัวพิจารณา ในการหาขอบเขตของพื้นที่ครอบคลุมนั้น สำหรับแต่ละรูปแบบการเข้ารหัสและการมอดูเลชันของระบบไวแมกซ์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.11

จากรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 จะแสดงให้เห็นถึงพื้นที่ครอบคลุมของแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์ โดยใช้ค่า BER เป็นตัวพิจารณาในการเปลี่ยนการมอดูเลชัน โดยการมอดูเลชันแบบ BPSK จะให้พื้นที่ครอบคลุมที่ 280 เมตร ถึง 466 เมตร การมอดูเลชันแบบ QPSK จะให้พื้นที่ครอบคลุมที่ 260 เมตร ถึง 280 เมตร การมอดูเลชันแบบ 16-QAM จะให้พื้นที่ครอบคลุมที่ 225 เมตร ถึง 260 เมตร ส่วนการมอดูเลชันแบบ 64-QAM จะให้พื้นที่ครอบคลุมที่ 0 เมตร ถึง 225 เมตร



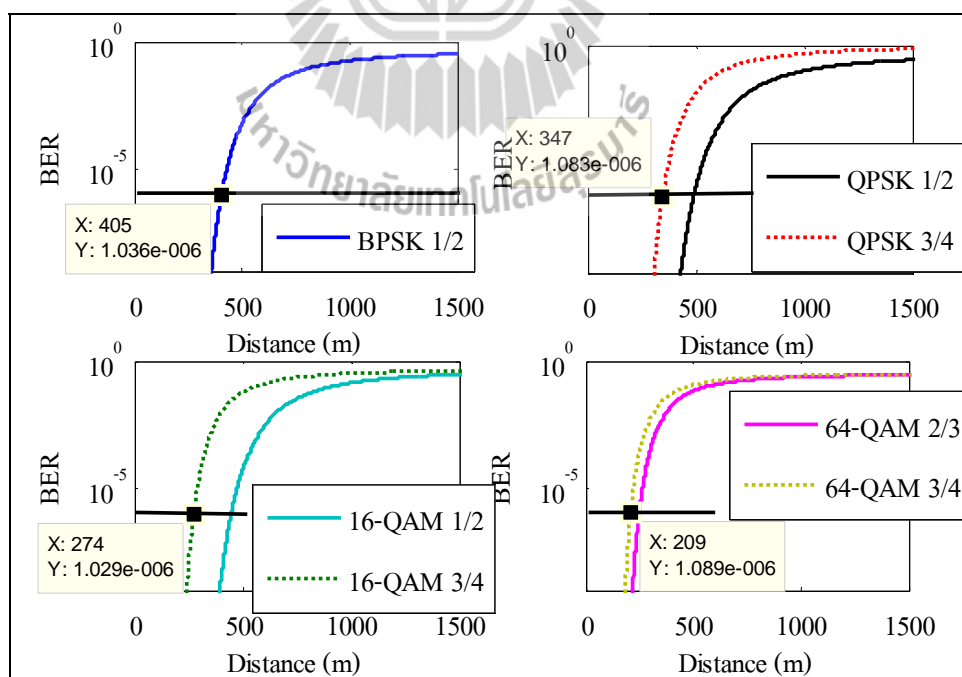
รูปที่ 4.11 แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมโดยใช้ BER  $10^{-4}$  เป็นตัวพิจารณา สำหรับทุกการมอดูเลชัน



รูปที่ 4.12 แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมสำหรับระบบไวแมกซ์ โดยพิจารณาที่ BER  $10^{-4}$

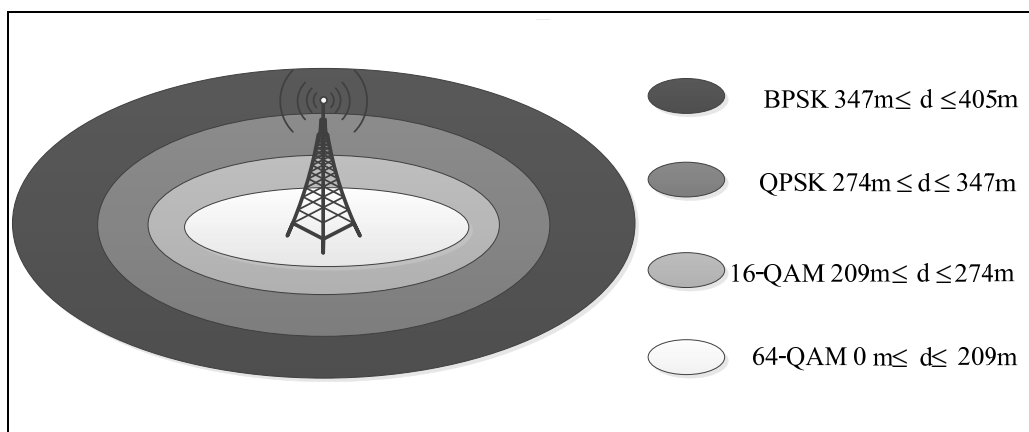
#### 4.6 พื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์โดยใช้ BER $10^{-6}$ เป็นตัวพิจารณา

พื้นที่ครอบคลุมของระบบไวแมกซ์ ที่ใช้ค่า BER  $10^{-6}$  เป็นตัวพิจารณา ในการหาขอบเขตของพื้นที่ครอบคลุมนั้น สำหรับแต่ละรูปแบบการเข้ารหัสและการมอดูเลชั่นของระบบไวแมกซ์ แสดงได้ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมโดยใช้ BER  $10^{-6}$  เป็นตัวพิจารณา สำหรับทุกการมอดูเลชั่น





รูปที่ 4.14 แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมสำหรับระบบไวแมกซ์ โดยพิจารณาที่ BER  $10^{-6}$

จากรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 จะแสดงให้เห็นถึงพื้นที่ครอบคลุมของแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์ โดยใช้ค่า BER เป็นตัวพิจารณาในการเปลี่ยนการมอดูเลชัน โดยการมอดูเลชันแบบ BPSK จะให้พื้นที่ครอบคลุมที่ 347 เมตร ถึง 405 เมตร การมอดูเลชันแบบ QPSK จะให้พื้นที่ครอบคลุมที่ 274 เมตร ถึง 347 เมตร การมอดูเลชันแบบ 16-QAM จะให้พื้นที่ครอบคลุมที่ 209-274 เมตร และการมอดูเลชันแบบ 64-QAM จะให้พื้นที่ครอบคลุมที่ 0 เมตร ถึง 209 เมตร

#### 4.7 การหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดโดยพิจารณา BER ที่ 10<sup>-4</sup>

ในส่วนนี้จะเป็นผลของแบบจำลองและสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดแบบทั้งแบบ 1 สถานี และ 2 สถานี เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลสมรรถนะของระบบไวแมกซ์เมื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด โดยใช้ค่า BER เท่ากับ  $10^{-4}$  เพื่อให้พื้นที่ครอบคลุมของสถานีถ่ายทอดของทั้งสองสถานี มีค่า BER ไม่เกิน  $10^{-4}$  และได้ทำการเปรียบเทียบให้เห็นถึงผลของสมการที่ได้ทำการออกแบบไว้ว่ามีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองมากน้อยเพียงใด โดยได้ทำการแยกวิเคราะห์สำหรับแต่ละการมอดูเลชัน เพื่อเป็นการง่ายในการวิเคราะห์สมรรถนะที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด

และได้ทำการแสดงวิธีการคำนวณหาตำแหน่งของสถานีถ่ายทอด โดยใช้ BER เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ สำหรับการมอดูเลชันแบบ BPSK ดังสมการต่อไปนี้

จากสมการที่ (3.15) การประมาณหาค่าของ Q function จะได้ว่า

$$Q(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad (4.1)$$

ฉะนั้น เมื่อทำการนำค่าประมาณของ Q function มาใช้ในสมการแล้วทำการย้ายข้างสมการ เพื่อให้เป็นการง่ายในการหาตำแหน่งของสถานีถ่ายทอดที่จะให้ค่า BER ตามที่ต้องการได้ดังนี้

$$BER_{target} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{P_{BS}}{P_N 10^{\left(A+10\gamma \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right)+X_f+X_b+s\right)/10}}}\right) \quad (4.2)$$

$$1 - 2BER_{target} = \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{P_{BS}}{P_N 10^{\left(A+10\gamma \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right)+X_f+X_b+s\right)/10}}}\right) \quad (4.3)$$

$$\operatorname{erf}^{-1}(1 - 2BER_{target}) = \sqrt{\frac{P_{BS}}{P_N 10^{\left(A+10\gamma \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right)+X_f+X_b+s\right)/10}}} \quad (4.4)$$

โดย Inverse Error Function ถูกนิยามโดย

$$\operatorname{erf}^{-1}(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c_k}{2k+1} \left(\frac{z\sqrt{\pi}}{2}\right)^{2k+1} \quad (4.5)$$

ซึ่ง  $c = 1$  และ

$$c_k = \sum_{m=0}^{k-1} \frac{c_m c_{k-1-m}}{(m+1)(2m+1)} = \left\{1, 1, \frac{7}{6}, \frac{127}{6}, \dots\right\} \quad (4.6)$$

เพราะฉะนั้นเมื่อนำ (4.5) แทนใน (4.4) จะได้ว่า

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{c_k}{2k+1} \left( \frac{1-2BER_{target} \sqrt{\pi}}{2} \right)^{2k+1} = \sqrt{\frac{P_{BS}}{P_N 10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10}}} \quad (4.7)$$

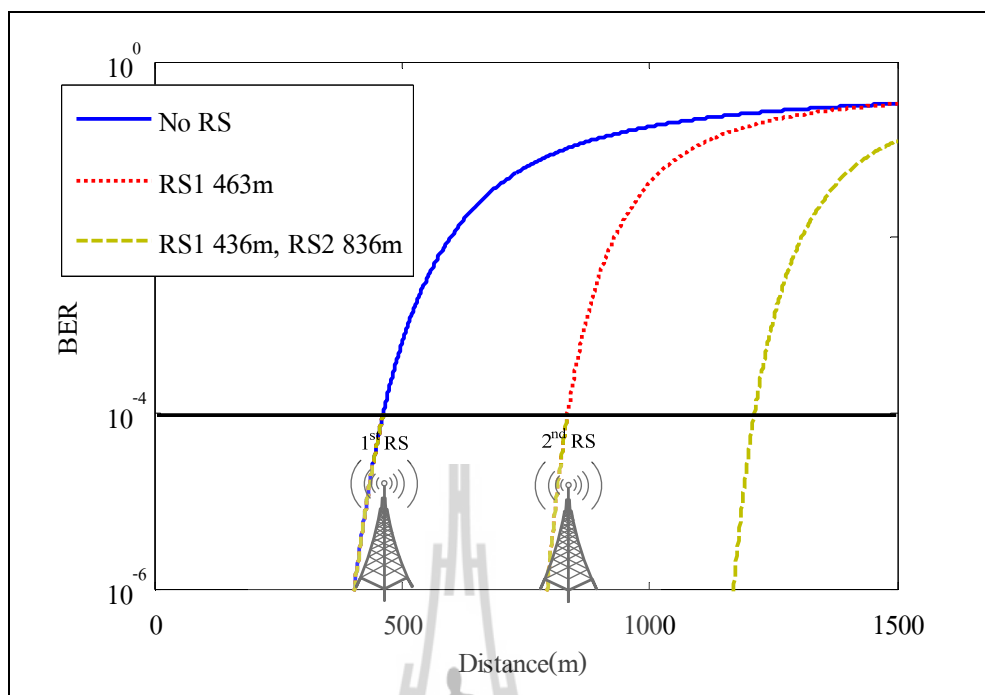
$$10^{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right) / 10} = \frac{P_{BS}}{P_N \left( \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c_k}{2k+1} \left( \frac{1-2BER_{target} \sqrt{\pi}}{2} \right)^{2k+1} \right)^2} \quad (4.8)$$

$$\frac{\left( A+10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_b + s \right)}{10} = \log \frac{P_{BS}}{P_N \left( \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c_k}{2k+1} \left( \frac{1-2BER_{target} \sqrt{\pi}}{2} \right)^{2k+1} \right)^2} \quad (4.9)$$

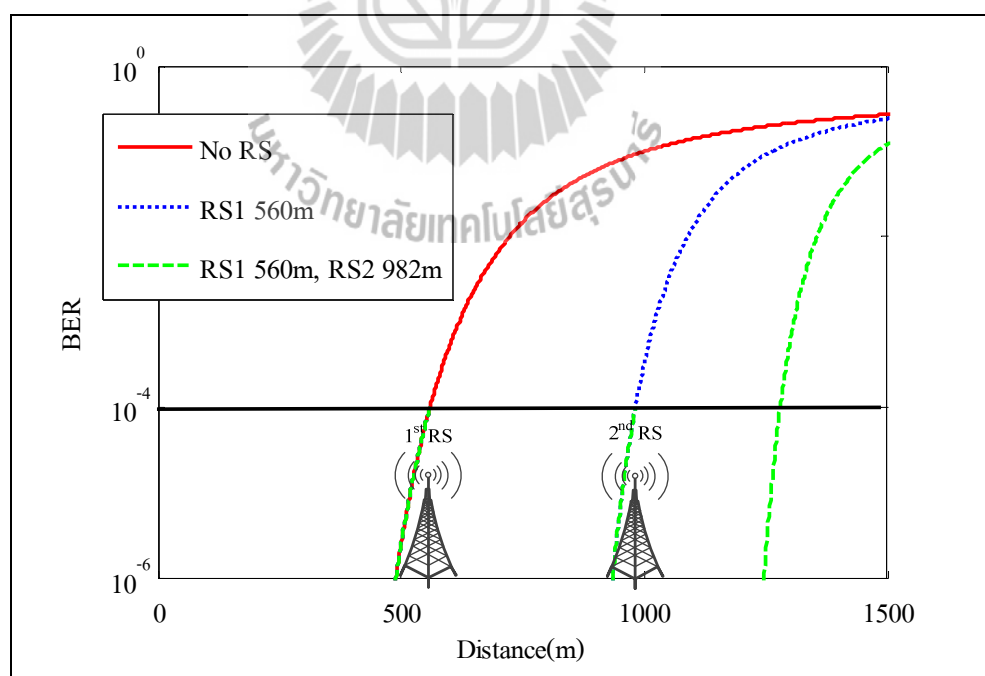
$$10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) = -A - X_f - X_b - s + 10 \log \frac{P_{BS}}{P_N \left( \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c_k}{2k+1} \left( \frac{1-2BER_{target} \sqrt{\pi}}{2} \right)^{2k+1} \right)^2} \quad (4.10)$$

$$d = d_0 10^{\frac{\left( -A - X_f - X_b - s + 10 \log \frac{P_{BS}}{P_N \left( \sum_{k=0}^{\infty} \frac{c_k}{2k+1} \left( \frac{1-2BER_{target} \sqrt{\pi}}{2} \right)^{2k+1} \right)^2} \right)}{10\gamma}} \quad (4.11)$$

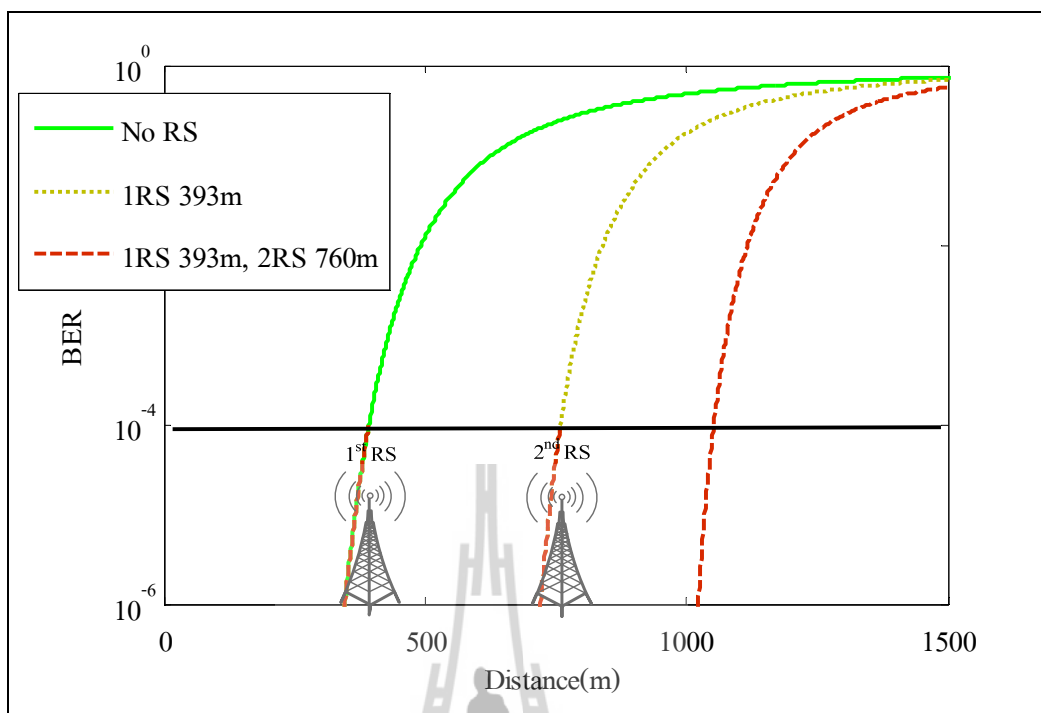
จากตัวอย่างสมการที่ได้ทำการออกแบบนี้ สามารถปรับใช้ได้กับทุกรูปแบบการมอดูเลชันในระบบไวแมกซ์ ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.15 ถึงรูปที่ 4.21



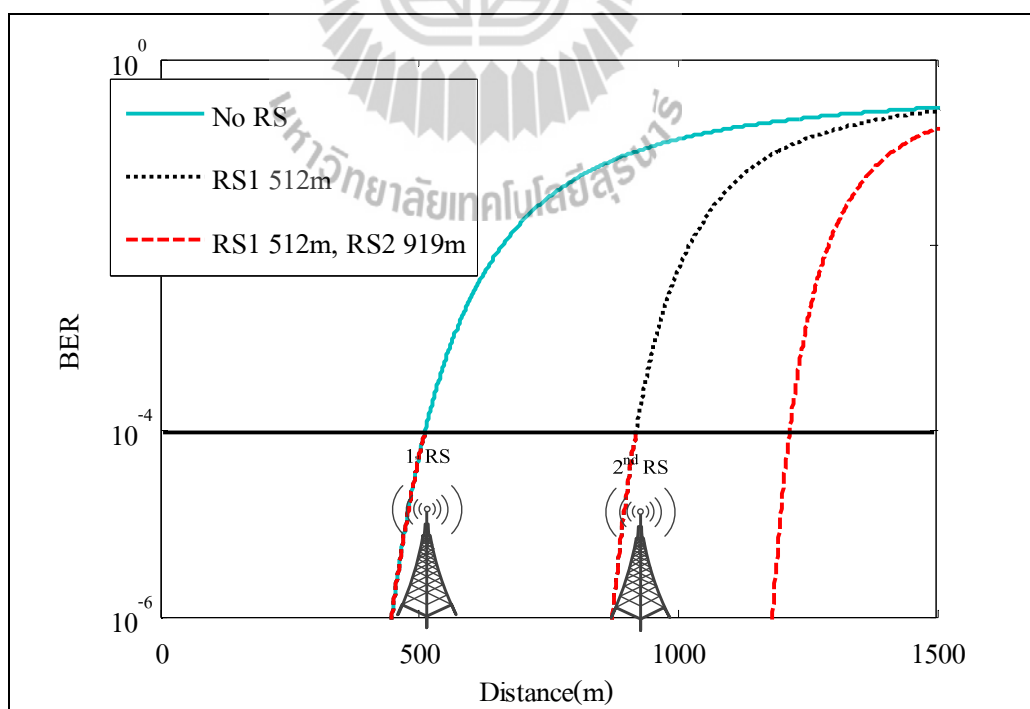
รูปที่ 4.15 รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด BPSK 1/2 พิจารณาที่ BER =  $10^{-4}$



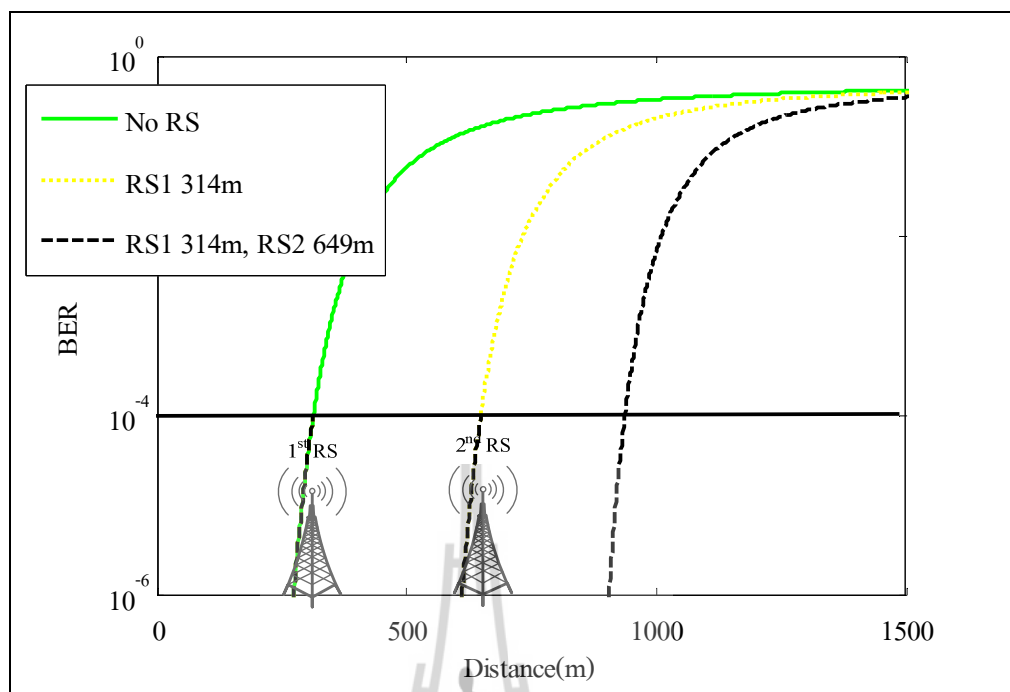
รูปที่ 4.16 รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด QPSK 1/2 พิจารณาที่ BER =  $10^{-4}$



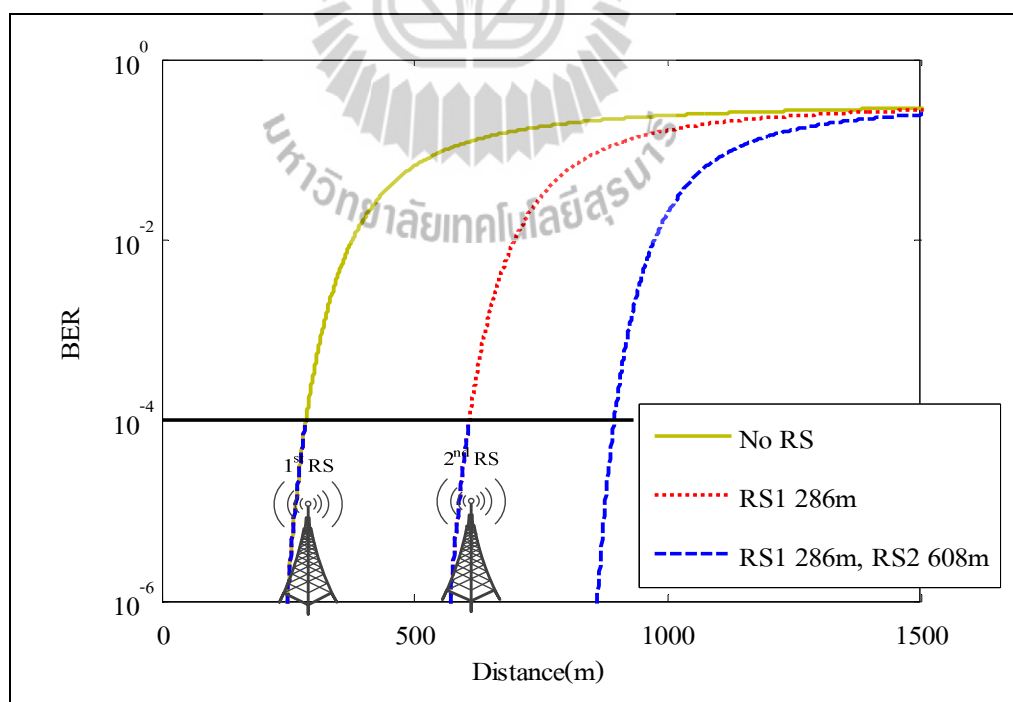
รูปที่ 4.17 รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด QPSK 3/4 พิจารณาที่  $BER = 10^{-4}$



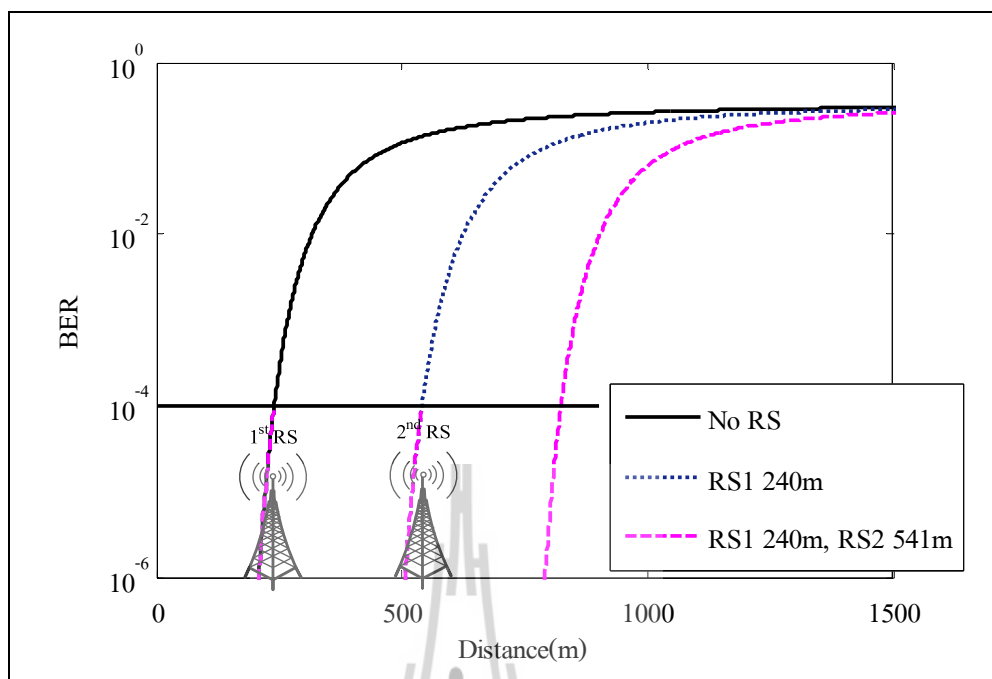
รูปที่ 4.18 รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด 16-QAM 1/2 พิจารณาที่  $BER = 10^{-4}$



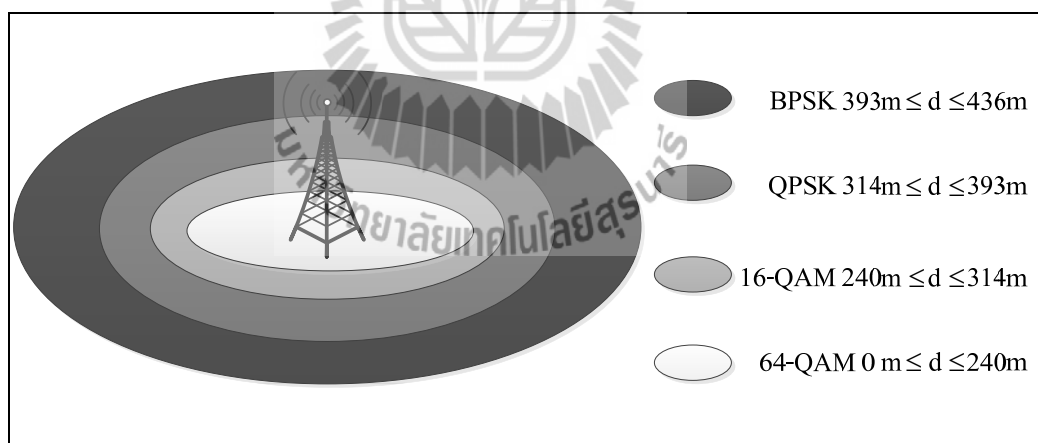
รูปที่ 4.19 รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด 16-QAM 3/4 พิจารณาที่  $BER = 10^{-4}$



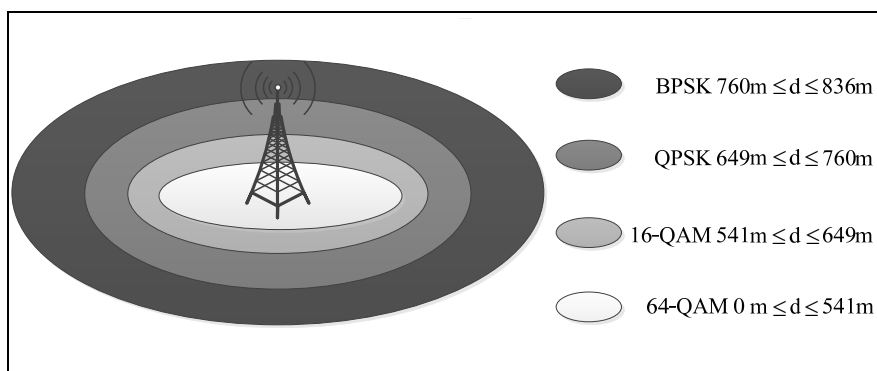
รูปที่ 4.20 รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด 64-QAM 2/3 พิจารณาที่  $BER = 10^{-4}$



รูปที่ 4.21 รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด 64-QAM 3/4 พิจารณาที่  $BER = 10^{-4}$



รูปที่ 4.22 แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมสำหรับระบบไวแมกซ์แบบ 1 สถานีถ่ายทอด โดยพิจารณาที่  $BER 10^{-4}$



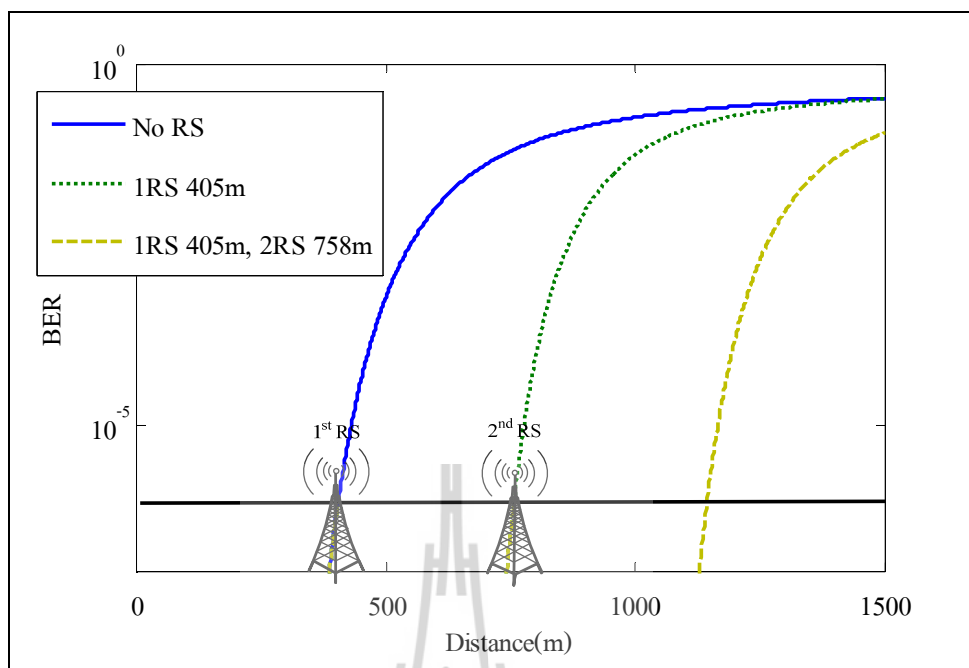
รูปที่ 4.23 แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมสำหรับระบบไวแมกซ์แบบ 2 สถานีถ่ายทอด โดยพิจารณาที่  $BER 10^{-4}$

จากรูปที่ 4.15 ถึงรูปที่ 4.23 แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดและระยะที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด โดยใช้ค่า  $BER 10^{-4}$  เป็นตัวพิจารณา ซึ่งการมอดูเลชันแบบ BPSK 1/2 ติดตั้งสถานีถ่ายทอดสถานีที่หนึ่งที่ระยะ 463 เมตร สถานีที่สองที่ระยะ 836 เมตร การมอดูเลชันแบบ QPSK 1/2 ติดตั้งสถานีถ่ายทอดสถานีที่หนึ่งที่ระยะ 560 เมตร สถานีที่สองที่ระยะ 982 เมตร การมอดูเลชันแบบ QPSK 3/4 ติดตั้งสถานีถ่ายทอดสถานีที่หนึ่งที่ระยะ 393 เมตร สถานีที่สองที่ระยะ 760 เมตร การมอดูเลชันแบบ 16-QAM 1/2 ติดตั้งสถานีถ่ายทอดสถานีที่หนึ่งที่ระยะ 512 เมตร สถานีที่สองที่ระยะ 919 เมตร การมอดูเลชันแบบ 16-QAM 3/4 ติดตั้งสถานีถ่ายทอดสถานีที่หนึ่งที่ระยะ 314 เมตร สถานีที่สองที่ระยะ 649 เมตร การมอดูเลชันแบบ 64-QAM 2/3 ติดตั้งสถานีถ่ายทอดสถานีที่หนึ่งที่ระยะ 286 เมตร สถานีที่สองที่ระยะ 608 เมตร การมอดูเลชันแบบ 64-QAM 3/4 ติดตั้งสถานีถ่ายทอดสถานีที่หนึ่งที่ระยะ 240 เมตร สถานีที่สองที่ระยะ 541 เมตร

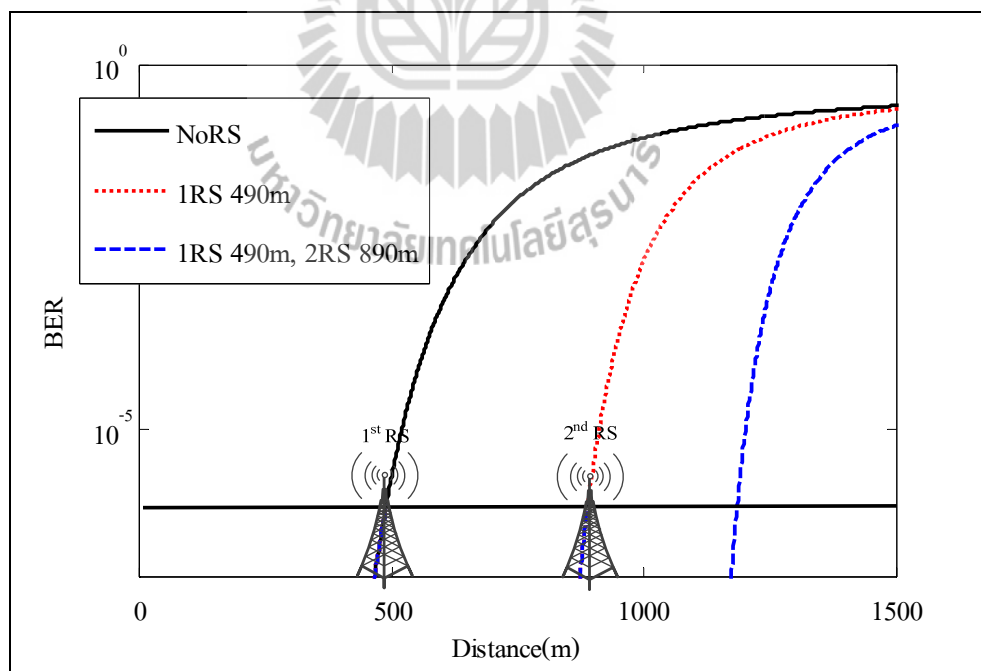
#### 4.8 การหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดโดยพิจารณา $BER$ ที่ $10^{-6}$

ในส่วนนี้จะแสดงผลของแบบจำลองและสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดแบบทั้งแบบ 1 สถานี และ 2 สถานี เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลสมรรถนะของระบบไวแมกซ์เมื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด โดยใช้ค่า  $BER = 10^{-6}$  เพื่อให้พื้นที่ครอบคลุมของสถานีถ่ายทอดของทั้งสองสถานี มีค่า  $BER$  ไม่เกิน  $10^{-6}$  และได้ทำการเปรียบเทียบให้เห็นถึงผลของสมการที่ได้ทำการออกแบบไว้ว่ามีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองมากน้อยเพียงใด โดยได้ทำการแยกวิเคราะห์สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชัน เพื่อเป็นการง่ายในการวิเคราะห์สมรรถนะที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด ซึ่งผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.30

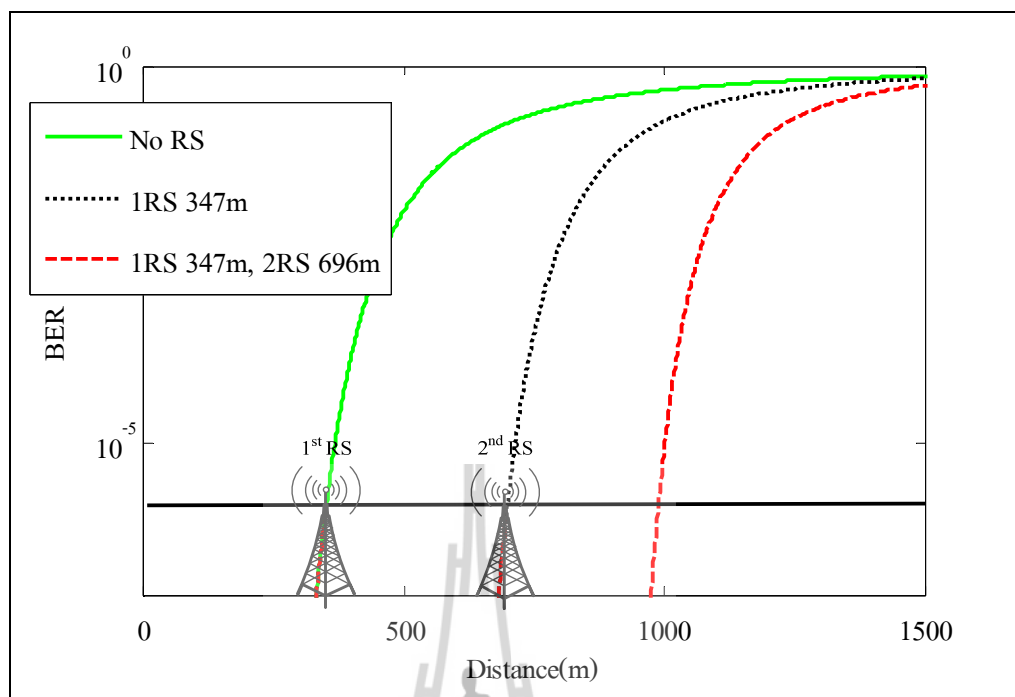




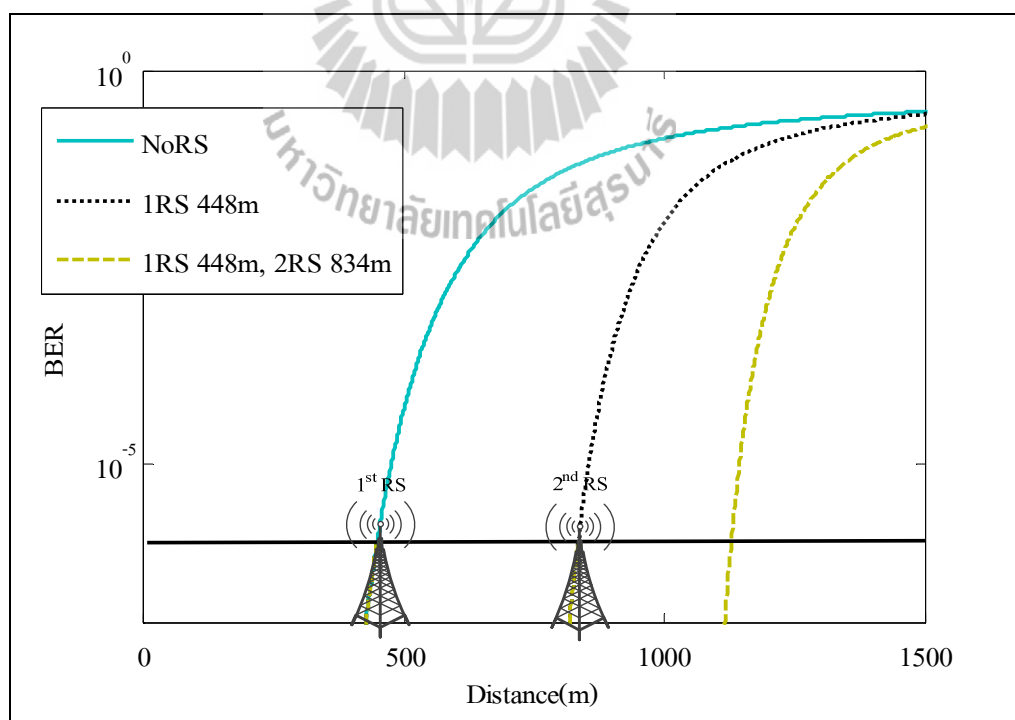
รูปที่ 4.24 รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด BPSK 1/2 พิจารณาที่  $BER = 10^{-6}$



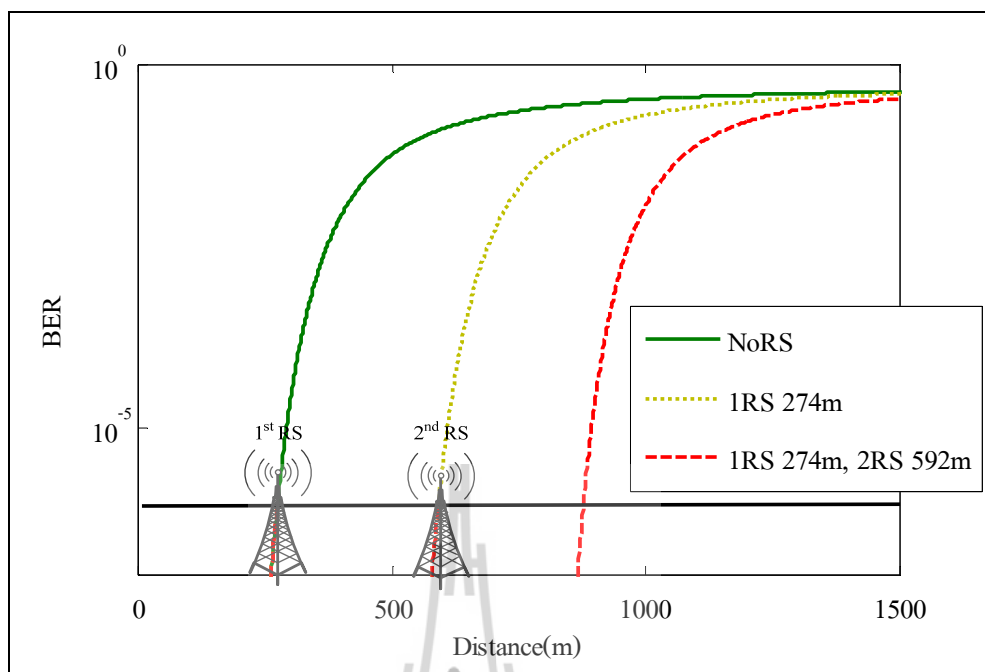
รูปที่ 4.25 รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด QPSK 1/2 พิจารณาที่  $BER = 10^{-6}$



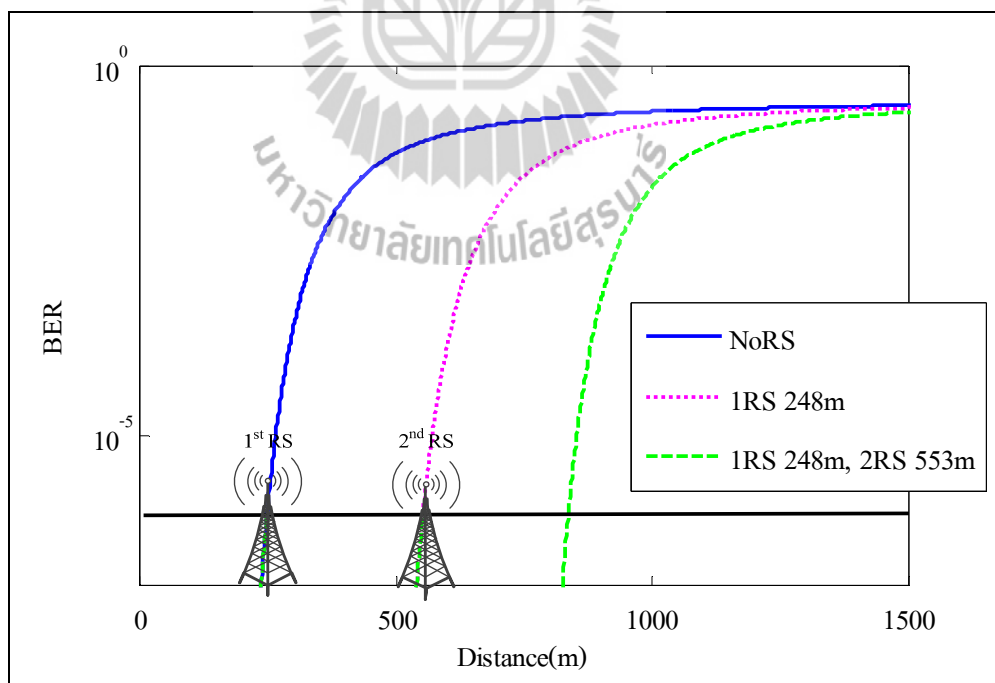
รูปที่ 4.26 รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด QPSK 3/4 พิจารณาที่  $BER = 10^{-6}$



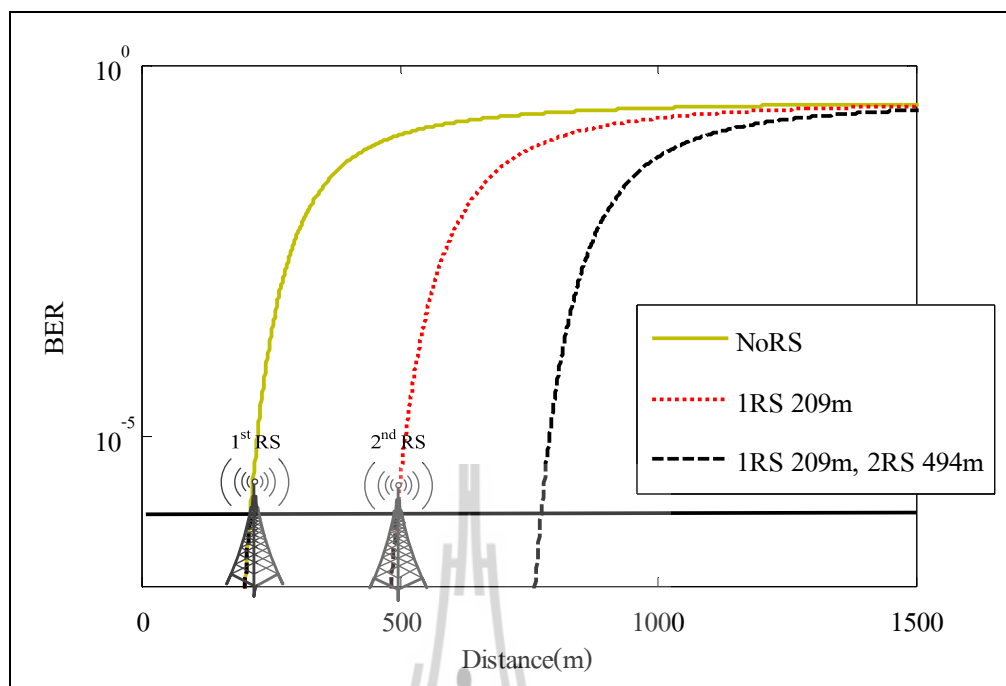
รูปที่ 4.27 รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด 16-QAM 1/2 พิจารณาที่  $BER = 10^{-6}$



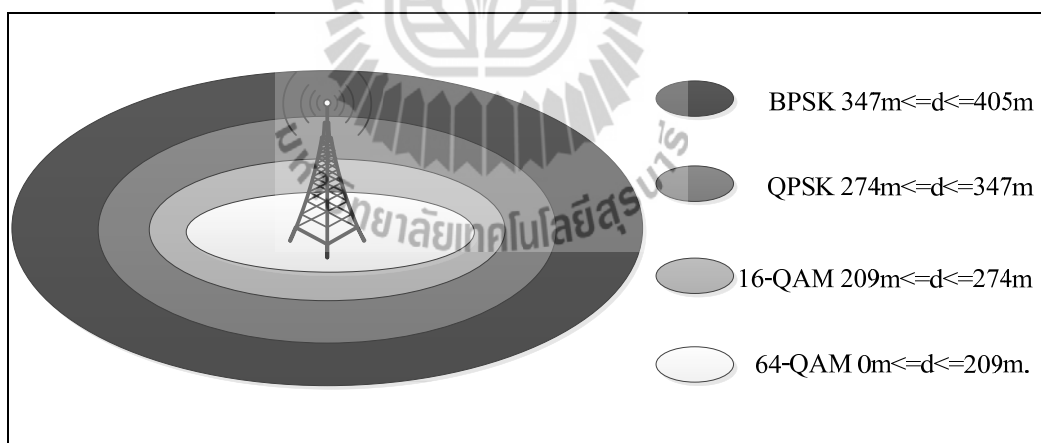
รูปที่ 4.28 รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด 16-QAM 3/4 พิจารณาที่ BER =  $10^{-6}$



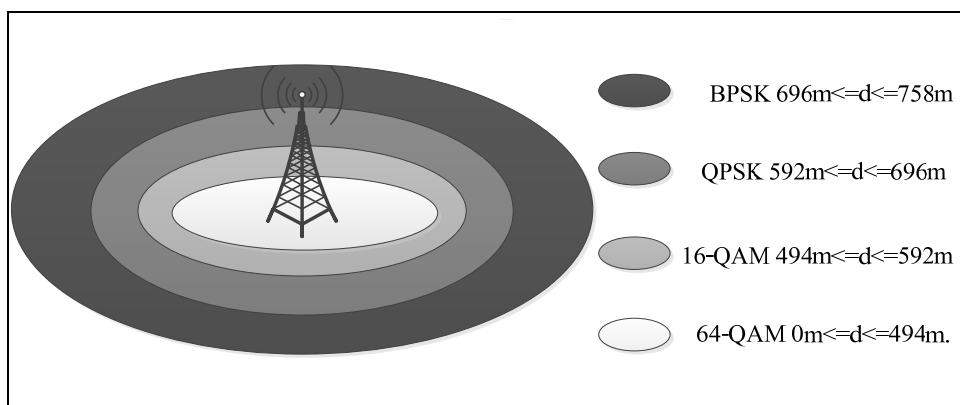
รูปที่ 4.29 รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด 64-QAM 2/3 พิจารณาที่ BER =  $10^{-6}$



รูปที่ 4.30 รัศมีของ 1 และ 2 สถานีถ่ายทอด 64-QAM 3/4 พิจารณาที่  $BER = 10^{-6}$



รูปที่ 4.31 แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมสำหรับระบบไวแมกซ์แบบ 1 สถานีถ่ายทอด โดยพิจารณาที่  $BER 10^{-6}$



รูปที่ 4.32 แสดงรัศมีพื้นที่ครอบคลุมสำหรับระบบไวแมกซ์แบบ 2 สถานีถ่ายทอด โดยพิจารณาที่ BER  $10^{-6}$

จากรูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.32 แสดงให้เห็นถึงตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดและระยะที่เพิ่มขึ้นเมื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอด โดยใช้ค่า BER  $10^{-6}$  เป็นตัวพิจารณา ซึ่งการมอดูเลชันแบบ BPSK 1/2 ติดตั้งสถานีถ่ายทอดสถานีที่หนึ่งทีระยะ 405 เมตร สถานีที่สองทีระยะ 758 เมตร การมอดูเลชันแบบ QPSK 1/2 ติดตั้งสถานีถ่ายทอดสถานีที่หนึ่งทีระยะ 490 เมตร สถานีที่สองทีระยะ 890 เมตร การมอดูเลชันแบบ QPSK 3/4 ติดตั้งสถานีถ่ายทอดสถานีที่หนึ่งทีระยะ 347 เมตร สถานีที่สองทีระยะ 696 เมตร การมอดูเลชันแบบ 16-QAM 1/2 ติดตั้งสถานีถ่ายทอดสถานีที่หนึ่งทีระยะ 448 เมตร สถานีที่สองทีระยะ 834 เมตร การมอดูเลชันแบบ 16-QAM 3/4 ติดตั้งสถานีถ่ายทอดสถานีที่หนึ่งทีระยะ 274 เมตร สถานีที่สองทีระยะ 592 เมตร การมอดูเลชันแบบ 64-QAM 2/3 ติดตั้งสถานีถ่ายทอดสถานีที่หนึ่งทีระยะ 248 เมตร สถานีที่สองทีระยะ 553 เมตร การมอดูเลชันแบบ 64-QAM 3/4 ติดตั้งสถานีถ่ายทอดสถานีที่หนึ่งทีระยะ 209 เมตร สถานีที่สองทีระยะ 494 เมตร

ตารางที่ 4.3 รัศมีพื้นที่ครอบคลุมของแต่ละเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาการติดตั้งสถานีถ่ายทอด

Modulation	AMC			Based on BER $10^{-4}$		Based on BER $10^{-6}$	
	SNR(dB)	BER	Distance(m)	RS 1 (m)	RS 2 (m)	RS 1 (m)	RS 2 (m)
BPSK	6	$10^{-0.9}$	882	436	836	405	758
QPSK	9	$10^{-1.1}$	607	393	760	347	696
16-QAM	16	$10^{-1.3}$	490	314	649	274	592
64-QAM	22	$10^{-1.5}$	366	240	541	209	494

จากตารางที่ 4.3 เทคนิคแบบ AMC จะให้พื้นที่ครอบคลุมที่มีขนาดที่กว้างเนื่องจากค่า SNR ที่เป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลชัน เมื่อทำการปรับเทียบมาเป็นค่า BER แล้ว จะเห็นว่าเป็นค่า BER ที่สูง นี่จึงเป็นสาเหตุว่าการใช้เทคนิคแบบ AMC จะมีพื้นที่ครอบคลุมที่กว้าง แต่เมื่อเรามาทำการพิจารณาโดยใช้ค่า BER เป็นตัวกำหนด และใช้สถานีถ่ายทอดในการสามารถขยายพื้นที่ครอบคลุมออกไปได้ โดยตำแหน่งที่ใช้ในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดหากใช้ค่า BER  $10^{-4}$  จะทำให้มีพื้นที่ครอบคลุมที่กว้างกว่ากว่าเมื่อใช้ BER  $10^{-6}$

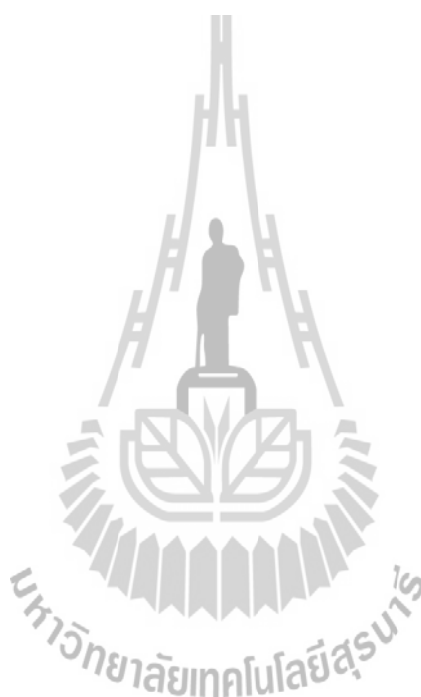
#### 4.9 สรุปเนื้อหาในบทที่ 4

จากผลของกราฟที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทนต่อสัญญาณของแต่ละรูปแบบการมอดูเลชันที่แตกต่างกัน โดยการมอดูเลชันแบบ 64-QAM มีความสามารถในการทนต่อสัญญาณรบกวนได้น้อยที่สุด รองลงมาคือ 16-QAM QPSK และ BPSK มีความสามารถในการทนต่อสัญญาณรบกวนได้มากที่สุด เนื่องจากในหนึ่งสัญลักษณ์ของการมอดูเลชันแบบ BPSK นั้นมี 1 บิต QPSK มี 2 บิต, 16-QAM มี 4บิต และ 64-QAM มี 6 บิต ซึ่งหมายความว่า หากสัญญาณที่รับได้มีการมอดูเลชันแบบ 64-QAM มีสัญลักษณ์ผิดพลาดไป 2 สัญลักษณ์ ซึ่งก็ก็จะผิดพลาดไป 12 บิต แต่ในทำนองเดียวกัน แต่เป็นการมอดูเลชันแบบ BPSK และมีสัญลักษณ์ที่ผิดพลาดไป 2 สัญลักษณ์ ซึ่งก็ก็จะผิดพลาดไปเพียงแค่ 2 บิตเท่านั้น ซึ่งก็เป็นการแลกเปลี่ยนกันของความจำเพาะเจาะจงของแต่ละรูปแบบการมอดูเลชัน ซึ่งก็คือ หากอยากได้อัตราการรับส่งข้อมูลที่สูง ก็ต้องเลือกใช้การมอดูเลชันแบบ 64-QAM แต่จะมีความสามารถในการทนต่อสัญญาณรบกวนได้น้อย แต่ถ้าหากอยากให้ระบบมีสัญญาณที่ทนทานต่อสัญญาณรบกวนได้ดี ก็ต้องเลือกการมอดูเลชันแบบ BPSK แต่ให้อัตราการรับส่งข้อมูลที่ต่ำ

ในงานวิจัยนี้ได้สนใจในการใช้ค่า BER เป็นตัวพิจารณาโดยค่า BER ที่  $10^{-4}$  นั้น ถูกใช้เกณฑ์สำหรับการติดต่อสื่อสารกันด้วยสัญญาณเสียง (Voice) และที่ค่า BER ที่  $10^{-6}$  นั้น ถูกใช้เป็นเกณฑ์สำหรับการติดต่อสื่อสารกันด้วยสัญญาณข้อมูล (Data)

เมื่อทำการติดตั้งสถานีถ่ายทอดเข้าไปในระบบไวแมกซ์จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า สามารถขยายพื้นที่ครอบคลุมออกไปได้มากขึ้น และหากใช้ค่า BER เป็นตัวพิจารณา ก็จะสามารถเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับระบบไวแมกซ์ในส่วนของพื้นที่ครอบคลุมที่ได้ขยายออกว่าจะมีค่า BER ตามที่ต้องการได้ โดยหากใช้ค่า SNR ตามเทคนิคของ AMC เป็นตัวพิจารณานั้น จะทำให้พื้นที่ครอบคลุมที่ได้ขยายออกไป มีค่า BER สูงมาก จึงเป็นเหตุให้ผู้ให้บริการไม่สามารถใช้งานได้อย่างไม่เต็มประสิทธิภาพเท่าที่ควร

ในการเลือกค่า BER ที่ใช้ในการตัดสินใจเพื่อหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดนั้น หากต้องการให้พื้นที่ครอบคลุมนั้นมีค่า BER ที่ต่ำหรือมีอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูงนั้นจะทำให้พื้นที่ครอบคลุมมีขนาดเล็ก แต่หากให้ค่า BER มีค่าสูงหรือมีอัตราการรับส่งข้อมูลที่ต่ำนั้นจะทำให้พื้นที่ครอบคลุมมีขนาดใหญ่ ซึ่งมีความหมายว่าพื้นที่ครอบคลุมที่ใช้ค่า  $BER = 10^{-4}$  มีขนาดใหญ่กว่าพื้นที่ครอบคลุมที่ใช้ค่า  $BER = 10^{-6}$  นั้นเอง และหากต้องการขยายพื้นที่ครอบคลุมออกไปก็สามารถที่จะใช้สถานีถ่ายทอดเข้ามาช่วยในระบบได้ โดยใช้ค่า BER เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ เพื่อให้ระบบมีค่า BER ได้ตามที่ต้องการ



## บทที่ 5

### สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปเนื้อหาวิทยานิพนธ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการหาพื้นที่ครอบคลุม เมื่อมีการติดตั้งสถานีถ่ายทอด เพื่อขยายพื้นที่ครอบคลุม โดยใช้ค่า BER เป็นตัวพิจารณา เพื่อให้พื้นที่ครอบคลุมของสถานีถ่ายทอดที่ขยายออกไปนั้นมีค่า BER ตามที่ต้องการ โดยทั่วไปจะพิจารณาที่ค่าความแรงของสัญญาณหรือค่า SNR สำหรับแต่ละรูปแบบการมอดูเลชัน แต่หากพิจารณาเพียงเฉพาะความแรงของสัญญาณหรือค่า SNR ผู้รับอาจจะได้รับสัญญาณที่มีกำลังแรง แต่มีค่า BER ที่สูง ทำให้มีอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลที่ต่ำ จึงเป็นเหตุให้ใช้งานการติดต่อสื่อสารไร้สายได้อย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ

เพื่อบรรลุตามวัตถุประสงค์การดำเนินงานวิจัยเริ่มจากการศึกษาระบบไวแมกซ์ ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับแอร์อินเตอร์เฟซของระบบและโครงสร้างของระบบ ซึ่งระบบไวแมกซ์มีกระบวนการทำงานต่าง ๆ อย่างมากมายในชั้นกายภาพ เช่น การเข้ารหัสรีดโซโลมอน การเข้ารหัสคอนโวลูชัน การทำการสลับ การมอดูเลชัน การทำ OFDM การทำ CP ซึ่งกระบวนการต่าง ๆ นี้ เป็นกระบวนการที่ทำให้ระบบไวแมกซ์มีอัตราการรับส่งข้อมูลที่สูง และระบบไวแมกซ์ยังมีเทคนิคการมอดูเลชันแบบปรับตัว ซึ่งทำให้ระบบไวแมกซ์มีความยืดหยุ่นเป็นอย่างมากในการใช้งาน จากนั้นได้ทำการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมเกี่ยวกับการหาพื้นที่ครอบคลุม เมื่อติดตั้งสถานีถ่ายทอด ซึ่งยังไม่มีวิธีไหนที่คำนึงถึงผลกระทบของกระบวนการต่าง ๆ ในชั้นกายภาพของระบบไวแมกซ์ และใช้ BER ในการตัดสินใจสำหรับการหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด เพื่อทำการขยายพื้นที่ครอบคลุม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดของระบบไวแมกซ์ที่คำนึงถึงผลกระทบของกระบวนการต่าง ๆ ในชั้นกายภาพของระบบไวแมกซ์ และยังใช้ BER เป็นตัวตัดสินใจในการหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอด สำหรับแต่ละการมอดูเลชัน และได้ทำการสร้างสมการที่ใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งการติดตั้งสถานีถ่ายทอดนี้ เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ผู้ใช้บริการมั่นใจได้ว่าพื้นที่ครอบคลุมที่ใช้บริการจากการติดตั้งสถานีถ่ายทอด จะยังให้ค่า BER ตามที่ต้องการได้

จากนั้นได้ทำการจำลองแบบระบบไวแมกซ์ด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองแบบระบบไวแมกซ์ที่เปรียบเทียบระหว่าง BER กับ SNR แล้วทำการปรับเพื่อทำการเปรียบเทียบระหว่าง BER กับ ระยะทาง แล้วทำการดูผลกระทบของการติดตั้งสถานีถ่ายทอดทั้งแบบ 1 สถานี และ แบบ 2 สถานีถ่ายทอด จากนั้นจึงได้ทำการสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ สำหรับแต่ละการ



มอดูลเช่นกัน แล้วทำการเปรียบเทียบระหว่างผลของแบบจำลองและผลของสมการให้ตรงกัน แล้วทำการหาตำแหน่งในการติดตั้งรีเลย์สำหรับแต่ละการมอดูเลชั่นที่พิจารณาด้วย BER ที่ต้องการทั้งแบบ 1 สถานีถ่ายทอดและแบบ 2 สถานีถ่ายทอด เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบที่ได้จากการติดตั้งสถานีถ่ายทอด ว่าได้มีการขยายพื้นที่ครอบคลุมออกไปมากน้อยเพียงใด และจากการที่ใช้เทคนิค AMC เป็นตัวตัดสินใจกับใช้ค่า BER เป็นตัวตัดสินใจในมีความแตกต่างกันอย่างไร

ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมดที่ได้กล่าวมา เราสามารถสรุปได้ว่าการจำลองแบบเปรียบเทียบกับสมการทางคณิตศาสตร์ที่ได้ออกแบบมานั้น สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาตำแหน่งการติดตั้งสถานีถ่ายทอด สำหรับแต่ละการมอดูเลชั่นของระบบไวแมกซ์ โดยใช้ BER เป็นเกณฑ์ได้ เพื่อให้พื้นที่ครอบคลุมที่ได้ขยายออกไปนั้น มีค่า BER ตามที่เราต้องการได้ ซึ่งจะเป็นการง่ายในการคำนวณ เนื่องจากเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ไม่ยุ่งยากมากนัก ซึ่งจะช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายต่าง ๆ ในการทดสอบสัญญาณเป็นอย่างมากอีกด้วย และทำให้ระบบไวแมกซ์ที่มีการติดตั้งสถานีถ่ายทอดโดยใช้วิธีการที่นำเสนอนี้ มีความน่าเชื่อถือมากขึ้นอีกด้วย

## 5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ควรจะมีการเพิ่มส่วนผลการทดลองโดยใช้ฮาร์ดแวร์ เพื่อทำการปรับเทียบสมการ ให้มีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น และเพิ่มเงื่อนไขในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดเพื่อให้สามารถหาตำแหน่งในการติดตั้งสถานีถ่ายทอดในรูปแบบของ 2 มิติได้

## 5.3 แนวทางการพัฒนาในอนาคต

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นคำนวณและแสดงผล ด้วยโปรแกรม MATLAB เท่านั้น ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในอนาคตจึงควรทดสอบระบบนี้ด้วยฮาร์ดแวร์และทดสอบด้วยช่องสัญญาณจริง โดยนำผลที่ได้จากสมการและผลที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกันเพื่อที่จะได้ให้ผลการทดลองมีความเชื่อถือมากขึ้น ควรปรับปรุงสมการให้สามารถรองรับการคำนวณที่มากกว่าสองสถานีถ่ายทอดและทำการเพิ่มเงื่อนไขในการออกแบบให้สามารถรองรับการทำงานแบบ 2 มิติ

## รายการอ้างอิง

ศักรินทร์ เชาว์ขุนทด, เทคนิคการลดฟีดฟือาเพื่อการมอดูเลตแบบปรับตัวในการเข้าถึงแบนกว้างแบบไร้สาย.

Abate, Z. (2009). **Wimax Rf Systems Engineering**, Artech House

Andrea, G. (2005). **Wireless Communications**, Cambridge University Press

Ali, H., Qahtani, Al., and Rabah, W. (2009). **Performance Study of Adaptive Modulation and Coding Schemes in WiMAX OFDM-based System**, Proceedings of the 2009 IEEE 9<sup>th</sup> Malaysia International Conference on Communications 15 -17 December 2009.

Amalia, R. (2007). **Implementation of a WiMAX simulator in**.Vienna.

Dusit, N., Ekram, H., Dong, I.K., and Zhu, H. (2009). **Joint Optimization of Placement and Bandwidth Reservation for Relays in IEEE 802.16j Mobile Multihop Networks**, IEEE International Conference on Communications

Erceg, V., Hari, K. V. S., Smith, M. S., Baum, D. S., Sheikh, K. P., Tappenden, C., Costa, J. M., Bushue, C., Sarajedini, A., Schwartz, R., Brantlund, D., Kaitz, T. and Trinkwon, D. (2001). **Channel Model for Fixed Wireless Applications**. IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group.

[http://www.kmitl.ac.th/~kchsomsa/somsak/crse\\_ecc/rs\\_code.pdf](http://www.kmitl.ac.th/~kchsomsa/somsak/crse_ecc/rs_code.pdf)

Lu, H.C., Wanjiun, L., and Lin, Y.S., (2010). **Relay Station Placement Strategy in IEEE 802.16j WiMAX Networks**, accepted by IEEE Transactions on Communications, IEEE 802.16-2001, **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks — Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems**, Apr. 8, 2002.

IEEE 802.16a/D3-2001 : **Draft Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks — Part 16: Air Interface for Fixed Wireless Access Systems — Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layers Specifications for 2–11 GHz**, Mar. 25, 2002.

IEEE 802.16-2004: **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems**

- IEEE 802.16.2-2001, **IEEE Recommended Practice for Local and Metropolitan Area Networks — Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems**, Sept. 10, 2001.
- IEEE 802.16-2005: **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems**
- IEEE 802.16-2009: **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems**
- Lin, B., Ho, P.-H., Xie, L.-L., and Shen, X. **Relay station placement in IEEE 802.16j dual-relay MMR networks**, in Proc. IEEE International Conf. Commun. (ICC), pp. 3437-3441, May 2008.
- Nadeem Khan, M., Ghauri, S. (2008). **The WiMAX 802.16e Physical Layer Model**, IET International Conference on Volume, 2008, pp.117 –120.
- Stamplecoskie, S. (2006). **A Study of the Concatenated Reed Solomon – Convolutional Coding Performance used in WiMAX**, Defence R&D Canada, Technical Memorandum DRDC Ottawa, TM 2006-026, January 2006
- Yang Yang, Honglin Hu, Jing Xu, Guoqiang Mao, (2009). **Relay Technologies for WiMAX and LTE-Advanced Mobile Systems**, IEEE Communications Magazine, Vol. 47, no. 10, October 2009, pp. 100-105
- Yu, Y., Murphy, S., and Murphy, L. (2008). **Planning base station and relay station locations in IEEE 802.16j multi-hop relay networks**, in Proc. IEEE Consumer Commun. Networking Conf. (CCNC), pp. 922-926, Jan. 2008.

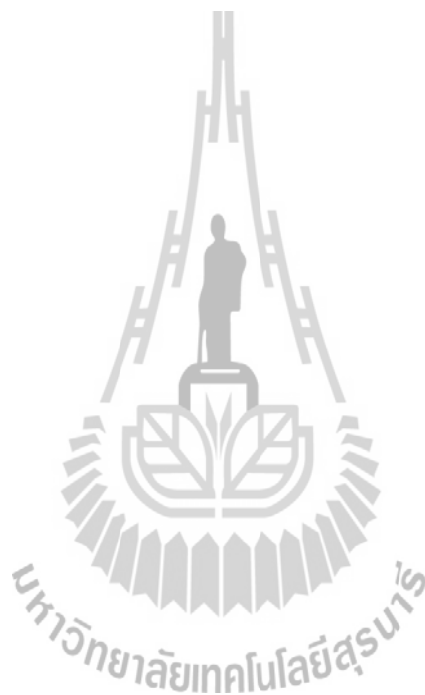


ภาคผนวก ก

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

Mardamornpun, B., Uthansakul, P., Uthansakul, M. (2012). **Design of Relay Distances for MultihopWiMAX Systems Based on Bit Error Rate Consideration**, ComCompAp 2012, Hong Kong



# Design of Relay Distances for Multihop WiMAX Systems Based on Bit Error Rate Consideration

Buranit Mardamornpun  
School of Telecommunication  
Engineering  
Suranaree University of Technology  
NakhonRatchasima,Thailand  
[blue\\_sut@hotmail.com](mailto:blue_sut@hotmail.com)

Peerapong Uthansakul  
School of Telecommunication  
Engineering  
Suranaree University of Technology  
NakhonRatchasima,Thailand  
[uthansakul@sut.ac.th](mailto:uthansakul@sut.ac.th)

Monthippa Uthansakul  
School of Telecommunication  
Engineering  
Suranaree University of Technology  
NakhonRatchasima, Thailand  
[mtp@sut.ac.th](mailto:mtp@sut.ac.th)

**Abstract**—WiMAX is an IEEE802.16 standard that provides a high speed transmission with wide coverage range. In IEEE 802.16j, the multiple Relay Stations (RS) are added to employ multihop links for WiMAX systems to extend coverage range and capacity. Many works in literature concern the RS locations based on the effective cost and the optimum user capacity. Most of them assumed the lossless transmission between RS and Base Station (BS). Consequently, the distance between RS and BS has no effect on locating RS. However, the real performance of WiMAX signals has to take the physical link between RS and BS into account. Therefore, this paper proposes the design of suitable RS distances to provide the required Bit Error Rate (BER) in coverage range. The results indicate the importance of designing relay distances. Also this paper reveals the method to design the suitable RS location under BER consideration.

**Keywords:** WiMAX; 802.16j; Relay; BER; coverage; distance.

## I. INTRODUCTION

WiMAX (Worldwide interoperability for Microwave Access) is a wireless networking standard which target for addressing interoperability across IEEE 802.16 standard-based product. In the first place, the IEEE 802.16 standard was designed to address communication with direct visibility in the frequency band from 10 to 66 GHz. The amendment 802.16a [1]-[4] working in a lower frequency, between 2 and 11GHz, because the communication on IEEE 802.16 standard at high frequency is difficult to non-line-of-sight transmission. The IEEE 802.16d [5] specification is a variation of the fixed standard (IEEE 802.16a) with the main advantage of optimizing the power consumption of the Subscribers (SS). This amendment was also known as 802.16-2004 in view of fact that it was released in 2004. The IEEE 802.16e [6] is amendment to the 802.16d based specification with target to both fixed and mobile communications. This standard also knows as 802.16-2005 in view of fact that it was released in 2005. The IEEE 802.16j [7] specification is the multihop relay for extension of IEEE 802.16 to support relay mode operation. An RS will increase the coverage, to enhance the throughput and QoS of the WiMAX system.

From literatures [8], there are three categories of RS to be implemented for WiMAX system. Firstly, Amplify and

Forward (AF) RS is a very simple RS and provides a very short delay. This AF system is an RS that amplifies the received signal and immediately forwards it to subscribers or BS without modifying any signals. The drawback of this type is that it has to also amplify noise mixed into the amplified signals. The second category is a selective DeCode and Forward (DCF) RS. This station performs channel coding by using cyclic redundancy check (CRC) and forwards a new signal to subscribers or BS. This RS type can avoid error propagation through the RS, but the processing delay is quite long. For the last category, DeModulation and Forward (DMF) RS is the station that performs the demodulation task and forwards a new signal to subscribers or BS without decoding. The complexity of DMF lies between AF and DCF. In this paper, the authors focus on DCF type only because this RS provides the best performance in comparing with the others.

The research on RS in WiMAX systems has been widely presented in literatures. In [9], the investigation of heuristic algorithm to find number and position of RS has been proposed. In [10], the stochastic programming formulation is developed to find the best RS position. Instead, the authors in [11] use the integer programming problem to find the optimum BS and RS based on the user requirements. In [12], the least amount and position of RS can be found by using heuristic algorithm. However, all of them assume the perfect transmission between RS to BS as a lossless link. This is not practical because the distance between RS and BS causes the attenuation of desired signals. Then the power ratio between desired signals to noise is increased and degrades the BER performance. Although the DCF type is chosen to be implemented at RS but still the unfixable bit error is forwarded to BS. In this light, the paper presents the design of relay distances for multihop WiMAX systems based on BER consideration. This design reveals the practical range between RS and BS to maintain the lossless region for finding the optimal RS locations.

The remainder of this paper is organized as follows. In Section II, the explanation of all models used for IEEE802.16j systems is given. Then, the design of relay distances is presented in Section III. In this section, the analytical formula of BER performance is provided. This formula ground basis of

distance design for multihop WiMAX system. The results and discussion is described in Section IV. Finally, the main point of this paper is concluded in Section V.

## II. SYSTEM MODELS FOR WiMAX SIMULATION

The models of WiMAX system are based on the IEEE 802.16j standard as well as the common information for cellular systems. Figure 1 shows the block diagram of WiMAX system. The basic parameters are given in the followings [13], [14];

Frequency Bands:	2.5GHz
BS high:	80m.
RS high:	30m.
User high:	2m.
Band Width:	5MHz
Radio Technology:	OFDM with 256 subcarriers
Cyclic Prefix:	1/4Data Randomization

The randomization process is the converted information bits to improve the coding performance. The other details for simulating WiMAX signals are given in the following sections.

### A. Forward Error Correction (FEC)

In WiMAX system, FEC consists of concatenation of Reed-Solomon outer code and a rate compatible convolution inner code. Reed-Solomon encoding is the process of adding redundancy bits to the data sequence. The redundancy bits help in correcting a block error that occurs during transmission of the signal. This encoding is based on Galois Field computations to do the calculations of the redundant bits. In WiMAX system, it uses a systematic RS ( $n=225, k=239, t=8$ ) code based on GF ( $2^8$ )

$n$  = number of bytes after encoding

$k$  = number of bytes before encoding

$t$  = number of bytes that can be corrected

The convolution encoding is the process of adding binary convolution encoder to correct the random errors in the data transmission. The generator polynomials are used to obtain their two output code bits, named as X and Y. These generator polynomial codes are:

$A = 171_{\text{oct}} = 1111001$  binary for X

$B = 133_{\text{oct}} = 1011011$  binary for Y

TABLE I. WiMAX MODULATION AND CODING SCHEMES

AMC	Modulation	RS code	CC code rate	Overall code rate
1	BPSK	(12,12,0)	1/2	1/2
2	QPSK	(32,24,4)	2/3	1/2
3	QPSK	(40,36,2)	5/6	3/4
4	16-QAM	(64,48,4)	2/3	1/2
5	16-QAM	(80,72,4)	5/6	3/4
6	64-QAM	(108,96,6)	3/4	2/3
7	64-QAM	(120,108,6)	5/6	3/4

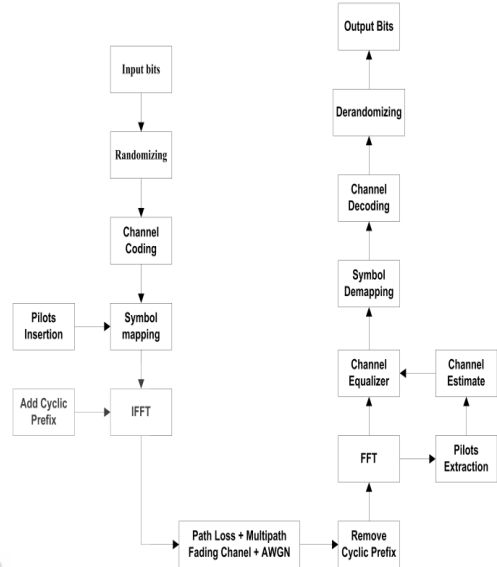


Figure 1. WiMAX system block diagram

### B. Interleaving

Interleaving is a simple process to spread a burst data error and reduce the error concentration. For WiMAX systems, the interleaving process employs 12 interleaving levels.

### C. Modulation

The wireless systems usually employ a modulation scheme to map the coded bits for the purpose of including higher spectral efficiency, powerful error correction techniques, resistance to channel impairments, more efficient multiple access strategies, better security and privacy. For WiMAX system, four types of modulations are considered. These are BPSK, QPSK, 16-QAM and 64-QAM. The 64-QAM techniques provide the highest speed data rate but having the least capability to resist noise and interference. On the other hand, BPSK modulation gives the lowest speed data rate but providing the best resistance to noise and interference.

### D. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

OFDM is the key technology to increase data rate transmission under multipath fading channels. OFDM is a Multi-Carrier Modulation (MCM) scheme in which a channel is divided into many subchannels or subcarriers. With this operation, the system is able to endure Inter Symbol Interference (ISI) while protecting immunity to multi-path and having less sensitivity to frequency selective fading. The baseband signal is given in (1).

$$x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} X[i] e^{j2\pi ni/N}, 0 \leq n \leq N-1. \quad (1)$$

Where  $x[n]$  is a sampled signal in time domain,  $X[i]$  is a received signal in frequency domain and  $N$  is number of subcarriers.

### E. Path Loss

The path loss is the attenuation of signals due to the distance between transmitter and receiver. This paper adopts the model in [15]. For the link between RS to BS and RS to RS, the path loss is modeled by free space loss as expressed in (2).

$$PL_f = 32.4 + 20 \log_{10} d_{km} + 20 \log_{10} f_{MHz} \quad (2)$$

For the link between BS to user and RS to user, the SUI path loss [15] model is used as given in (3).

$$PL_{SUI} = A + 10\gamma \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_f + X_b + S \quad (3)$$

In this paper, the authors select the terrain type B and SUI-3 for simulation. The reason is on the outdoor scenarios with similar consideration as cellular network. The parameters of SUI-3 model are depicted in Table II.

TABLE II. SUI-3 CHANNEL MODEL PARAMETER

	Tap 1	Tap 2	Tap 3
Delay ( $\mu$ s)	0	0.4	0.9
Power (dB)	0	-5	-10
K factor (dB)	1	0	0

### III. DESIGN OF RELAY DISTANCES

In order to design the relay distance, the BER performance has to be firstly realized. This paper uses an analytical model describing the relationship between BER and SNR in [16]. Note that the modulation type of WiMAX system in this section focuses on BPSK only. This is because the other modulations can easily follow all steps in this section by replacing the relationship between BER and SNR to be their modulation types. For BPSK modulation, the relation is expressed as

$$P_b = Q\sqrt{2SNR} \quad (2)$$

Where  $P_b$  is the probability of bit error which is implied to BER, SNR is the signal power to noise power ratio. In (2), the SNR is resulted by path loss, multipath fading, and noise effects. For multihop link, it is obvious that the part of calculating signal power is to be modified by including the path loss between RS to BS and RS to user. The illustration of WiMAX systems with and without RS is depicted in Figure 2. As shown in Figure 2 (a), the probability of bit error  $P_b$  can be given as shown in (3).

$$P_b = Q \sqrt{\frac{2P_{BS}}{P_N 10^{(A+10\gamma \log_{10}(\frac{d}{d_0})+X_f+X_b+S)/10}}} \quad (3)$$

Where  $P_{BS}$  is the transmitting power of BS (consider downlink) and  $P_N$  is the noise power.

For multihop link shown in Figure 2(b), the expression in (3) has to be modified by dividing the distance to be subsection according to BS to RS, RS to RS and RS to user. For example, the probability of bit error for one RS is written in (4) and for two RS is given in (5). Note that the probability of bit error depends on the type of RS which this paper employs DCF type.

$$P_b = P_b(BS \text{ to } RS_1) + P_b(RS_1 \text{ to user}) \quad (4a)$$

$$P_b = Q \sqrt{\frac{2P_{BS}}{P_N 10^{\frac{(32.4+20 \log_{10} D_{BS1}+20 \log f)}{10}}}} + Q \sqrt{\frac{2P_{RS1}}{P_N 10^{\frac{(A+10\gamma \log_{10}(\frac{d-D_{RS1}}{d_0})+X_f+X_b+S)}{10}}}} \quad (4b)$$

$$P_b = P_b(BS \text{ to } RS_1) + P_b(RS_1 \text{ to } RS_2) + P_b(RS_2 \text{ to user}) \quad (5a)$$

$$P_b = Q \sqrt{\frac{2P_{BS}}{P_N 10^{\frac{(32.4+20 \log_{10} D_{BS1}+20 \log f)}{10}}}} + Q \sqrt{\frac{2P_{RS1}}{P_N 10^{\frac{(32.4+20 \log_{10}(D_{RS1}-D_{RS2})+20 \log f)}{10}}}} + Q \sqrt{\frac{2P_{RS2}}{P_N 10^{\frac{(A+10\gamma \log_{10}(\frac{d-D_{RS2}}{d_0})+X_f+X_b+S)}{10}}}} \quad (5b)$$

Where  $d$  is the distance between BS to user,  $D_{RS1}$  is the distance between BS to  $RS_1$  and  $D_{RS2}$  is the distance between BS to  $RS_2$ .

In addition, the effect of channel coding (Reed-Solomon) is also taken into account by evaluating BER from  $P_b$  given in (3)-(5) [16] as

$$BER = \frac{1}{2^{m-1}} \sum_{j=t+1}^m j \binom{m}{j} P_b^j (1-P_b)^{m-j} \quad (6)$$

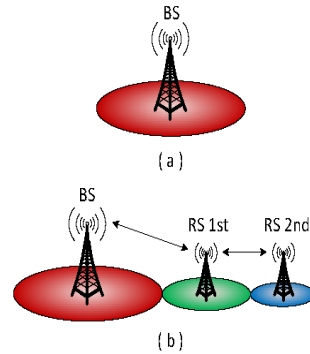


Figure 2. WiMAX systems (a) without relay station (b) with relay stations.



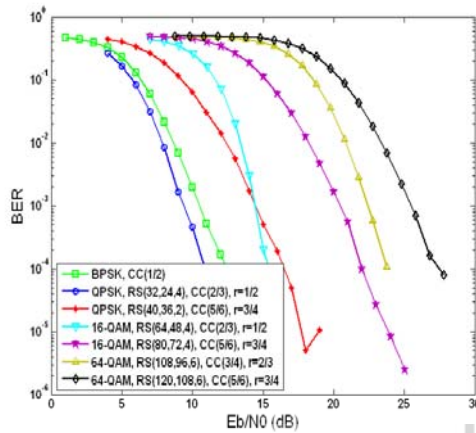


Figure 3. BER vs Eb/N0 for all modulation schemes in WiMAX standard.

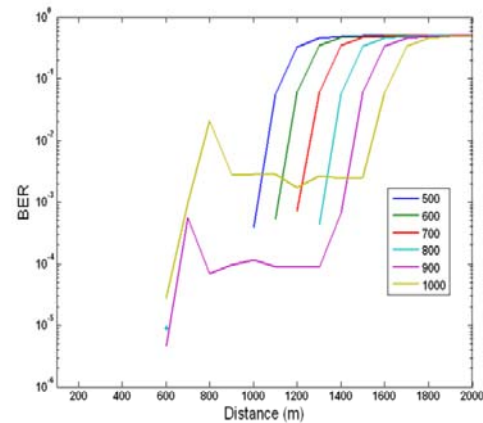


Figure 5. BER vs Distance of 1 RS WiMAX system for various distances of RS location.

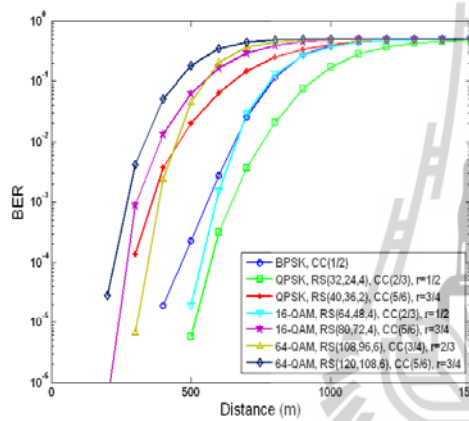


Figure 4. BER vs Distance for all modulation schemes in WiMAX standard.

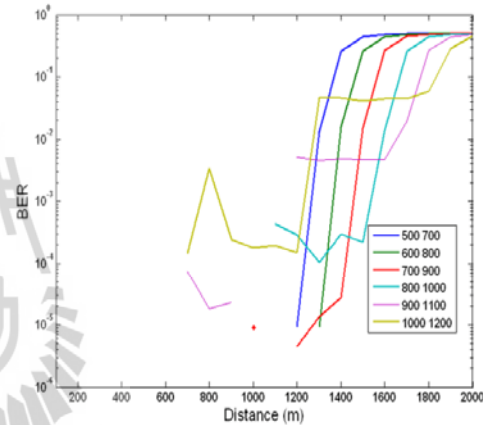


Figure 6. BER vs Distance of 2 RS WiMAX system for various distances of RS locations.

From (3) to (6), it can be easily noticed that the relay distance is the main parameter to determine BER. However, the relationship between relay distance and BER is not a direct linear function. Therefore, in order to design the relay distance, the use of simulation programming is introduced. By setting the target of BER, the iteration of relay distance can be gradually increased until reaching the target.

#### IV. RESULTS AND DISCUSSION

All simulations are performed by using Matlab programs. At First, the 88 data bits are randomly generated for BPSK modulation. Next we use the function in Matlab named as *rsenc(msg,N,K,varargin)* to perform Reed-Solomon encoding with the output of 96 bits (8 code word bits). Later, the 96 bits are input of *viterbi(msg,template,Tx)* in order to perform Convolution encoding. At this stage, the output of data stream is 192 bits. Next, the task of interleaving 192 bits is carried on by using *intrlv(data,elements)*. Now, it is ready to change the data in form of bit information to be symbols. For BPSK, the number of bits is equal to the number of symbols. The function to modulate data is called as *pskmod(x,M)* in which *pskdemod(x,M)* is a function to demodulate signal.

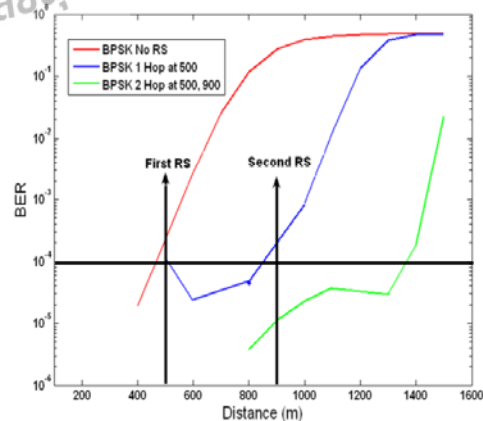


Figure 7. BER vs Distance of WiMAX system with no RS, 1 RS and 2 RS.

Total of data symbols are 256 symbols which is the input of IFFT process to perform OFDM. After that, it provides 256 OFDM symbols in which the cyclic prefix with size of 1/4 of OFDM symbols is added. In all simulations, the results are presented by averaging over 3000 rounds.

Figure 3 shows the effect of SNR to WiMAX physical layer simulation. This paper displays  $E_b/N_0$  instead of SNR because most of the work regarding BER performance concerns  $E_b/N_0$  (independency from modulation). In addition, the value of  $E_b/N_0$  is directly proportional to SNR. As seen in this figure, the results are similar to many work presented in literature. This confirms the reliability of our own developing programming.

To focus on relay distance, the simulations are performed by changing the distance between BS to user. The path loss is the important key parameter to link between distance and BER performance. As observed in Figure 4, BER increases as a function of distance for all modulation types. This is due to the fact that the signal power is reduced by the loss of path distance. Consequently, the decrease of SNR causes the chance of bit errors to be increased. The results also reveal that the RS has a limit distance to be installed without bit errors.

Figure 5 presents WiMAX system with 1 RS for various distances between BS and RS. It is obviously seen that the use of RS can extend the range of coverage. However, there is a limit distance to be aware of RS installments. Some works in literature assumed any distances between RS and BS providing a lossless and error free range. In contrast, the results in this figure show the error free range of installing RS up to 800 m only. After that, the error does exist and this effect gets more severe if relay distance is larger. Figure 6 shows the same investigation as Figure 5 but with 2 RS consideration. It can be noticed that using 2 RS can extend longer range than 1 RS. However, the results still provide the same conclusion of limited distance as the results shown in Figure 5.

The example of designing relay distances is presented in Figure 7. The results show the BER performance of WiMAX system with no RS, 1 RS and 2 RS. The BER target is set at  $10^{-4}$  and then using computational method to find the relay distances for 1 RS and 2 RS. The solution is 500m for 1 RS and 900m, 900m for 2 RS. It can be observed that the BER performance of no RS reaches  $10^{-4}$  BER at 450m. By using relays, the coverage range extends to 850 m for 1 RS and 1350m for 2 RS.

## V. CONCLUSION

This paper indicates the effect of relay distance for multihop WiMAX system. The results also reveal the limited distance of using RS to extend coverage range without error. This is important because most works in literatures neglect and assume the relay distance without limitation. Also in this paper, the example of design method to achieve the relay distance according to BER target has been presented. The

results help the WiMAX engineers to realize the real performance of using multiple relay networks.

## REFERENCES

- [1] IEEE 802.16-2001, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks — Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," Apr. 8, 2002.
- [2] IEEE P802.16a/D3-2001: "Draft Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks — Part 16: Air Interface for Fixed Wireless Access Systems — Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layers Specifications for 2–11 GHz," Mar. 25, 2002.
- [3] IEEE 802.16.2-2001, "IEEE Recommended Practice for Local and Metropolitan Area Networks — Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems," Sept. 10, 2001.
- [4] WiMAX Forum releases.
- [5] IEEE 802.16-2004: "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems"
- [6] IEEE 802.16-2005: "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems"
- [7] IEEE 802.16-2009: "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems"
- [8] Yang Yang, Honglin Hu, Jing Xu, Guoqiang Mao, "Relay Technologies for WiMAX and LTE-Advanced Mobile Systems", IEEE Communications Magazine, Vol. 47, no. 10, October 2009, pp. 100-105
- [9] Hsiao-Chen Lu, Wanjiun Liao, and Yung-Shong Lin, "Relay Station Placement Strategy in IEEE 802.16j WiMAX Networks," accepted by IEEE Transactions on Communications, Jul. 2010
- [10] Dusit Niyato, Ekram Hossain, Dong In Kim, and Zhu Han, "Joint Optimization of Placement and Bandwidth Reservation for Relays in IEEE 802.16j Mobile Multihop Networks", IEEE International Conference on Communications, 2009.
- [11] Y. Yu, S. Murphy, and L. Murphy, "Planning base station and relay station locations in IEEE 802.16j multi-hop relay networks," in Proc. IEEE Consumer Commun. Networking Conf. (CCNC), pp. 922-926, Jan. 2008.
- [12] B. Lin, P.-H. Ho, L.-L. Xie, and X. Shen, "Relay station placement in IEEE 802.16j dual-relay MMR networks," in Proc. IEEE International Conf. Commun. (ICC), pp. 3437-3441, May 2008.
- [13] M. Nadeem Khan, S. Ghauri, The WiMAX 802.16e Physical Layer Model, IET International Conference on Volume, 2008, pp.117–120.
- [14] Ali H. Al-Qahtani and Rabah W. Aldhaher, "Performance Study of Adaptive Modulation and Coding Schemes in WiMAX OFDM-based System", Proceedings of the 2009 IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications 15–17 December 2009.
- [15] Abate. Zerihun, "Wimax Rf Systems Engineering" ,Artech House, c2009.
- [16] Andrea Goldsmith, Wireless Communications, Cambridge University Press, 2005.

## ประวัติผู้เขียน

นายบุญนิติ มาศอมรพันธุ์ เกิดเมื่อวันที่ 19 มกราคม 2528 ที่จังหวัดขอนแก่น สำเร็จ การศึกษาระดับมัธยมปลาย จากโรงเรียนขอนแก่นวิทยายน จังหวัดขอนแก่น และสำเร็จการศึกษา ระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโทรคมนาคม) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัด นครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2551 จากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีการนำเสนอผลงานทางวิชาการในการประชุม วิชาการระดับนานาชาติ

1. “Design of Relay Distances for Multihop WiMAX Systems Based on Bit Error Rate Consideration.”ในงาน IEEE Communications, Computing and Applications 2012 (ComCompAp 2012) ณ Hong Kong University of Science & Technology, Hong Kong, China ระหว่างวันที่ 11-13 มกราคม พ.ศ. 2555



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี