

ประสิทธิภาพการทำงานของระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งข้อมูลผ่าน
ช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด

SYSTEM PERFORMANCE OF COOPERATIVE DIVERSITY FOR
M-ARY QAM OFDM-BASED WITH BEST RELAY SELECTION

ผุสดี กิรติพงษ์วุฒิ

PUSSADEE KIRATIPONGVOOTH

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2555

KMITL-2012-EN-M-010-171

SYSTEM PERFORMANCE OF COOPERATIVE DIVERSITY FOR
M-ARY QAM OFDM-BASED WITH BEST RELAY SELECTION

PUSSADEE KIRATIPONGVOOTH

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2012
KMITL-2012-EN-M-010-171

COPYRIGHT 2012

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ประสิทธิภาพการทำงานของระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณ
รีเลย์คอพอเรทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด

Thesis Title System Performance of Cooperative Diversity for M-ary QAM OFDM-based
with Best Relay Selection

นักศึกษา นางสาวผุสดี กิรติพงษ์วุฒิ


รหัสประจำตัว 51060933

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุวิพล ลิทธิชีวะภาค

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2012-EN-M-010-171

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.ไกรสิน	สงวัฒนา	
รศ.เกรียงไกร	วงศ์โรจนภรณ์	
รศ.ดร.ราชู	พันธ์ฉลาด	
ผศ.ดร.พิชญ	สุพรรณกุล	
รศ.ดร.สุวิพล	ลิทธิชีวะภาค	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2555 เวลา 15.00-17.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 9 ตุลาคม พ.ศ. 2555

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพการทำงานของระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด
นักศึกษา	นางสาวผุสดี กิรติพงษ์วุฒิ
รหัสประจำตัว	51060933
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2555
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร. สุวิพล สิริชีวะภาค

บทคัดย่อ

ช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟนั้นทำให้สมรรถนะในระบบการสื่อสารไร้สายดีขึ้นจากไคเวอร์ซิตี และระบบ OFDM ช่วยลดความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตของระบบ หากนำข้อดีของทั้ง 2 ระบบ มารวมกันน่าจะทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดียิ่งขึ้น ซึ่งงานวิจัยนี้ นำเสนอสมรรถนะของระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ในจำนวน รีเลย์ที่แตกต่างกัน จำนวนช่องสัญญาณย่อยที่เปลี่ยนไป และ สมรรถนะของระบบเมื่อเปลี่ยนรูปแบบการมอดูเลต (Modulation) ซึ่ง ระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้น

Thesis	System Performance of Cooperative Diversity for M-ary QAM OFDM-based system with Best Relay Selection
Student	Miss Pussadee Kiratipongvooth
Student ID.	51060933
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2012
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Suvepon Sittichivapak

ABSTRACT

Cooperative relay networks can improve performance in wireless communication systems as a form of spatial diversity. And OFDM-based system can improve bit error probability. If we combine the advantages of two systems, system performance should be improved. In this thesis, we investigate the error rate performance of cooperative diversity for M-ary QAM OFDM-based system with best-relay selection from signal to noise ratio. The results present bit error probability of M-ary QAM OFDM-based system with best-relay selection for different values of the numbers of relays (M), the numbers of subchannels and modulation scheme. M-ary QAM OFDM-based system with best-relay selection provides higher performance of throughput and bit error probability.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สุวิพล สิริธิชีวกภาค ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ คุณเศรษฐกร กาเมือง ที่คอยให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการออกแบบระบบคอมพิวเตอร์ ดีเวอ์ซี้ดี

ขอขอบคุณ พี่บรรจง โยสภา และน้องปิยรัตน์ อุ่นกาเย็น และเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่ช่วยเหลือและเป็นกำลังใจให้กันมาโดยตลอด

สุดท้ายต้องขอขอบคุณบิดา มารดา และน้องชาย ที่เป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ผู้สดี กิริติพงษ์วุฒิ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมุติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการสื่อสาร.....	3
2.1.1 การสื่อสารข้อมูลแบบใช้สาย.....	4
2.1.1.1 สายคู่ตีเกลียว (Twisted-Pair Cable)	4
2.1.1.2 สายโคแอกเชียล (Coaxial Cable)	4
2.1.1.3 สายใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Cable)	4
2.1.2 การสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย.....	4
2.1.2.1 ระบบไมโครเวฟ (Microwave System)	4
2.1.2.2 ระบบดาวเทียม (Satellite System).....	4
2.1.2.3 โทรศัพท์เคลื่อนที่ (Cellular Transmission)	4
2.2 วิวัฒนาการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่	5
2.2.1 ยุค 1G	5
2.2.2 ยุค 2G	5
2.2.3 ยุค 3G	5
2.2.4 ยุค 4G	6
2.2.5 สแตนด์ดาร์ด LTE	6
2.3 ปัจจัยที่มีผลกับการสื่อสารไร้สาย.....	7
2.3.1 การจางหายของสัญญาณ (Fading).....	7
2.3.2 สัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (Interference & Noise).....	8

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบโอเอฟดีเอ็ม.....	9
2.4.1 ความหมายของโอเอฟดีเอ็ม.....	10
2.4.1.1 ความตึงฉากซึ่งกันและกันในระบบโอเอฟดีเอ็ม.....	11
2.4.1.2 การแปลงฟูเรียร์และการแปลงกลับฟูเรียร์ของระบบโอเอฟดีเอ็ม.....	11
2.4.2 หลักการทำงานของระบบโอเอฟดีเอ็ม.....	12
2.4.2.1 การเสริมสร้างไซคลิก.....	14
2.4.2.2 การปรับแต่งการมอดูเลตในระบบโอเอฟดีเอ็ม.....	14
2.5 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการมอดูเลต.....	15
2.5.1 การมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด.....	15
2.5.2 การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟส.....	15
2.5.3 การมอดูเลตเชิงเลขทางขนาดและเฟส.....	16
2.6 ความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity).....	19
2.6.1 ไทเวอร์ซิตีทางเวลา (Time Diversity).....	20
2.6.2 ไทเวอร์ซิตีทางความถี่ (Frequency Diversity).....	20
2.6.3 ไทเวอร์ซิตีทางสเปซ (Space-Diversity) หรือ ไทเวอร์ซิตีทางสายอากาศ (Antenna-Diversity).....	20
2.7 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สาย แบบหลายทางเข้า หลายทางออก.....	21
2.7.1 สมรรถนะในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก.....	22
2.7.2 เทคนิคการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก.....	22
2.6.3 ไทเวอร์ซิตีทางสเปซ (Space-Diversity) หรือ ไทเวอร์ซิตีทางสายอากาศ (Antenna-Diversity).....	20
2.8 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบรีเลย์คอปเปอร์ทีฟ (Cooperative Relay).....	23
2.8.1 โพรโทคอลสำหรับระบบรีเลย์คอปเปอร์ทีฟ.....	24
2.8.2 รูปแบบของระบบรีเลย์คอปเปอร์ทีฟ.....	24
2.8.2.1 ระบบรีเลย์แบบขยายและส่งต่อ (Amplify-and-Forward: AF).....	24
2.8.2.2 ระบบรีเลย์แบบถอดรหัสและส่งต่อ (Decode-and-Forward: DF).....	25
2.8.3 วิธีการรวมสัญญาณในช่องสัญญาณที่มีความหลากหลาย.....	26
2.9 พารามิเตอร์ที่ใช้วัดสมรรถนะของระบบ และความหมายของค่าต่างๆ.....	28
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง.....	24
3.1 แบบจำลองระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ทีฟ แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด.....	30
3.1.1 ระบบ M-ary QAM OFDM.....	30
3.1.2 ระบบการส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณ ที่ดีที่สุด.....	31

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.3 ระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอเพอเรทีฟ	
แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด.....	33
3.2 ขั้นตอนการทำงานของระบบ.....	34
3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	35
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	36
4.1 การทดลองระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอเพอเรทีฟ	
แบบต่างๆ.....	36
4.2 การทดลองเปรียบเทียบความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิต ที่มีจำนวน	
ช่องสัญญาณย่อยต่างกัน.....	40
4.3 การทดลองเปรียบเทียบความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตโดยการมอดูเลต	
แบบต่างๆ.....	43
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	46
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	46
เอกสารอ้างอิง.....	47
ประวัติผู้เขียน.....	48
ภาคผนวก.....	49

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงไบนารีของการมอดูเลต QAM แบบ 4 เฟส (8QAM).....	16
2.2 แสดงไบนารีของการมอดูเลต QAM แบบ 8 เฟส (16QAM).....	17
2.3 แสดงไบนารีของการมอดูเลต QAM แบบ 32 เฟส (64QAM).....	18
3.1 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง.....	35

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการมอดูเลตแบบแบ่งความถี่.....	5
2.2 แสดงการมอดูเลตแบบ FDMA&TDMA.....	5
2.3 แสดงการมอดูเลตแบบ CDMA	6
2.4 แสดงการมัลติเพล็กซ์อนุกรมของสัญญาณบนแกนความถี่	6
2.5 แสดงการจางหายหลายวิถี.....	7
2.6 แสดงหลักการทำงานของการมอดูเลตที่ใช้สัญญาณพาหะหลายสัญญาณ.....	10
2.7 แสดงการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณที่ทำการมอดูเลตกับสัญญาณพาหะย่อย.....	12
2.8 แสดงการมัลติเพล็กซ์อนุกรมของสัญญาณบนแกนความถี่	12
2.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมตัวส่งในระบบโอเอฟดีเอ็ม.....	13
2.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมตัวรับในระบบโอเอฟดีเอ็ม.....	13
2.11 แสดงการเสริมสร้างไซคลิก.....	14
2.12 การแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อกแบบ ASK.....	15
2.13 การแปลงสัญญาณดิจิตอลเป็นอนาล็อกแบบ PSK	16
2.14 การมอดูเลตแบบ QPSK.....	17
2.15 การมอดูเลต แบบ 16QAM	17
2.16 การมอดูเลต แบบ 64QAM	19
2.17 แสดงการรับส่งข้อมูลแบบสายอากาศเดี่ยว และหลายสายอากาศ.....	21
2.18 แบบจำลองการมัลติเพล็กซ์เชิงปริภูมิ.....	23
2.19 แสดงระบบรีเลย์คอพอเรทีฟ.....	23
2.20 การส่งต่อสัญญาณแบบขยายและส่งต่อ.....	25
2.21 การส่งต่อสัญญาณแบบถอดรหัสและส่งต่อ.....	26
2.22 วิธีการรวมสัญญาณแบบเลือก.....	28
3.1 แบบจำลอง M-ary QAM ในระบบโอเอฟดีเอ็ม.....	31
3.2 แบบจำลองรีเลย์คอพอเรทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด.....	32
3.3 แบบจำลอง M-ary QAM ในระบบโอเอฟดีเอ็มโดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์.....	33
4.1 เปรียบเทียบความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตของระบบ QPSK-16 โดย การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟแบบต่างๆ.....	37
4.2 เปรียบเทียบอัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณ รีเลย์คอพอเรทีฟ 1-2 ตัว.....	38
4.3 เปรียบเทียบอัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณ รีเลย์คอพอเรทีฟ 2-4 ตัว.....	38
4.4 เปรียบเทียบระบบ QPSK-N โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด.....	40

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 อัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK OFDM โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์ คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด.....	41
4.6 อัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK-4 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด.....	41
4.7 อัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด.....	42
4.8 อัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK-64 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด.....	42
4.9 เปรียบเทียบระบบ MQAM-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด.....	43
4.10 อัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด.....	44
4.11 อัตราการส่งข้อมูลของระบบ 16QAM-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอ- เรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด.....	44
4.12 อัตราการส่งข้อมูลของระบบ 64QAM-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอ- เรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด.....	45

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านการสื่อสาร นับว่ามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก การสื่อสารที่ให้ความสะดวก รวดเร็ว และถูกต้องมากขึ้นเท่าไร ก็จะต้องตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้งาน(User) มากยิ่งขึ้นเท่านั้น ระบบการสื่อสารแบบไร้สาย นับว่าเป็นการสื่อสารอีกรูปแบบหนึ่งที่มีผู้นิยมใช้เป็นจำนวนมาก เนื่องจากให้ความสะดวกในการใช้งาน แต่จะตอบสนองและเกิดประโยชน์กับผู้ใช้งานมากที่สุดนั้น จะต้องมีการพัฒนาต่อไปอีก ไม่ว่าจะเป็นเรื่องประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลที่สูงขึ้น อีสรระในการเคลื่อนที่ได้และคุณภาพความน่าเชื่อถือในการให้บริการที่ดีในระบบ เพื่อรองรับกับความต้องการ การสื่อสารข้อมูลแบบมัลติมีเดียในอนาคตได้

เป็นที่รู้จักกันดีว่าระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก (Multiple-Input Multiple-Output: MIMO) [1] สามารถรองรับความต้องการดังกล่าวในอนาคตได้ หลักการเบื้องต้นที่ทำให้ระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก มีคุณสมบัติดังที่กล่าวมา คือ การใช้งานชุดสายอากาศที่มีมากกว่าหนึ่งตัว ติดตั้งทั้งที่เครื่องส่งและเครื่องรับ ซึ่งการเพิ่มจำนวนของสายอากาศนี้จะส่งผลให้ระบบสามารถเพิ่มช่องทางการสื่อสารและเพิ่มทางเลือกในการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามในปัจจุบันมีระบบสื่อสารไร้สายชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถรองรับความต้องการ การส่งข้อมูลในอนาคตและเพิ่มทางเลือกในการส่งข้อมูลในช่องสัญญาณที่ดีที่สุดได้ เช่นเดียวกับระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก และไม่จำเป็นต้องเพิ่มจำนวนของสายอากาศที่เครื่องส่งและเครื่องรับ การสื่อสารดังกล่าวนี้เรียกว่า การสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ (cooperative communications) [2],[3] ซึ่งอาศัยเทคนิคการส่งต่อข้อมูล (relaying) โดยให้ผู้ใช้ภายในระบบทำหน้าที่ช่วยส่งต่อข้อมูลไปยังเครื่องรับ ซึ่งจะทำให้เกิดระบบการสื่อสารแบบหลายทางเข้าหลายทางออกเสมือน (virtual MIMO systems) ขึ้นมาได้

ระบบโอเอฟดีเอ็ม (OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplex) โดยส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอเพอเรทีฟนั้นทำให้สมรรถนะในระบบการสื่อสารไร้สายดีขึ้นจากไคเวอร์ซิตีสำหรับ ระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอเพอเรทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด คาดว่าจะทำให้ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น เมื่อเพิ่มจำนวนช่องสัญญาณย่อย เปลี่ยนวิธีการมอดูเลต และการเลือกเฉพาะช่องสัญญาณรีเลย์คอเพอเรทีฟที่ดีที่สุด

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเป็นการนำแนวคิดและหลักการทำงาน ของระบบ M-ary QAM OFDM และ รีเลย์คอเพอเรทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด มาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ในระบบสื่อสารไร้สาย เพื่อทำให้ระบบสื่อสารไร้สายมีประสิทธิภาพของการส่งข้อมูลที่ดี และเพื่อเป็นแนวทางในการวิจัย ออกแบบ ประยุกต์ใช้กับระบบสื่อสารไร้สาย ในการส่งสัญญาณแบบต่างๆ เช่น สัญญาณภาพ สัญญาณเสียง และสัญญาณข้อมูลใดๆ ต่อไปในอนาคต

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

เพื่อศึกษา และวิเคราะห์วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพ การรับส่งข้อมูล ในระบบการสื่อสารไร้สาย โดยใช้ระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่ฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ให้มีอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (Bit Error Rate: BER) ลดต่ำลง

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

ข้อดีของระบบ M-ary QAM OFDM และรีเลย์คอปเปอร์ที่ฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด จะทำให้อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลลดลง

1.4 ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย

ทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัย มีดังต่อไปนี้

1. การมอดูเลตแบบโอเอฟดีเอ็ม
2. วิธีการมอดูเลตแบบต่างๆ เช่น QPSK, 16QAM, 64QAM ฯลฯ
3. รีเลย์คอปเปอร์ที่ฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ศึกษา และวิเคราะห์วิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่ฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด โดยมีหัวข้อที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. วิธีการรับส่งข้อมูลของระบบสื่อสารผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่ฟ
2. วิธีการเลือกช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่ฟที่ดีที่สุด
3. วิธีการรวมสัญญาณในช่องสัญญาณที่มีความหลากหลาย
4. ระบบโอเอฟดีเอ็ม โดยเปลี่ยนวิธีการมอดูเลต
5. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลของระบบ

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาวิธีการรับส่งข้อมูลของระบบสื่อสารผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่ฟ
2. ศึกษาความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการมอดูเลตแบบต่างๆ
3. ศึกษาวิธีการรวมสัญญาณในช่องสัญญาณที่มีความหลากหลาย
4. ศึกษาวิธีการเลือกช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่ฟที่ดีที่สุด
5. วิเคราะห์ประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลของระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่ฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด
6. ทดสอบและวัดประสิทธิภาพ ผลของวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพการรับส่งข้อมูลในระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่ฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด
7. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลจากการทดลอง
8. สรุปผลงานวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับในบทนี้ จะกล่าวถึง ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีที่จำเป็นสำหรับวิทยานิพนธ์โดยจะแบ่งเนื้อหาหลักๆ ดังนี้คือ ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการสื่อสาร วิวัฒนาการของการสื่อสารไร้สาย ปัจจัยที่มีผลต่อการสื่อสารไร้สาย ระบบโอเอฟดีเอ็ม ความรู้เบื้องต้นกับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือ เทคนิคการรวมสัญญาณแบบต่างๆ การปรับเปลี่ยนการมอดูเลชัน และสุดท้ายจะอธิบายถึงพารามิเตอร์ที่ใช้วัดสมรรถนะของระบบและความหมายของค่าต่างๆ เพื่อเข้าใจถึงปัญหาที่เกิดขึ้นในการรับส่งข้อมูลข่าวสารผ่านช่องสัญญาณไร้สาย และวิธีการตามทฤษฎีต่างๆ นี้มาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ

2.1 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการสื่อสาร

ช่องทางในการสื่อสารข้อมูลแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การสื่อสารข้อมูลแบบใช้สาย (Wire) และการสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย (Wireless)

2.1.1 การสื่อสารข้อมูลแบบใช้สาย

การสื่อสารข้อมูลแบบใช้สาย คือ การสื่อสารโดยใช้สายในการสื่อสารข้อมูลระหว่างผู้รับและผู้ส่ง ซึ่งมีข้อดีที่ราคาถูก การสูญหายของข้อมูลค่อนข้างน้อย แต่ไม่ค่อยยืดหยุ่นในการใช้งาน เนื่องจากต้องใช้สายเป็นสื่อกลางระหว่างผู้รับและผู้ส่ง ทำให้มีผลกับระยะห่างของผู้รับและผู้ส่ง ตัวอย่าง สายที่ใช้ในการสื่อสาร เช่น สายบิดเกลียวคู่ (Wire Pair or Twisted Pair) หรือสาย LAN สายโคแอกเชียล (Coaxial Cable) และเส้นใยแก้วนำแสง (Optical Fiber) โดยสายแต่ละประเภทก็มีข้อดี ข้อเสีย แตกต่างกันไป

2.1.1.1 สายคู่ตีเกลียว (Twisted-Pair Cable)

เป็นสายที่มีราคาถูกที่สุด ประกอบด้วยสายทองแดงที่มีฉนวนหุ้ม 2 เส้น นำมาพันกันเป็นเกลียว จะใช้กันแพร่หลายในระบบโทรศัพท์ ความเร็วในการส่งข้อมูล 10 Mbps ส่งได้ในระยะทาง 1 mile สายคู่ตีเกลียวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด

1. สายคู่ตีเกลียวแบบไม่มีชีลด์ (Unshielded Twisted-Pair: UTP) เป็นสายเคเบิลที่ถูกรบกวนจากภายนอกได้ง่าย แต่มีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูงและราคาไม่แพง
2. สายคู่ตีเกลียวแบบมีชีลด์ (Shielded Twisted-Pair: STP) เป็นสายที่มีปลอกหุ้มอีกรอบเพื่อ ป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอก จึงทำให้สายเคเบิลชนิดนี้สามารถใช้ในการเชื่อมต่อในระยะไกลได้มากขึ้น แต่ราคาแพงกว่าแบบ UTP

2.1.1.2 สายโคแอกเชียล (Coaxial Cable)

สายโคแอกเชียลเป็นสายสัญญาณอีกแบบหนึ่ง จะประกอบด้วยลวดทองแดงอยู่ตรงกลาง หุ้มด้วยฉนวนพลาสติก 1 ชั้น แล้วจึงหุ้มด้วยทองแดงที่ถักเป็นแผ่น แล้วหุ้มภายนอกอีกชั้นหนึ่งด้วยฉนวน สามารถป้องกันการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสัญญาณรบกวนอื่นๆ ใช้ในระบบโทรทัศน์ ความเร็วในการส่งข้อมูล 350 Mbps ส่งได้ในระยะทาง 2-3 mile

2.1.1.3 สายใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Cable)

สายใยแก้วนำแสงประกอบด้วยเส้นใยที่ทำมาจากใยแก้ว 2 ชนิด ชนิดหนึ่งจะอยู่ที่แกนกลาง ส่วนอีกชนิดหนึ่งอยู่ที่ด้านนอก ซึ่งใยแก้วทั้งสองจะมีดัชนีการสะท้อนแสงต่างกัน ทำให้แสงซึ่งถูกส่งออกมาจากปลายด้านหนึ่งสามารถส่งผ่านไปอีกด้านหนึ่งได้ ใช้สำหรับส่งข้อมูลที่ต้องการความเร็วสูง มีข้อมูลที่ต้องการส่งเป็นจำนวนมาก และอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณไฟฟ้ารบกวนมาก ความเร็วในการส่งข้อมูล 1 Gbps ระยะทางในการส่งข้อมูล 20-30 mile มีข้อดีที่สามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูง แต่ราคาก็สูงเช่นกัน

2.1.2 การสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย

การสื่อสารข้อมูลแบบไร้สาย คือ การสื่อสารข้อมูลระหว่างผู้รับและผู้ส่งโดยไม่มีการใช้สายเป็นตัวกลางในการส่งข้อมูล โดยจะมีความยืดหยุ่นกว่า การสื่อสารแบบใช้สาย เนื่องจากไม่มีข้อจำกัดเกี่ยวกับความยาวของสาย แต่ระยะทาง อัตราเร็วในการส่ง ความปลอดภัย และการขาดหายของข้อมูล ในการส่งข้อมูลขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลางที่ใช้ในการส่งข้อมูล และสัญญาณรบกวนในขณะที่ส่งสัญญาณ ตัวอย่างการสื่อสารแบบไร้สาย เช่น ระบบไมโครเวฟ ระบบดาวเทียม ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ฯลฯ

2.1.2.1 ระบบไมโครเวฟ (Microwave System)

กลไกของการสื่อสารและรับสัญญาณของไมโครเวฟใช้จานสะท้อนรูปพาราโบลา เป็นระบบที่ใช้วิธีส่งสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าคลื่นวิทยุเป็นทอดๆ จากสถานีหนึ่งไปยังอีกสถานีหนึ่ง และสัญญาณของไมโครเวฟจะเดินทางเป็นเส้นตรง ดังนั้นสถานีจะต้องพยายามอยู่ในที่สูงๆ สถานีหนึ่งๆ จะ ครอบคลุมพื้นที่ที่รับสัญญาณได้ 30-50 กม. ความเร็วในการส่งข้อมูล 200-300 Mbps ระยะทาง 20-30 mile และยังขึ้นอยู่กับความสูงของเสาสัญญาณด้วย

2.1.2.2 ระบบดาวเทียม (Satellite System)

ใช้หลักการคล้ายกับระบบไมโครเวฟ ในส่วนของการยิงสัญญาณจากแต่ละสถานีต่อกันไปยังจุดหมายที่ต้องการ โดยอาศัยดาวเทียมที่โคจรอยู่รอบโลก ขั้นตอนในการส่งสัญญาณมี ทั้งหมด 3 ขั้นตอนคือ

1. สถานีต้นทางจะส่งสัญญาณขึ้นไปยังดาวเทียม เรียกว่า สัญญาณเชื่อมต่อขาขึ้น (UpLink)
2. ดาวเทียมจะตรวจสอบตำแหน่งสถานีปลายทาง หากอยู่นอกเหนือขอบเขตสัญญาณจะส่งต่อไปยังดาวเทียมที่ครอบคลุมสถานีปลายทางนั้น
3. หากอยู่ในขอบเขตพื้นที่ที่ครอบคลุมจะทำการส่งสัญญาณไปยังสถานีปลายทาง เรียกว่า สัญญาณเชื่อมต่อขาลง (Downlink) อัตราเร็วในการส่ง 1-2 Mbps

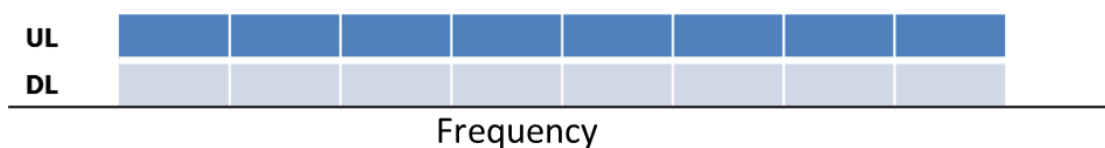
2.1.2.3 โทรศัพท์เคลื่อนที่ (Cellular Transmission)

จะอาศัยการส่งสัญญาณของโทรศัพท์เคลื่อนที่ในการส่งผ่านข้อมูล โดยอัตราเร็วในการส่งข้อมูลขึ้นอยู่กับเทคโนโลยี และแบนด์วิทที่ใช้ในการส่งข้อมูล

2.2 วิวัฒนาการระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่

2.2.1 ยุค 1G

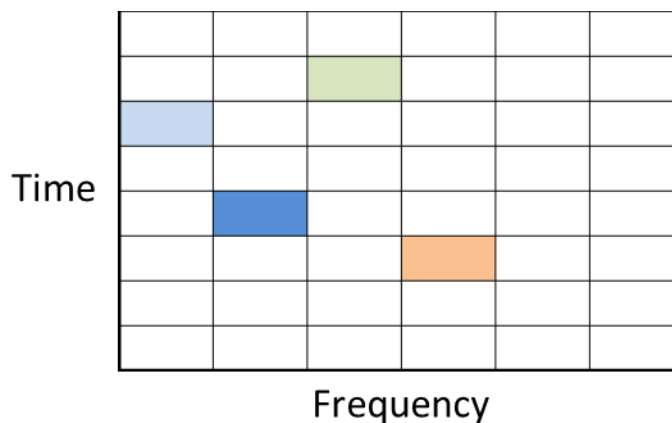
เป็นยุคที่ใช้ระบบอนาล็อก คือใช้สัญญาณวิทยุในการส่งคลื่นเสียง โดยไม่รองรับการส่งผ่านข้อมูลใดๆ ทั้งสิ้น โดยสามารถใช้งานทางด้านเสียง (Voice) ได้อย่างเดียว คือ โทรออก-รับสาย เท่านั้น ไม่มีการรองรับการใช้งานด้านการส่งข้อมูล (Data) ใดๆ มีวิธีการมอดูเลตสัญญาณอนาล็อกเข้าช่องสื่อสารแบบเฟรควิเอนซีดีวีเอ็มเอ (FDMA: Frequency Division Multiple Access) โดยการใช้การแบ่งความถี่ออกมาเป็นช่องเล็กๆ เนื่องจาก มีความถี่จำกัดทำให้ไม่สามารถรองรับอัตราการขยายตัวของผู้ใช้บริการได้



รูปที่ 2.1 แสดงการมอดูเลตแบบแบ่งความถี่

2.2.2 ยุค 2G

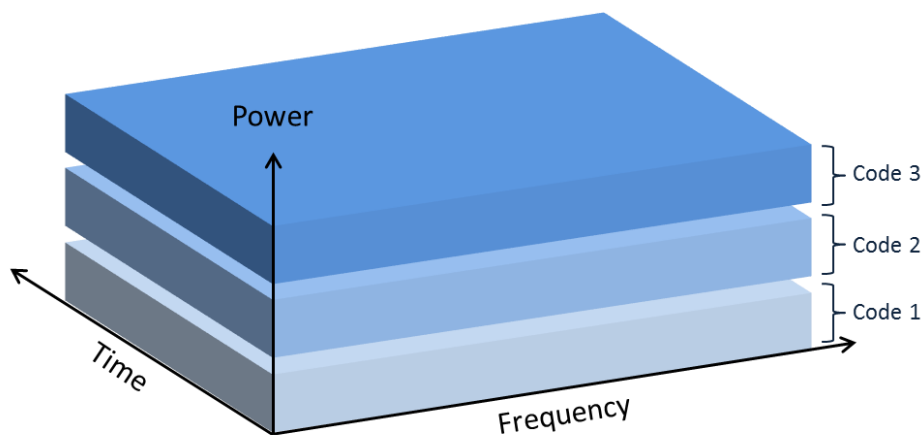
เป็นยุคที่เปลี่ยนจากระบบอนาล็อกเป็นระบบดิจิทัล ส่งทางคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) ซึ่งในยุคนี้อีก เป็นยุคที่เราเริ่มที่จะสามารถใช้งานทางด้าน Data ได้ นอกเหนือจากการใช้งานเสียง วิธีการมอดูเลตสัญญาณดิจิทัลเข้าช่องสื่อสารโดยการใช้การแบ่งความถี่ออกมาเป็นช่องเล็กๆ ในแต่ละช่วงเวลา (FDMA and TDMA: Time Division Multiple Access)



รูปที่ 2.2 แสดงการมอดูเลตแบบ FDMA&TDMA

2.2.3 ยุค 3G

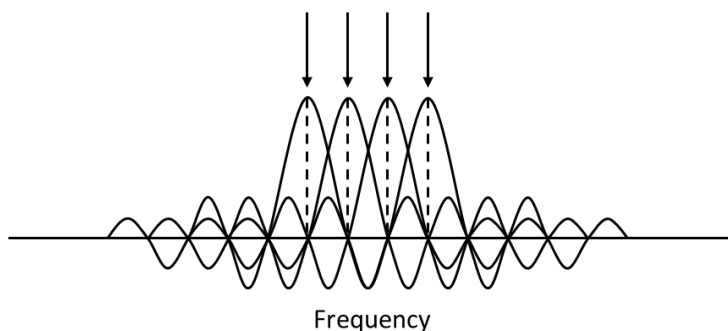
เป็นการสร้างระบบใหม่ให้รองรับระบบเก่าได้ และเรียกว่า Universal Mobile Telecommunication Systems (UMTS) โดยมุ่งหวังว่า การเข้าถึงเครือข่ายแบบไร้สาย สามารถกระทำได้ด้วยอุปกรณ์หลากหลาย เช่น จากคอมพิวเตอร์ จากเครื่องใช้ไฟฟ้าอื่น ระบบ 3G ใช้วิธีการมอดูเลตแบบซีดีเอ็มเอ ซึ่งสามารถบรรจุช่องสัญญาณเสียงได้มากกว่า แต่ใช้แบนด์วิท (Bandwidth) ที่กว้างขึ้น ในระบบนี้จึงเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า วยแบนด์ซีดีเอ็มเอ (WCDMA: Wideband Code-Division Multiple Access)



รูปที่ 2.3 แสดงการมอดูเลตแบบ CDMA

2.2.4 ยุค 4G

เทคโนโลยี 4G หรือ LTE (Long Term Evolution) เป็นเทคโนโลยีสื่อสารไร้สายความเร็วสูง ที่ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อช่วยลดข้อจำกัดการรับส่งข้อมูลด้วยเทคโนโลยีเดิมๆ (GSM/ GPRS/ EDGE) ซึ่งสามารถรับส่งข้อมูลแบบไร้สายได้ด้วยความเร็วสูงถึง 100 Mbps อีกทั้งช่วยลดความล่าช้าในการรับส่งข้อมูลโดยรวม (Latency) ซึ่งเป็นจุดอ่อนของเทคโนโลยีไร้สาย ระบบ 4G ใช้วิธีการมอดูเลตแบบ โอเอฟดีเอ็ม ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการมัลติเพล็กซ์อนุกรมของสัญญาณบนแกนความถี่

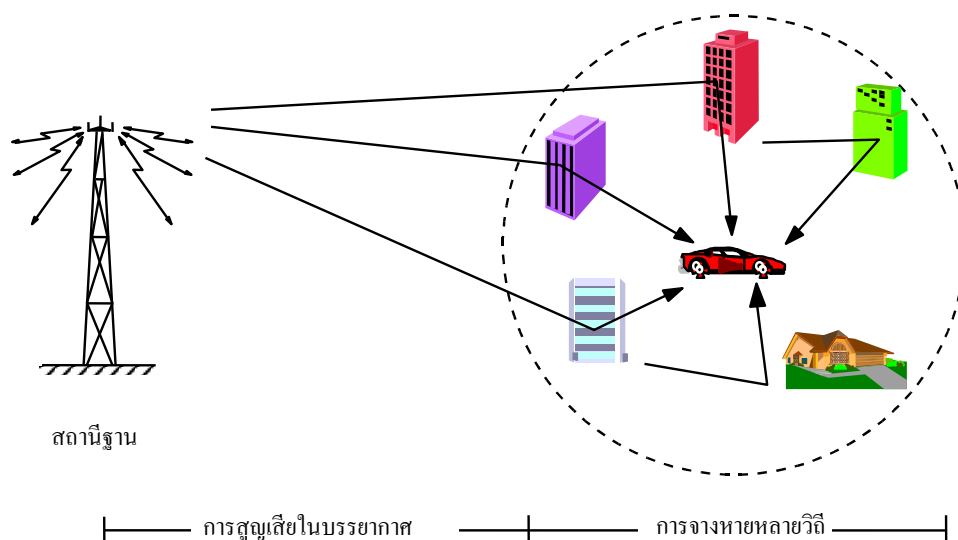
2.2.5 มาตรฐานของระบบ LTE

ตามมาตรฐาน แบนด์วิทรวมของ LTE สามารถใช้ได้ตั้งแต่ 1.4 เมกะเฮิรตซ์ (Megahertz: MHz), 3 เมกะเฮิรตซ์, 5 เมกะเฮิรตซ์, 10 เมกะเฮิรตซ์, 15 เมกะเฮิรตซ์ จนถึง 20 เมกะเฮิรตซ์ โดยระบบโอเอฟดีเอ็ม ที่ใช้ใน LTE นั้น จะแบ่งจำนวนช่องสัญญาณย่อยได้สูงสุด 2048 ช่องสัญญาณ โดยแต่ละช่องสัญญาณย่อยมีแบนด์วิท 15 กิโลบิตต่อวินาที (kilobits per second: kbps) โดยแต่ละช่องสัญญาณย่อยนั้นสามารถมอดูเลตแบบ QPSK, 16QAM และ 64QAM โดย LTE จะสามารถทำความเร็วในการดาวน์โหลดได้ที่ 100 เมกะบิตต่อวินาที (Megabits per second: Mbps) ส่วนอัปโหลด 50 เมกะบิตต่อวินาที

2.3 ปัจจัยที่มีผลกับการสื่อสารไร้สาย

2.3.1 การจางหายของสัญญาณ (Fading)

จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นลักษณะการจางหายของสัญญาณระหว่างสถานีส่งและโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งเกิดการสะท้อนตึก ภูเขา หรือสิ่งก่อสร้าง สังกเกตได้ว่าระหว่างสถานีส่งกับโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีเส้นทางจำนวนมาก ซึ่งในแต่ละเส้นทางจะเกิดการสะท้อนและการกระจายจากสิ่งรอบข้างทำให้เกิดการลดทอนและสูญเสีย เรียกว่า การจางหายหลายวิถี (Multipath Fading) เช่น เส้นทางจากสัญญาณหลักและสัญญาณจากเส้นทางอื่นถูกสะท้อนจากสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนหักเห หรือแตกกระจายเป็นผลให้เกิดสัญญาณหลายเส้นทางและมีเวลาหน่วงที่ต่างกัน ดังนั้นสัญญาณที่รับได้จะมีองค์ประกอบของสัญญาณเป็นจำนวนมาก ในบางครั้งจะมีส่วนที่เสริมกันทำให้มีความแรงของสัญญาณสูง ในบางครั้งจะมีส่วนที่หักล้างกันทำให้สัญญาณมีความแรงต่ำ ผลที่ได้คือความแรงของสัญญาณที่มีค่าสูงบ้างต่ำบ้างซึ่งเปลี่ยนตามเวลา



รูปที่ 2.5 แสดงการจางหายหลายวิถี

สาเหตุของการจางหายเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณอย่างรวดเร็ว และธรรมชาติของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ ลักษณะของการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ นั้นจะถูกกำหนดด้วยความยาวของคลื่นพาหะที่ใช้ในการสื่อสาร ถ้าคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายจากสายอากาศแล้วไปกระทบกับวัตถุรอบข้างที่มีขนาดเท่ากับความยาวของคลื่นพาหะ จะทำให้คลื่นวิทยุที่แพร่กระจายเปลี่ยนแปลง โดยเกิดการสะท้อนและหักเห ทำให้ที่ภาครับสัญญาณได้เป็นจำนวนมากซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วนคือคลื่นตรงและคลื่นสะท้อน ดังนั้นภาครับจะรับสัญญาณหลายองค์ประกอบบางครั้งคลื่นจะมีส่วนเสริมกันหรือเฟสตรงกันทำให้พลังงานมีค่าสูง บางครั้งคลื่นจะหักล้างหรือเฟสต่างกันทำให้พลังงานมีค่าต่ำ ผลลัพธ์ที่ได้คือสัญญาณที่รับได้นั้นจะเกิดการแกว่งมากบ้างน้อยบ้าง ซึ่งเราเรียกว่าเกิดการจางหายของสัญญาณ

2.3.2 สัญญาณแทรกสอดและสัญญาณรบกวน (Interference & Noise)

สัญญาณแทรกสอดส่วนใหญ่จะพบเห็นและเกิดขึ้นในระบบสื่อสารดิจิทัล ซึ่งเกิดจากทั้งระบบสื่อสารอื่นๆ หรือระบบจักรกลอื่นๆ โดยเฉพาะในระบบวิทยุ แหล่งกำเนิดสัญญาณแทรกสอดหลักเกิดจากผู้ใช้งานความถี่วิทยุอื่นๆ ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์มีการแพร่กระจายความถี่ใกล้เคียงกับช่องสื่อสารที่ใช้สามารถผ่านเข้ามายัง เครื่องรับได้ เป็นเหตุให้เกิดสัญญาณแทรกสอดจากช่องสื่อสารใกล้เคียง (Co-Channel Interference)

หลักการของการใช้ความถี่ซ้ำ (Frequency Reuse) เป็นหัวใจหลักของระบบเซลลูลาร์ ในระบบการใช้ความถี่ซ้ำ ลูกข่ายที่อยู่คนละบริเวณกันได้รับการกำหนดให้ใช้ช่องสัญญาณความถี่เดียวกันได้วิธีดังกล่าวจะทำให้สามารถใช้แถบความถี่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่อาจจะเกิดปัญหาสัญญาณรบกวนกัน ช่องสัญญาณความถี่เดียวกันในเซลล์ที่ต่างกันอาจถูกจำกัดด้วยปัญหาของสัญญาณแทรกสอดจากการใช้ช่องสื่อสารเดียวกัน หากไม่ถูกแยกออกจากกันในระยะทางที่เหมาะสม ตัวอย่างสำหรับในกรณีของซีดีเอ็มเอ (CDMA: Code Division Multiple Access) ขนาดความจุของระบบขึ้นอยู่กับระดับของสัญญาณแทรกสอดเป็นหลัก นั่นคือระบบจะยังคงทำงานได้อย่างปกติราบรื่นที่ปริมาณของสัญญาณแทรกสอดยังอยู่ในระดับที่ไม่สูงเกินไป สัญญาณเหล่านี้เกิดจากผู้ใช้อื่นๆ ที่อยู่บริเวณรอบข้างที่มีการใช้งานที่ความถี่เดียวกัน ในทางปฏิบัติแบบจำลองของเกาส์ไม่ใช่แบบจำลองที่แม่นยำ [9] ในการแสดงถึงค่าทางสถิติของสัญญาณแทรกสอดจากความถี่เดียวกัน เนื่องจากมีจำนวนสัญญาณแทรกสอดไม่มากนักที่ส่งผลกระทบต่อผู้ใช้คลื่นความถี่ ดังนั้นการประเมินสมรรถนะของระบบสื่อสารที่ถูกจำกัด โดยสัญญาณแทรกสอดบนพื้นฐานของแบบจำลองของเกาส์จึงอาจมีความคลาดเคลื่อน

สัญญาณรบกวนหรือบางครั้งเรียกว่า นอยส์ (noise) คือสัญญาณที่ไม่พึงประสงค์ ที่เข้ามารบกวนทำให้ระบบการวัดได้รับสัญญาณที่เราต้องการน้อยลงหรือได้ค่าที่ผิดพลาดไปจากความเป็นจริง ซึ่งมีสาเหตุและการแก้ไขหรือการลดการรบกวนดังกล่าวลงเพื่อให้ได้สัญญาณที่เราต้องการใกล้เคียงกับค่าแท้จริงหรือผิดพลาดน้อยลงได้หลายสาเหตุซึ่งจะได้กล่าวต่อไปถึงสาเหตุหลักๆ และการแก้ไขโดยสังเขปการขจัดนอยส์หรือลดสัญญาณรบกวนให้อยู่ในขอบเขตที่ยอมรับ เราจะต้องวิเคราะห์ให้ได้ว่าสัญญาณรบกวนเข้าสู่ระบบได้อย่างไร ไม่ว่าจะเป็นวิธีกำเนิดจากภายในวงจรเอง การนำ หรือการส่งกระจายคลื่น และทำการแก้ปัญหาที่เป็นไปได้ทีละขั้น

สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นภายในอาจเกิดจากกลไกต่างๆ ภายในอุปกรณ์ แหล่งกำเนิดอย่างง่ายอันหนึ่ง คือ ความต้านทานคาร์บอนซึ่งส่วนประกอบที่นำกระแสไฟฟ้าได้ส่วนหนึ่งจะประกอบด้วยกลุ่มของอะตอมรักษาสภาพอยู่ในตำแหน่งเดิมตลอดเวลาอะตอมเหล่านี้ช่วยเป็นพาหะให้เกิดการเคลื่อนที่ของประจุหรืออิเล็กตรอนซึ่งทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้า แม้ว่าจะมีตำแหน่งคงที่อยู่ก็ตามแต่อะตอมจะมีการสั่นอย่างรวดเร็วเพราะอุณหภูมิหรือผลของความร้อน การสั่นสะเทือนของอะตอมจะถูกส่งถ่ายให้อิเล็กตรอนดังนั้นจึงทำให้เกิดการผสมสัญญาณที่ไม่ต้องการกับกระแสหรือเกิดส่วนของสัญญาณรบกวนขึ้น เมื่อสัญญาณรบกวนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ มันจะเพิ่มขึ้นเมื่อมีความร้อนจากภายใน I^2R หรืออุณหภูมิแวดล้อมภายนอกเพิ่มขึ้น สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนี้จะเรียกว่า จอห์นสันนอยส์ (Johnson Noise)

การสั่นที่เกิดขึ้นภายในอะตอมของความต้านทานทำให้เกิดความถี่ย่านกว้าง ดังนั้นสัญญาณรบกวนที่กำเนิดขึ้นจะประกอบด้วยสเปกตรัมของความถี่ที่กว้างมาก สัญญาณรบกวนความถี่กว้างนี้บางครั้งเรียก ไวต์นอยส์ (White Noise) เพราะว่าการจำกัดไว้ในความถี่ย่านกว้าง เช่น สัญญาณรบกวนที่เกิดจากเครื่องบินเจตส่วนมากเป็นไวต์นอยส์ และสัญญาณรบกวนที่สามารถได้ยินเสียงซ่า

จากเครื่องรับวิทยุ เมื่อความร้อนเป็นแหล่งทำให้เกิดสัญญาณรบกวน เราสามารถลดสัญญาณรบกวนได้ โดยการลดความร้อนของความต้านทานได้ การออกแบบความต้านทานแบบฟิล์ม และแก้วชนิดพิเศษสามารถทำให้ลดการเกิดสัญญาณรบกวนน้อยลงได้ ถ้าสัญญาณรบกวนเกิดจากภายในการกำบัง จะไม่มีผล การเลือกวงจรกรองมาใช้ก็ไม่มีผลในการลดขนาดของสัญญาณรบกวนเพราะเป็นย่านกว้าง (Wideband)

สัญญาณรบกวนภายในอีกชนิดหนึ่งเกิดจากสาเหตุทางไฟฟ้าในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ในอุปกรณ์แอคทีฟต่างๆ เช่น ทรานซิสเตอร์ เมื่อมีการชาร์ตหรือต่อในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดการถ่ายพลังงานจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่ง ซึ่งทำให้เกิดความถี่ ประจุที่มีความถี่จะทำให้เกิดการรบกวนแบบแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งทำให้เกิดสัญญาณรบกวนในระบบ ซึ่งช่วงการเกิดความถี่เป็นช่วงสั้นๆ ทำให้สเปกตรัมของความถี่ของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นเป็นย่านกว้างทันทีทันใด สามารถทำการลดสัญญาณรบกวนได้เพียงเล็กน้อยในกรณีที่สถานะแวดล้อมไม่ส่งผลให้เกิดสัญญาณรบกวน สัญญาณรบกวนชนิดเดียวกันที่เกิดจากอิเล็กทรอนิกส์รบกวนผ่านพื้นที่ของอิเล็กโทรดของหลอดสุญญากาศเพราะสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงระหว่างอิเล็กโทรด สัญญาณรบกวนชนิดนี้เรียกว่า ซอตนอยส์ (Short Noise) การเลือกวงจรกรองที่เหมาะสมจะช่วยลดสัญญาณรบกวนได้ระดับหนึ่ง

การเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าในบริเวณระหว่างเพลตของคาปาซิเตอร์และการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กรอบๆ ความเหนี่ยวนำจะมีผลเหมือนกับผลที่เกิดจากความเหนี่ยวนำตัวเองที่เกิดจากการต่อสายภายในวงจรทำให้เกิดสัญญาณที่ไม่ต้องการในอุปกรณ์ไฟฟ้า เมื่อสนามนี้เปลี่ยนในลำดับพื้นฐานอันหนึ่งสามารถทำการปรับแต่งตัวกรองสำหรับความถี่ที่กำหนด การเลือกวงจรกรองที่เหมาะสม อาจช่วยทำให้สามารถลดสัญญาณที่ไม่ต้องการลงได้

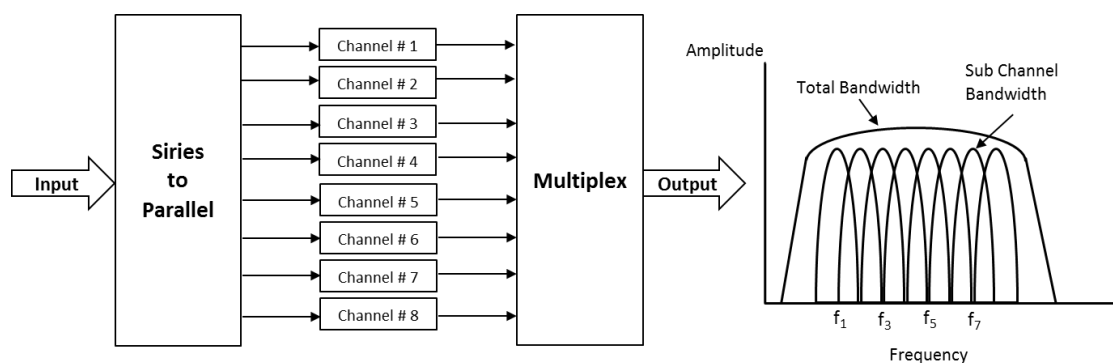
องค์ประกอบสัญญาณรบกวนอีกอย่างที่เราพบเป็นปกติคือความถี่ไฟฟ้า 50 หรือ 60 เฮิร์ตซ์หรือฮาร์โมนิคของความถี่ดังกล่าวแล้วแต่ที่เราใช้กับระบบไฟฟ้าความถี่เท่าไร ขึ้นกับความถี่ของแหล่งจ่ายกำลัง โดยเฉพาะสัญญาณนี้สามารถถูกนำเข้าสู่ระบบได้โดยสายของแหล่งจ่ายไฟ และส่งถ่ายไปยังอุปกรณ์อื่นๆ ในระบบ สัญญาณรบกวนชนิดนี้อาจแพร่กระจายเข้าระบบได้จากสายไฟของแหล่งจ่ายกำลังที่อยู่ใกล้และจากสนามของหม้อแปลงและบัลลาสต์ การลดสัญญาณรบกวนนี้ทำได้แต่ทำได้ยากอันดับแรกต้องหาทางเข้าของการส่งคลื่น หรือสายตัวนำที่เข้าระบบให้ได้ ต่อมาต้องใช้วิธีที่สามารถลดสัญญาณรบกวนดังนี้ ถ้าด้านเข้าทำด้วยสื่อไฟฟ้าจะใช้ฟิลเตอร์ที่เหมาะสมใส่ไว้ที่สายตัวนำเพื่อเป็นกัปกสัญญาณรบกวน ถ้าสัญญาณรบกวนเกิดจากการแพร่กระจายคลื่นต้องใช้การบังเพื่อลดสัญญาณรบกวนปัญหา การกำบังอาจกลายเป็นปัญหาสำคัญเพราะต้องกำบังสายทดสอบ กำบังสายแหล่งจ่าย และบางครั้งจำเป็นต้องกำบังวงจรด้านเข้าทั้งหมดถ้าจำเป็น

อีกอย่างหนึ่งโดยเฉพาะปัญหาแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน คือ การเหนี่ยวนำสัญญาณรบกวนเข้าในวงจรทดสอบเสียเองโดยมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างชิ้นส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์ทดสอบที่จำเป็น ต้องใช้ในการทดสอบ โวลต์มิเตอร์ แอมมิเตอร์ เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Signal Generator) และอื่นๆ สามารถเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนได้

2.4 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบโอเอฟดีเอ็ม

โอเอฟดีเอ็มแม้จะเป็นหนึ่งในมาตรฐานทางเทคนิคที่แตกแขนงออกมาจากเทคโนโลยีการแผ่สเปกตรัม (Spread Spectrum) ก็ตาม แต่ก็ถือว่ามีารรับส่งข้อมูลแบบการมอดูเลตที่ใช้สัญญาณพาหะหลายสัญญาณ (Multi-carrier modulation: MCM) เป็นเทคนิคที่ทำให้ช่องสื่อสารถูกแบ่ง

ออกเป็นส่วนย่อยๆ โดยแต่ละส่วนจะเป็นช่องย่อยๆ ที่อิสระจากกันซึ่งการมอดูเลตที่ใช้สัญญาณพาหะหลายสัญญาณไม่ได้เป็นเทคโนโลยีที่ใหม่ เพราะว่ามันเกิดขึ้นเมื่อตั้งแต่ พ.ศ.2498 และถูกนำมาใช้โดยห้องปฏิบัติการโทรศัพท์เบลล์ (Bell Telephone Laboratories) ในปี พ.ศ.2508 เทคนิคโอเอฟดีเอ็มถูกนำไปประยุกต์ใช้ในกิจการสื่อสารทางทหาร ด้านระบบสื่อสารผ่านความถี่สูง (High Frequency: HF) เช่น ระบบ KINEPLEX ของบริษัท วิทยุคอลลินส์ และระบบโทรพิมพ์ที่ใช้การเลื่อนความถี่ ย่านแคบของเวสเทริน อิเล็กทริก (Western Electric) เป็นต้น ต้นแบบของการมอดูเลตที่ใช้สัญญาณพาหะหลายสัญญาณมีการทดลองใช้ โดยการกำเนิดจำนวนสัญญาณพาหะจากวงจรกำเนิดความถี่ ที่เป็นอิสระจากกัน ซึ่งเครื่องรับต้องการวงจรกรองแถบความถี่ผ่านย่านแคบ เพื่อใช้แยกแยะสัญญาณพาหะออกจากกันก่อนที่จะทำการดีมอดูเลต ทั้งนี้การใช้งานสมัยก่อนนั้นระบบค่อนข้างจะใหญ่ เทอะทะ ราคาแพง และอาจจะไม่สามารถ นำมาใช้กับงานในปัจจุบันได้ ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา การทำงานแบบการมอดูเลตที่ใช้สัญญาณพาหะหลายสัญญาณถูกพัฒนาขึ้นมาเป็นมาตรฐานสำหรับการส่งข้อมูลดิจิทัลความเร็วสูงบน เครือข่ายไร้สาย การเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของการติดต่อสื่อสารด้วยสัญญาณดิจิทัล รวมทั้งมีการนำเอาการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform: FFT) มาประยุกต์ใช้ ทำให้ความเป็นไปได้ในการพัฒนาโอเอฟดีเอ็มกลับมาใช้ในงานปัจจุบันสูง ซึ่งแท้จริงแล้วโอเอฟดีเอ็มกลายมาเป็นสิ่งที่น่าสนใจมากขึ้นเมื่อมีการนำเอาการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วมาใช้ในการกำเนิดสัญญาณพาหะที่มีลักษณะตั้งฉากกัน (orthogonal carriers)



รูปที่ 2.6 แสดงหลักการทำงานของมอดูเลตที่ใช้สัญญาณพาหะหลายสัญญาณ

2.4.1 ความหมายของโอเอฟดีเอ็ม

โอเอฟดีเอ็ม ย่อมาจาก Orthogonal Frequency Division Multiplex เป็นรูปแบบของการมอดูเลตที่ใช้สัญญาณพาหะหลายสัญญาณสมัยใหม่ที่มีการเพิ่มความหนาแน่นของสัญญาณพาหะย่อย และการซ้อนทับสัญญาณพาหะ ที่อยู่ติดกัน ซึ่งเป็นเทคนิคการมอดูเลชันแบบหลายคลื่นพาหะ (Multiple Carrier Modulation) และเป็นรูปแบบของการสื่อสารแบบขนาน แตกต่างจากมาตรฐานการแผ่สเปกตรัมทั่วไปที่ใช้แถบความถี่เดียวสำหรับรับส่งข้อมูลช่องเดียว

โอเอฟดีเอ็มเป็นเทคโนโลยีการเข้ารหัสในชั้นกายภาพ (Physical Layer) สำหรับถ่ายทอดสัญญาณผ่านทางคลื่นวิทยุ ซึ่งกระบวนการนี้จะเป็นการแบ่งสัญญาณความถี่ออกเป็นหลายๆ เซ็กเมนต์ (Segment) และในแต่ละเซ็กเมนต์จะมีความถี่เฉพาะตัวด้วยรหัสที่ต่างกัน ซึ่งจะทำให้สามารถรองรับความจุได้มากกว่า คลื่นวิทยุในความถี่เดียวกัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วโอเอฟดีเอ็มถูกใช้อยู่ในคลื่นความถี่ 2.4 GHz (ISM Band: Industrial, Scientific and Medical Radio Band) ซึ่งเป็นคลื่น

ความถี่มาตรฐานสำหรับมาตรฐาน เครือข่าย IEEE 802.11g ในขณะที่ IEEE 802.11a ถูกเลือกให้ใช้คลื่นความถี่ที่ 5 GHz (UNII Band: Unlicensed National Information Infrastructure Radio Band)

โอเอฟดีเอ็มสร้างขึ้นมาเพื่อใช้งานสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบเคลื่อนที่แบนด์กว้าง (Broad band) ที่มีอัตราการส่งข้อมูลสูงๆ เช่น ระบบ LAN แบบไร้สาย (Wireless LAN) ระบบอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงแบบไร้สาย (Wireless high speed internet) ระบบกระจายเสียงแบบดิจิทัล (Digital Audio Broadcasting: DAB) และระบบกระจายสัญญาณโทรทัศน์แบบดิจิทัล (Digital Television: DTV) เป็นต้น

2.4.1.1 ความถี่ที่ซ้อนกันและกันในระบบโอเอฟดีเอ็ม

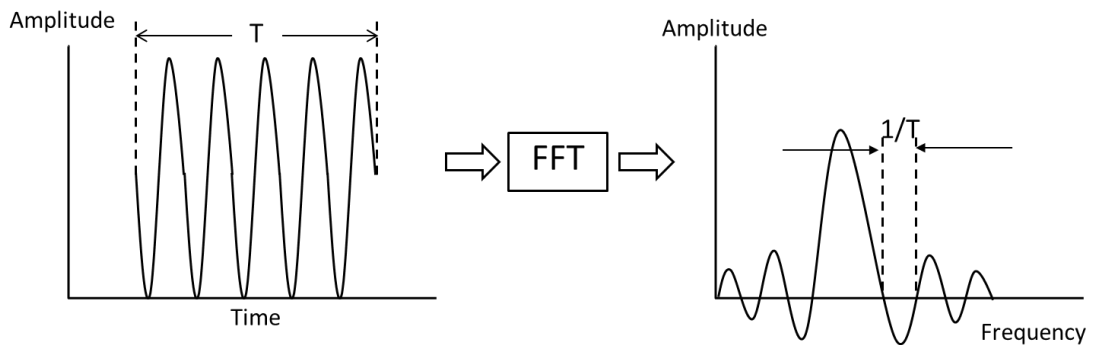
ความถี่ที่ซ้อนกันและกัน คือ การเกี่ยวข้องกันเป็นมอดูเลชันหรือมีส่วนประกอบเป็นมอดูเลชัน ความถี่ที่ซ้อนกันและกันมีความสัมพันธ์กันของแอมพลิจูด 2 เส้นในช่องว่างอาจจะตัดกันเป็นมอดูเลชันรูปเรขาคณิตก็ได้ ดังนั้นสัญญาณที่ซ้อนกันและกันหมายความว่าสถานะของสัญญาณเป็นอิสระจากกัน ตัวอย่างเช่น การมอดูเลชันสัญญาณทางความถี่ (Frequency Modulation: FM) และทางขนาด (Amplitude Modulation: AM) บนสัญญาณพาหะเดียวกัน (ในระบบโอเอฟดีเอ็มสเตอริโอ) สามารถแยกสัญญาณทั้งสองออกจากกัน โดยปราศจากการรบกวนซึ่งกันและกัน ซึ่งเราสามารถเรียกสัญญาณทั้งสองนี้ว่า ความถี่ที่ซ้อนกันและกัน สมมุติว่าในระบบสื่อสารใช้การมอดูเลชันแบบเลื่อนความถี่ (Frequency Shift Keying: FSK) โดยสัญญาณไบนารี กำหนดในบิต 0 แทนที่ด้วยความถี่หนึ่งที่เลื่อนออกไป สัญญาณการมอดูเลชันนี้สามารถแยกออกจากกันด้วยวงจรกรองความถี่ 2 ชุด ที่สามารถปรับเลือกความถี่ทั้งสองได้ วงจรกรองความถี่สำหรับบิต 1 จะไม่ตอบสนองกับสัญญาณบิต 0 และในทำนองเดียวกันในกรณีของวงจรกรองความถี่สำหรับบิต 0 เราเรียกวงจรมอดูเลชันแบบเลื่อนความถี่ว่า การจัดการสัญญาณไบนารีให้ซ้อนกันและกัน ในโอเอฟดีเอ็มความถี่ที่ซ้อนกันและกันเป็นการนำเอาสัญญาณพัลส์มาทำเป็นสัญญาณพาหะ ซึ่งทำให้สเปกตรัมของสัญญาณพาหะแต่ละตัวมีค่าสัญญาณเป็นศูนย์ที่กลางแถบความถี่ของแต่ละสัญญาณพาหะในระบบ ทั้งนี้ทำให้แต่ละสัญญาณพาหะย่อยสามารถแยกออกจากกลุ่มโดยปราศจากการแทรกสอด หรือรบกวนจากสัญญาณพาหะย่อยอื่นๆ ดังนั้นสัญญาณพาหะย่อยสามารถจัดวางไว้ใกล้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ในทางทฤษฎี

2.4.1.2 การแปลงฟูเรียร์และการแปลงกลับฟูเรียร์ของระบบโอเอฟดีเอ็ม

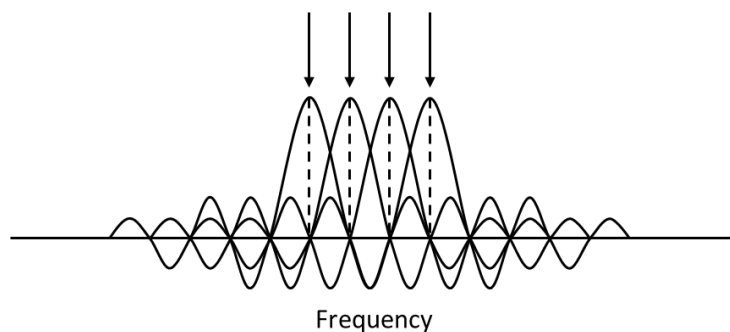
ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ของการแปลงฟูเรียร์เปรียบได้กับแท่งปริซึมที่กระจายแสงสีขาวออกเป็นแถบสีที่เป็นส่วนประกอบของแสงสีขาว การแปลงฟูเรียร์นั้นใช้สำหรับแยกสัญญาณออกเป็นส่วนประกอบทางความถี่ของสัญญาณนั้นๆ ซึ่งที่จริงแล้วการแปลงฟูเรียร์สามารถใช้ในการแก้ปัญหาที่หลากหลาย โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณในระบบนั้นๆ การจัดการกับสัญญาณดิจิทัลในระบบโอเอฟดีเอ็มเป็นวิธีการหนึ่งในการประยุกต์ใช้งานของการแปลงฟูเรียร์ การแปลงฟูเรียร์เป็นเทคนิคทางคณิตศาสตร์สำหรับแปลงฟังก์ชัน ที่มีแกนในเชิงเวลาเป็นฟังก์ชันที่มีแกนในเชิงความถี่โดยอยู่บนพื้นฐานที่ฟังก์ชันนั้นๆ จะต้องเป็นฟังก์ชันรายคาบด้วย ซึ่งจะแตกออกเป็นสมการแปลงฟูเรียร์ การแปลงฟูเรียร์เป็นการแยกหรือสลายรูปคลื่นหรือฟังก์ชันออกเป็นสัญญาณลักษณะขายนี่ที่มีความถี่ต่างกันและขนาดแรงดันต่างกัน ซึ่งผลรวมของสัญญาณขายนี่เหล่านี้เมื่อนำมารวมกันทางเฟสแล้วจะได้รูปคลื่นดั้งเดิมที่นำมาแยก ดังนั้นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอาจจะเปลี่ยนเป็นนิพจน์ของผลรวมรูปคลื่นขายนี่และโคขายนี่ได้ ตัวอย่างเช่น ในการส่งสัญญาณ

ดิจิทัลคือการส่งอนุกรมของสัญญาณขายนี่จะมีผลลัพธ์เหมือนกัน นั่นคือ การแปลงฟูเรียร์เป็นการแปลงสัญญาณจากแกนเวลาเป็นแกนความถี่โดยจะจัดเป็น นิพจน์ของอนุกรมสัญญาณความถี่เป็นองค์ประกอบ ส่วนการแปลงกลับฟูเรียร์แบบเร็ว (Inverse Fast Fourier Transform: IFFT) เป็นกระบวนการที่ตรงข้ามกันคือแปลงสัญญาณที่อยู่ในแกนความถี่ให้อยู่ในรูปแบบแกนเวลา ทำให้การคำนวณการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว และการแปลงกลับฟูเรียร์แบบเร็วของกลุ่มข้อมูลทั้ง ค่าจริง (Real) และค่าเชิงซ้อน (complex) สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว สัญญาณขายนี่ที่มีช่วงเวลาที่มืค่าจำกัด (T) สามารถแปลงเป็นสัญญาณสมมูลซิงค์ (Sinc Pulse: โดยสัญญาณซิงค์คือสัญญาณ $\sin x/x$) บนแกนความถี่ดังแสดงในรูปที่ 2.7

ซึ่งสัญญาณสมมูลซิงค์จะมีจุดตัดแกน x ทุกๆ ช่วงเวลา $1/T$ เมื่อ T เป็นช่วงเวลาช่องจำนวนสัญญาณบนแกนเวลา ดังนั้นถ้าสัญญาณพาหะย่อยมีช่วงห่างซึ่งกันและกันเท่ากับ $1/T$ ค่าสูงสุดจะเกิดขึ้นทุกๆ จุดตัดแกน x ทั้งนี้เนื่องจากการทับซ้อนกันของสัญญาณเหล่านี้จะไม่รบกวนซึ่งกันและกัน หรือในอีกทำนองหนึ่งอาจกล่าวได้ว่าสัญญาณมีการรักษาความตั้งฉากซึ่งกันและกัน แนวคิดดังกล่าวแสดงไว้ในดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 แสดงการแปลงฟูเรียร์ของสัญญาณที่ทำการมอดูเลตกับสัญญาณพาหะย่อย

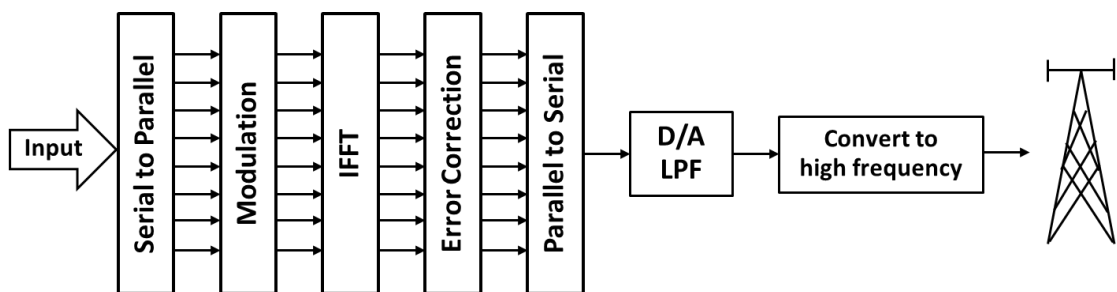


รูปที่ 2.8 แสดงการมัลติเพล็กซ์อนุกรมของสัญญาณบนแกนความถี่

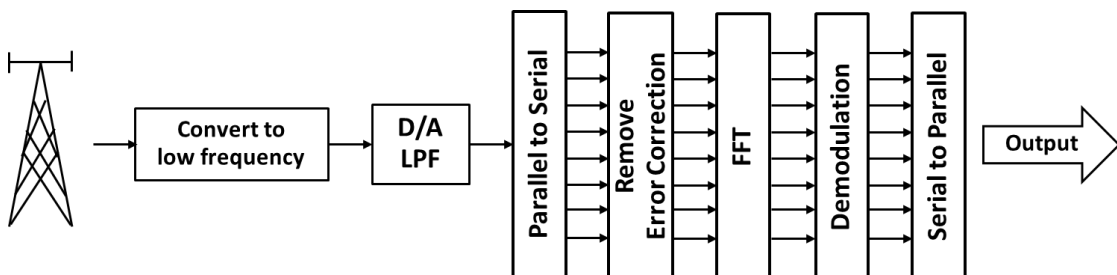
2.4.2 หลักการทำงานของระบบโอเอฟดีเอ็ม

โดยพื้นฐานแล้วโอเอฟดีเอ็มเป็นเทคนิคการมัลติเพล็กซ์โดยการแบ่งความถี่ เมื่อช่องความถี่ถูกแบ่งออกเป็นความถี่ขนาดเล็กๆ N ช่องสัญญาณย่อย แต่ละช่องสัญญาณย่อยมีขนาดเท่ากับขนาดของสัญลักษณ์ดิจิทัล (Digital Symbol) ซึ่งทำให้สัญญาณพาหะย่อยเหล่านี้มีความตั้งฉากซึ่งกันละกัน

ทางด้านส่งสัญญาณดิจิทัลความเร็วสูงที่ถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มข้อมูลที่ความเร็วต่ำลงจำนวนสิบหรือร้อยกลุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มข้อมูลย่อยที่มีความเร็วต่ำกว่า จะถูกนำไปมอดูเลตกับสัญญาณพาหะย่อยทั้งหมดส่งขนานกันออกไป รูปแบบในการมอดูเลตสัญญาณพาหะย่อยที่นิยมทั่วไปได้แก่ QAM (Quadrature Amplitude Modulation), 16QAM หรือ 64QAM เป็นต้น ในระบบโอเอฟดีเอ็มกลุ่มของข้อมูลจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปขนานกัน โดยการมอดูเลตกับสัญญาณพาหะย่อย ดังนั้นพวกมันจะกลายเป็นสัญญาณบนแกนความถี่ ในการที่จะแปลงกลับมาเป็นสัญลักษณ์บนแกนเวลาอีกครั้งนั้นทำได้โดยการใช้การแปลงกลับฟูเรียร์แบบเร็ว โดยที่สัญลักษณ์ทางแกนเวลาเหล่านี้จะถูกมัลติเพล็กซ์เข้าด้วยกันเป็นอนุกรมของสัญญาณ และสัญญาณที่ได้ทางขาออกของการแปลงกลับฟูเรียร์แบบเร็ว จะถูกส่งบนความถี่ที่เหมาะสมในระบบสื่อสารสัญญาณ ในระบบโอเอฟดีเอ็มแต่ละสัญญาณพาหะย่อยจะถูกทำให้รูปร่างมีความตั้งฉากซึ่งกันละกันกับสัญญาณพาหะย่อยอื่นๆ ด้วยวิธีการจัดการสัญญาณในลักษณะนี้ทำให้แม้แต่สัญญาณพาหะย่อยที่อยู่ใกล้กันซ้อนทับกันก็ไม่ก่อให้เกิดการรบกวนซึ่งกันละกัน ดังนั้นในระบบนี้จึงไม่ต้องการแถบป้องกัน (Guard Band) ระหว่างแต่ละช่องสื่อสารย่อย ทำให้ช่องสื่อสารระหว่างแต่ละสัญญาณพาหะย่อยมีความแคบที่สุดเท่าที่จะทำได้ ซึ่งทำให้ระบบนี้มีประสิทธิภาพในการใช้แถบความถี่สูงสุด ความสัมพันธ์ระหว่างทุกสัญญาณพาหะย่อยในระบบโอเอฟดีเอ็มจะต้องถูกควบคุมอย่างระมัดระวังเพื่อรักษาให้มีลักษณะของความตั้งฉากซึ่งกันและกัน การแปลงกลับฟูเรียร์แบบเร็วเป็นการแปลงที่มีประสิทธิภาพสูงมากและเป็นวิธีการขั้นตอนอย่างง่าย ๆ ที่สามารถทำให้เรามั่นใจได้ว่าสัญญาณพาหะที่สร้างขึ้นมามีความตั้งฉากซึ่งกันและกัน หลังจากการมอดูเลตแบบโอเอฟดีเอ็มจะมีการสอดแทรกช่วงแถบป้องกัน เพื่อลดสัญญาณรบกวนระหว่างสัญลักษณ์ (Inter symbol Interference: ISI) ที่เกิดจากสัญญาณหลายวิถี (Multipath Signal) เราเรียกแถบป้องกันแคบๆ นี้ว่า การเสริมไซคลิก (Cyclic prefix)



รูปที่ 2.9 แสดงบล็อกไดอะแกรมตัวส่งในระบบโอเอฟดีเอ็ม

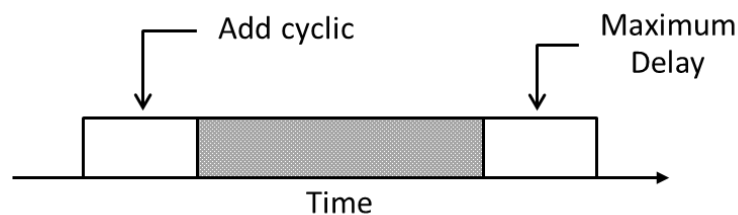


รูปที่ 2.10 แสดงบล็อกไดอะแกรมตัวรับในระบบโอเอฟดีเอ็ม

เครื่องรับจะดำเนินการบรรณการตรงกันข้ามกับเครื่องส่ง ในเครื่องรับจะใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็วแปลงสัญญาณที่อยู่บนแกนเวลาไปเป็นแถบความถี่สมมูลย์ ดังรูปที่ 2.10

2.4.2.1 การเสริมสร้างไซคลิก

เทคนิคนี้ใช้สำหรับแก้ไขสัญญาณที่คุณภาพลดลงในช่องสื่อสารอันเนื่องมาจาก สัญญาณมีการเคลื่อนที่หลายเส้นทางทำได้โดยการใช้ลำดับของแถบป้องกัน โดยเรียกว่า การเสริมไซคลิก การเสริมไซคลิกเป็นการคัดลอกส่วนท้ายสุดของสัญลักษณ์โอเอฟดีเอ็มให้มีความยาวเท่ากับหรือมากกว่า ค่าช่วงเวลาสูงสุดของการกระจายช่วงเวลาอัน เนื่องมาจากสัญญาณหลายเส้นทาง การเสริมไซคลิก จะถูกคัดลอกลงในส่วนหน้าของสัญลักษณ์โอเอฟดีเอ็มเพื่อทำหน้าที่เป็นแถบป้องกันการทับซ้อนระหว่างสัญลักษณ์ที่จะเกิดขึ้น ระหว่างการทำการส่งดังแสดงในรูปที่ 2.11 การแปลงจากข้อมูลแบบขนานไปเป็นแบบอนุกรมจะเกิดขึ้นหลังจากคัดลอกไซคลิกลงในตัวส่งโดยที่เครื่องส่งส่วนที่เรียกว่าแถบป้องกันจะถูกจำกัดออกไป ซึ่งทราบได้ก็ตามที่ช่วงห่างของแถบป้องกันมีค่ามากที่สุดของการหน่วงเวลา ในช่องสื่อสาร การทับซ้อนของสัญญาณที่รับมาจากหลายเส้นทางของสัญลักษณ์ก่อนหน้านี้จะถูกกำจัดออกไปด้วยซึ่งจะทำให้สัญญาณที่แท้จริงที่ต้องการรับยังคงมีความตั้งใจกันและกัน ซึ่งแน่นอนที่กระบวนการนี้ทำให้ช่วงเวลาที่ทำการเสริมไซคลิกไม่สามารถส่งข้อมูลข่าวสารได้ทำให้เกิดการสูญเสียเวลานี้ไป นอกจากนี้การเสริมไซคลิกยังทำให้เกิดข้อเสียในเรื่องกำลังงานและแถบความถี่ ในการส่งแต่ก็เป็นข้อตกลงเพื่อปรับเข้าหากันระหว่างสมรรถภาพและประสิทธิภาพ



รูปที่ 2.11 แสดงการเสริมสร้างไซคลิก

2.4.2.2 การปรับแต่งการมอดูเลตในระบบโอเอฟดีเอ็ม

เพื่อให้การทำงานง่ายขึ้นต่อระบบการมอดูเลตที่ใช้สัญญาณพาหะหลายสัญญาณส่วนใหญ่มักจะใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบคงที่สำหรับทุกสัญญาณพาหะย่อย ในระบบที่ใช้เทคนิคนี้จะต้องเลือกประเภทของการมอดูเลตทางดิจิทัล (Digital Modulation) สำหรับสัญญาณพาหะย่อยที่ยอมรับอัตราการผลิตของข้อมูล (Bit error rate) ได้ ภายใต้สภาวะของช่องสื่อสารที่แย่มาก โดยทั่วไปจะเลือกใช้ BPSK (Binary Phase Shift Keying) หรือ QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) ที่ 1 หรือ 2 บิตต่อวินาทีต่อเฮิร์ตซ์ตามลำดับ ในการส่งข้อมูลจากแหล่งข้อมูลหนึ่งไปยังหลายๆ ปลายทางของระบบโอเอฟดีเอ็มอาจจะทำได้โดยการเปลี่ยนแปลงเทคนิคทางมอดูเลตทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณภาพของสัญญาณที่สามารถรับได้ที่ปลายทาง ประเภทของการมอดูเลตที่นิยมใช้ประกอบด้วย BPSK, QPSK, 8PSK, 16QAM, หรือ 64QAM เช่น ถ้าสถานีปลายทางสามารถรับสัญญาณที่มีอัตราส่วนของสัญญาณรบกวนต่ำควรเลือกใช้การมอดูเลตแบบ QPSK จะดีกว่าแบบอื่นๆ เพราะว่าทำให้ประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลได้ดี อย่างไรก็ตามการเลือกใช้เทคนิคการมอดูเลตแต่

ละแบบยังขึ้นอยู่กับสถานะแถบความถี่ ที่ใช้ในการส่งอีกด้วย เพื่อให้ระบบสามารถยอมรับอัตราการผิดพลาดของข้อมูล เราสามารถจะเลือกเทคนิคการมอดูเลตโดยอัตโนมัติตามขนาดของแถบความถี่ที่ใช้การส่ง การปรับแต่ง(Adaptive) เทคนิคการมอดูเลตแบบนี้ทำให้คุณภาพการรับ-ส่งดีขึ้นไม่ว่าสถานะของช่องสื่อสารจะดีหรือไม่ดีก็ตาม สิ่งที่มาคือการปรับแต่งการมอดูเลตทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานแถบความถี่ของระบบด้วย

2.5 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการมอดูเลต

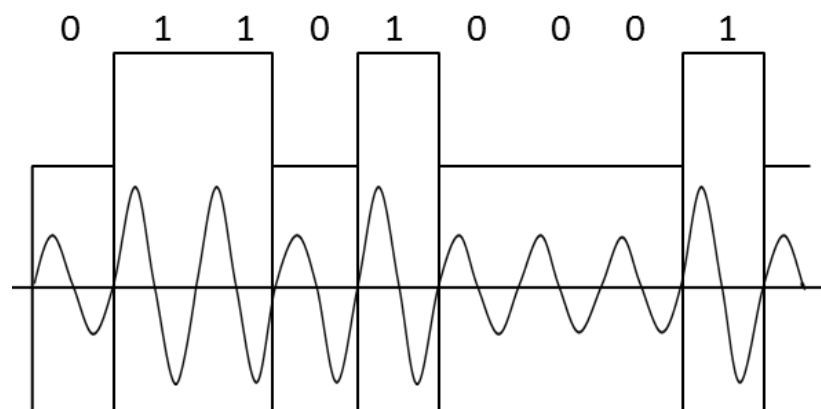
ในปัจจุบันการส่งสัญญาณข้อมูลดิจิทัลผ่านช่องทางสื่อสารแบบอนาล็อกที่เราคุ้นเคยกัน ได้แก่ การส่งข้อมูลคอมพิวเตอร์ผ่านทางเครือข่ายโทรศัพท์สาธารณะ เครือข่ายโทรศัพท์ถูกออกแบบมาเพื่อทำให้การสลับสวิทช์และส่งสัญญาณอนาล็อกซึ่งเป็นย่านความถี่เสียง หรือประมาณ 300-3,400 Hz อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลให้เป็นสัญญาณอนาล็อกย่านความถี่เสียงเราเรียกว่า โมเด็ม (MODEM: Modulator-Demodulator)

สำหรับเทคนิคการแปลงสัญญาณข้อมูลดิจิทัลให้ไปเป็นอนาล็อกนั้น มีดังต่อไปนี้

2.5.1 การมอดูเลตเชิงเลขทางแอมพลิจูด (Amplitude Shift Keying : ASK)

คำว่า Shift Keying มาจากระบบโทรเลขใน ทศวรรษที่ 19 การส่งโทรเลขจะใช้การเคาะเป็น Key เป็นรหัสมอร์ส (Morse code) และ Shift เป็นการเปลี่ยนแปลงกระแส (จากรหัส 0 เป็น 1) ในปฏิบัติการครั้งนี้จะทำการศึกษาลักษณะของสัญญาณไบนารี

การมอดูเลตวิธีนี้ ความถี่ของคลื่นพาหะ (Carrier Wave) ซึ่งทำหน้าที่นำสัญญาณแบบอนาล็อกผ่านตัวกลางสื่อสารนั้นจะคงที่ ลักษณะของสัญญาณที่มอดูเลตนั้น เมื่อค่าของบิตของสัญญาณข้อมูลดิจิทัลมีค่าเท่ากับ 1 ขนาดของคลื่นพาหะจะสูงกว่าตอนปกติ และเมื่อบิตมีค่าเท่ากับ 0 ขนาดของคลื่นพาหะจะตกลงกว่าปกติ การมอดูเลตแบบเชิงเลขทางแอมพลิจูด มักจะไม่ค่อยได้รับความนิยมเพราะจะถูกรบกวนจากสัญญาณอื่นได้ง่าย



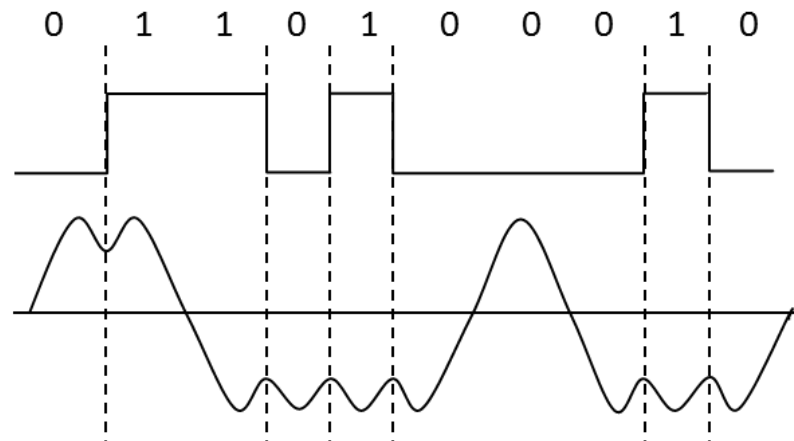
รูปที่ 2.12 การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกแบบ ASK

2.5.2 การมอดูเลตเชิงเลขทางเฟส (Phase - Shift Keying : PSK)

หลักการของวิธีการมอดูเลตเชิงเลขทางเฟส คือ ค่าของขนาดและความถี่ของคลื่นพาหะจะไม่มี การเปลี่ยนแปลง แต่ที่จะเปลี่ยนแปลงคือเฟสของสัญญาณ กล่าวคือ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงสถานะ

ของบิตจาก 1 ไปเป็น 0 หรือเปลี่ยนจาก 0 ไปเป็น 1 เฟสของคลื่นจะเปลี่ยน (Shift) ไป 180 องศาด้วย

ในการมอดูเลตทั้งสองแบบที่กล่าวมาข้างต้น วิธีการแบบการมอดูเลตเชิงเลขทางเฟสจะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นน้อยที่สุด ได้สัญญาณที่มีคุณภาพดีที่สุด แต่วงจรการทำงานจะซับซ้อนกว่า และราคาอุปกรณ์ก็แพงกว่า โดยปกติจะนำ PSK มาใช้กับโมเด็มที่มีความเร็วปานกลาง เช่น 2,400 หรือ 4,800 bps



รูปที่ 2.13 การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกแบบ PSK

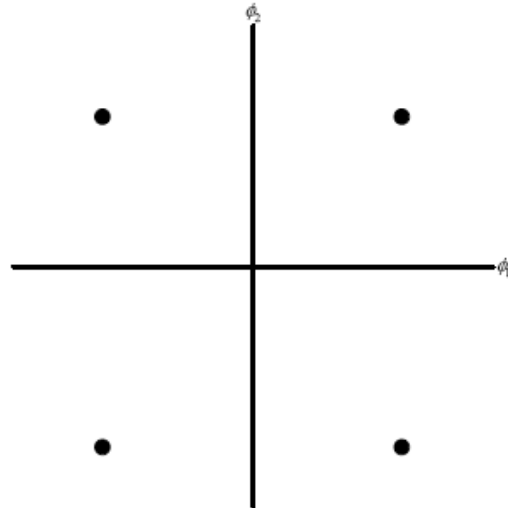
การมอดูเลตอีกวิธีหนึ่งที่มีความคล้ายคลึงกับ PSK คือ การมอดูเลตแบบ DPSK (Differential Phase Shift Keying) ซึ่งจะกำหนดให้เฟสเลื่อนไป 180 องศา ทุกครั้งที่ข้อมูลมีค่าเท่ากับ 1 แม้จะเป็น 1 ที่ติดกันก็ตาม แต่ถ้าเท่ากับ 0 ก็จะไม่เลื่อนเฟส

2.5.3 การมอดูเลตเชิงเลขทางขนาดและเฟส (Quadrature Amplitude Modulation : QAM)

การแปลงสัญญาณแบบ QAM (Quadrature Amplitude Modulation) เป็นการปรับปรุงวิธีการส่งสัญญาณโดยการเปลี่ยนทั้งเฟสและความสูงของคลื่น โดยกำหนดให้ขนาดของสัญญาณแบ่งออกเป็น 2 ระดับ คือ สูงและต่ำ (H และ L) และกำหนดการแบ่งเฟส (Φ) ออกเป็น 4 เฟส (0, 90, 180, 270 องศา หรือ Φ_{1-4}) และ 8 เฟส (0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 องศา หรือ Φ_{1-8}) เช่นเดียวกับการมอดูเลตแบบ PM ดังนั้นการส่งข้อมูลแบบแบ่งเป็น 4 เฟส จึงสามารถจะกระทำได้ $2 \times 4 = 8$ รูปแบบ ซึ่งสามารถกำหนดข้อมูลเป็นเลขฐานสองได้ทีละ 3 บิต (มาจาก $2^3 = 8$) แต่หากแบ่งเฟสเป็น 8 เฟส ก็จะสามารถทำได้ทั้งหมด $2 \times 8 = 16$ รูปแบบ ซึ่งสามารถกำหนดเป็นเลขฐานสองได้ทีละ 4 บิต (มาจาก $2^4 = 16$)

ตารางที่ 2.1 แสดงไบนารีของการมอดูเลต QAM แบบ 4 เฟส (8QAM)

(H,L) × Φ	$L\Phi_1$	$H\Phi_1$	$L\Phi_2$	$H\Phi_2$	$L\Phi_3$	$H\Phi_3$	$L\Phi_4$	$H\Phi_4$
เลขไบนารี	000	001	010	011	100	101	110	111

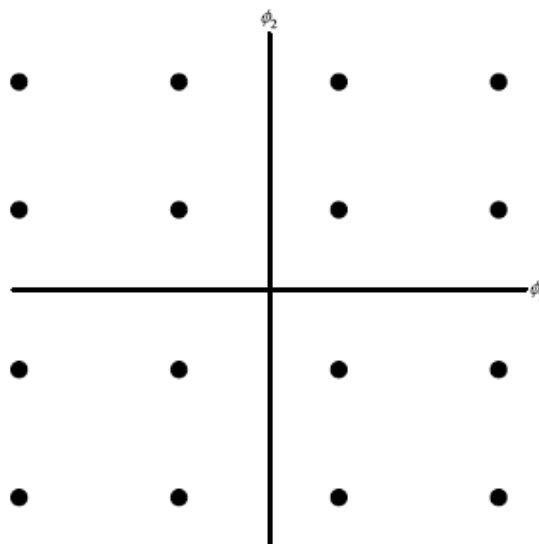


รูปที่ 2.14 การมอดูเลตแบบ QPSK

ตารางที่ 2.2 แสดงไบนารีของการมอดูเลต QAM แบบ 8 เฟส (16QAM)

(H,L) x Φ	$L\Phi_1$	$H\Phi_1$	$L\Phi_2$	$H\Phi_2$	$L\Phi_3$	$H\Phi_3$	$L\Phi_4$	$H\Phi_4$
เลขไบนารี	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111

(H,L) x Φ	$L\Phi_5$	$H\Phi_5$	$L\Phi_6$	$H\Phi_6$	$L\Phi_7$	$H\Phi_7$	$L\Phi_8$	$H\Phi_8$
เลขไบนารี	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111



รูปที่ 2.15 การมอดูเลตแบบ 16QAM

ดังนั้น ในการส่งข้อมูล QAM แบบ 8 เฟส ด้วยอัตราข้อมูล 2,400 ไบต์ต่อวินาที จึงสามารถส่งข้อมูลด้วยอัตราบิตเท่ากับ $2,400 \times 4 \text{ บิต} = 9,600 \text{ bps}$ และจะมีอัตราบิตสูงสุดได้ถึง 19,200 bps

สำหรับอัตราการส่งข้อมูล 4,800 บิตต่อวินาที และสูงสุด 14,400 bps เมื่อใช้กับเทคนิค QAM แบบ 4 เฟส ทำให้มีการนำเทคนิคการมอดูเลตแบบ QAM มาใช้กับโมเด็มความเร็วสูง (ตั้งแต่ 9,600 bps ขึ้นไป)

ตารางที่ 2.3 แสดงไบนารีของการมอดูเลต QAM แบบ 32 เฟส (64QAM)

$(H,L) \times \Phi$	$L\Phi_1$	$H\Phi_1$	$L\Phi_2$	$H\Phi_2$	$L\Phi_3$	$H\Phi_3$	$L\Phi_4$	$H\Phi_4$
เลขไบนารี	000000	000001	000010	000011	000100	000101	000110	000111

$(H,L) \times \Phi$	$L\Phi_5$	$H\Phi_5$	$L\Phi_6$	$H\Phi_6$	$L\Phi_7$	$H\Phi_7$	$L\Phi_8$	$H\Phi_8$
เลขไบนารี	001000	001001	001010	001011	001100	001101	001110	001111

$(H,L) \times \Phi$	$L\Phi_9$	$H\Phi_9$	$L\Phi_{10}$	$H\Phi_{10}$	$L\Phi_{11}$	$H\Phi_{11}$	$L\Phi_{12}$	$H\Phi_{12}$
เลขไบนารี	010000	010001	010010	010011	010100	010101	010110	010111

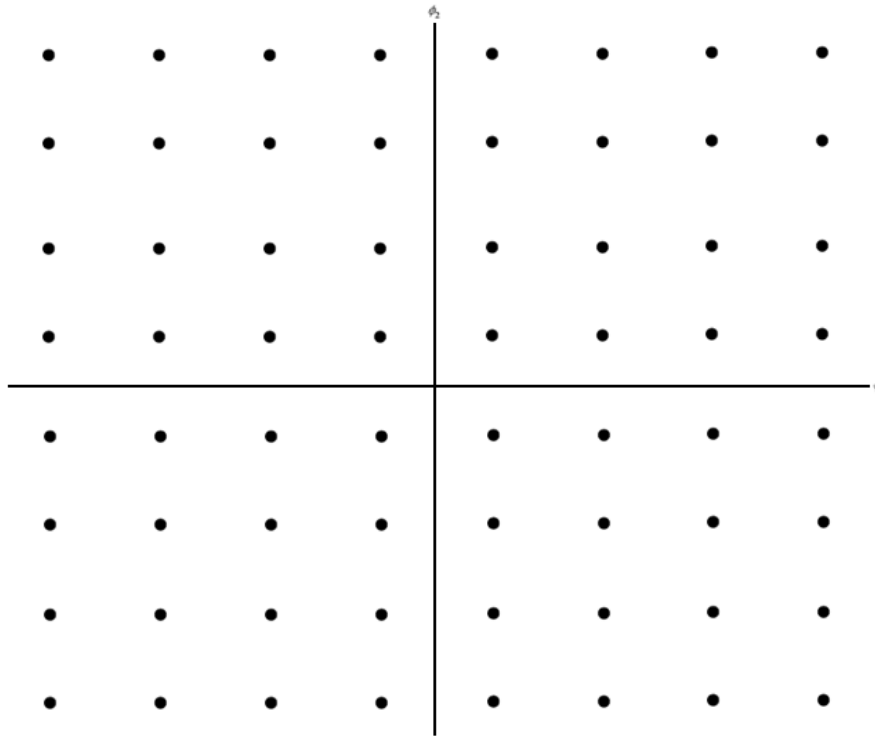
$(H,L) \times \Phi$	$L\Phi_{13}$	$H\Phi_{13}$	$L\Phi_{14}$	$H\Phi_{15}$	$L\Phi_{15}$	$H\Phi_{15}$	$L\Phi_{16}$	$H\Phi_{16}$
เลขไบนารี	011000	011001	011010	011011	011100	011101	011110	011111

$(H,L) \times \Phi$	$L\Phi_{17}$	$H\Phi_{17}$	$L\Phi_{18}$	$H\Phi_{18}$	$L\Phi_{19}$	$H\Phi_{19}$	$L\Phi_{20}$	$H\Phi_{20}$
เลขไบนารี	100000	100001	100010	100011	100100	100101	100110	100111

$(H,L) \times \Phi$	$L\Phi_{21}$	$H\Phi_{21}$	$L\Phi_{22}$	$H\Phi_{22}$	$L\Phi_{23}$	$H\Phi_{23}$	$L\Phi_{24}$	$H\Phi_{24}$
เลขไบนารี	101000	101001	101010	101011	101100	101101	101110	101111

$(H,L) \times \Phi$	$L\Phi_{25}$	$H\Phi_{25}$	$L\Phi_{26}$	$H\Phi_{26}$	$L\Phi_{27}$	$H\Phi_{27}$	$L\Phi_{28}$	$H\Phi_{28}$
เลขไบนารี	110000	110001	110010	110011	110100	110101	110110	110111

$(H,L) \times \Phi$	$L\Phi_{29}$	$H\Phi_{29}$	$L\Phi_{30}$	$H\Phi_{30}$	$L\Phi_{31}$	$H\Phi_{31}$	$L\Phi_{32}$	$H\Phi_{32}$
เลขไบนารี	111000	111001	111010	111011	111100	111101	111110	111111



รูปที่ 2.16 การมอดูเลตแบบ 64QAM

2.6 ความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity)

ความหลากหลายของช่องสัญญาณ หรือไดเวอร์ซิตี (Diversity) เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถช่วยให้การรับส่งสัญญาณมีคุณภาพที่ดีขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องมีการเพิ่มบิตรหัส (Code bits) รวมเข้ากับบิตข้อมูล (Data bits) อย่างที่ต้องใช้ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณ (Channel Codes) และยังไม่ต้องการส่งสัญญาณ ที่เรียกว่า Training sequence สำหรับใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์การคูณ ของวงจรรีคูเวอไลเซอร์ (Equalizer) ซึ่งหมายถึงว่า ไม่มีการแบ่งเอาแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณ ไปใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของการรับส่งสัญญาณเลย นอกจากนี้ ส่วนของอุปกรณ์ที่ต้องเพิ่มเข้ามา สำหรับการทำไดเวอร์ซิตี ก็มีราคาที่ไม่แพงจนเกินไป ดังนั้นเทคนิคไดเวอร์ซิตีจึงมีประโยชน์อย่างมาก ในทางปฏิบัติ

หลักการของไดเวอร์ซิตี คือ การอาศัยคุณสมบัติพื้นฐาน ของการแพร่กระจายคลื่นสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สาย ซึ่งมักจะมีเส้นทางการแพร่กระจายของสัญญาณหลายเส้นทาง และโดยทั่วไปแล้ว ถ้าหากการแพร่กระจายของคลื่นในเส้นทางหนึ่ง ถูกรบกวนอย่างมากจากการจางหายทำให้สัญญาณที่รับมามีกำลังที่อ่อนมาก ก็อาจจะมีคลื่นสัญญาณจากเส้นทางอื่น ที่ให้สัญญาณที่รับมามีกำลังสูง ดังนั้น ถ้าหากเราทำการติดตั้งจุดรับสัญญาณ มากกว่าหนึ่งแห่งก็จะสามารถรับสัญญาณได้จากหลายเส้นทาง จากนั้นระบบก็จะทำการเลือกเฉพาะสัญญาณที่มีกำลังสูงมาใช้ได้ ซึ่งวิธีการนี้สามารถช่วย ทำให้ค่า SNR ของสัญญาณที่ภาครับมีคุณภาพที่ดีขึ้นได้ถึง 20-30 dB สังเกตว่าคุณภาพของสัญญาณที่รับได้ดีขึ้น โดยที่ทางภาครับสัญญาณมิได้มีส่วนเกี่ยวข้องด้วยเลย ซึ่งวิธีการไดเวอร์ซิตีชนิดที่นิยมใช้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้ คือ

2.6.1 ไทเวอร์ซิตีทางเวลา (Time Diversity)

ไทเวอร์ซิตีทางเวลา (Time Diversity) คือ การส่งสัญญาณข้อมูลเดิมซ้ำ มากกว่าหนึ่งครั้ง ที่เวลาแตกต่างกัน โดยการส่งแต่ละครั้งจะต้องเว้นช่วงเวลาให้ห่างกันมากพอ คือ ต้องมากกว่าช่วง coherence time ของช่องสัญญาณ ผลที่ได้คือ ภาครับจะได้รับสัญญาณข้อมูลซ้ำหลายครั้ง โดยสัญญาณข้อมูลที่รับได้ในแต่ละครั้ง จะได้รับผลกระทบจากการจางหายในช่องสัญญาณด้วยลักษณะที่แตกต่างกัน ค่าของเวลาสั้น (Coherence time) ขึ้นอยู่กับค่าการแผ่แบบดอปเพลอร์ (Doppler spread) ของคลื่นสัญญาณ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเร็วในการเคลื่อนที่ และความถี่ของคลื่นพาห์ ตัวอย่างเบื้องต้น ของการใช้งานเทคนิคไทเวอร์ซิตีทางเวลา คือ วงจร RAKE receiver ในระบบซีดีเอ็มเอ

2.6.2 ไทเวอร์ซิตีทางความถี่ (Frequency Diversity)

ไทเวอร์ซิตีชนิดนี้ จะใช้ความถี่สองช่องสัญญาณ ระหว่างสายอากาศด้านส่งและด้านรับ ข้อมูลจะถูกส่งโดยเครื่องส่งสองตัว ซึ่งทำงานที่ความถี่แตกต่างกัน โดยสัญญาณทั้งสองจะถูกรวมกันไปสู่ท่อนำคลื่นและสายอากาศตามลำดับ โดยสัญญาณจะถูกส่งออกไปในสายอากาศเดียวกัน (แต่อาจมีโพลาริเซชันต่างกัน) ที่ด้านรับสายอากาศจะรับสัญญาณและผ่านท่อนำคลื่นไปยังตัวกรองความถี่แยกความถี่ทั้งสองออกมา เครื่องรับแต่ละตัวก็จะแยกสัญญาณข้อมูลออกมา ด้วยวิธีการดังกล่าวก็จะทำให้สามารถลดผลกระทบจากการจางหายได้ ถ้าหากการแยกกันของความถี่ของเครื่องส่งสัญญาณมีมาก การจางหายซึ่งเกิดเฉพาะที่ความถี่หนึ่งๆ จะมีโอกาสน้อยมากๆ ที่จะเกิดกับสัญญาณทั้งสองความถี่พร้อมๆ กัน จึงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้ระบบ สำหรับความถี่ที่ห่างกันประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ถือว่าเพียงพอ และยิ่งถ้าห่างกัน 5 เปอร์เซ็นต์ ก็จะดีมากที่สุด ข้อเสียของไทเวอร์ซิตีทางความถี่ คือ จะต้องใช้แถบความถี่มากกว่าปกติ จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับพื้นที่ในเมืองใหญ่ จำนวนช่องสัญญาณก็มีจำกัด การเพิ่มประสิทธิภาพของไทเวอร์ซิตีทางความถี่ถือว่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับไทเวอร์ซิตีแบบสเปซ จากการคำนวณพบว่าเพิ่มขึ้นเพียง 10 เท่า เท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีไทเวอร์ซิตี

2.6.3 ไทเวอร์ซิตีทางสเปซ (Space-Diversity) หรือ ไทเวอร์ซิตีทางสายอากาศ (Antenna-Diversity)

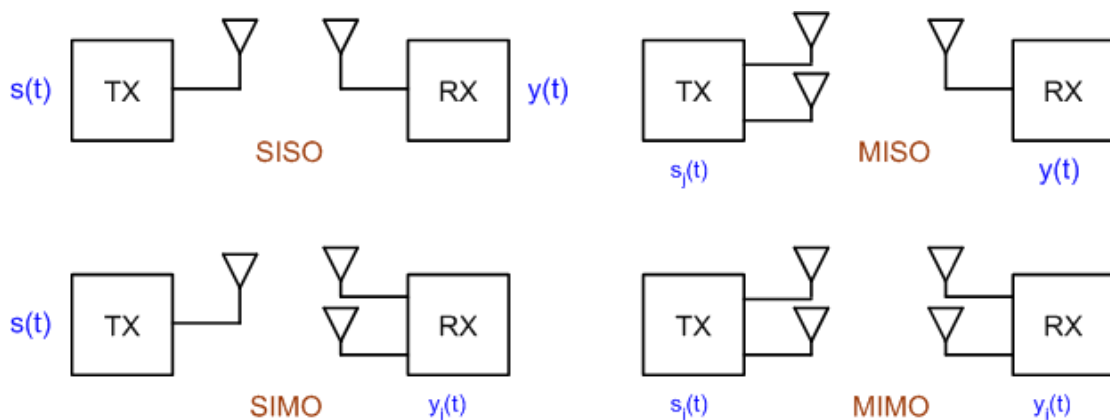
ไทเวอร์ซิตีชนิดนี้ เครื่องรับจะรับสัญญาณจากสายอากาศ ตั้งแต่สองต้นขึ้นไป ซึ่งติดตั้งอยู่ห่างกัน เป็นระยะหลายเท่าของความยาวคลื่น โดยสัญญาณที่ได้รับจากแต่ละสายอากาศจะถูกต่อเข้ากับตัวไทเวอร์ซิตีคอมไบเนอร์ (Diversity Combiner) ซึ่งหน้าที่ของตัวคอมไบเนอร์ก็คือ จะทำการเลือกสัญญาณที่ดีที่สุดหรือทำการรวมสัญญาณเข้าด้วยกัน ซึ่งก็แล้วแต่การออกแบบ สัญญาณจากด้านส่ง จะเดินทางเป็นเส้นตรงสองเส้นทางไปยังสายอากาศทางด้านรับทั้งสองต้น และสัญญาณจากเครื่องส่งอาจจะเดินทางไปในอีกหลายเส้นทางที่แตกต่างกัน และเส้นทางที่สัญญาณเกิดมีความต่างเฟสกับสัญญาณทางตรง ก็จะทำให้เกิดมัลติพาทเฟดดิ้งขึ้นที่สายอากาศด้านรับ แต่สายอากาศทั้งสองต้นนั้น จะไม่เกิดมัลติพาทเฟดดิ้ง ที่เหมือนกัน เพราะระยะทางของสายอากาศทั้งสองต้นแตกต่างกัน นั่นคือ แม้ว่าสัญญาณที่เดินทางในระยะทางจากสายอากาศด้านส่งไปยังสายอากาศด้านรับ ข้างใดข้างหนึ่ง อาจเกิดการหักล้างทางเฟสกัน แต่ในสายอากาศด้านรับอีกข้างหนึ่งก็จะไม่เกิดเหตุการณ์ดังกล่าว จากสถิติพบว่า การใช้ไทเวอร์ซิตีทางสเปซทำให้คุณภาพของสัญญาณดีขึ้นหลายร้อยเท่า ซึ่งเป็นที่น่าพอใจมาก และสายอากาศมักติดตั้งห่างกันเป็นระยะทาง 200 เท่า ของความยาวคลื่นที่ใช้ จากการค้นพบล่าสุด การจัดสายอากาศไทเวอร์ซิตีที่ดีที่สุดจะอยู่ในแนวนอนให้สายอากาศอยู่ห่างๆ กัน นอกจากนี้

การใช้ไดเวอร์ซิตีทางสเปซยังมีประสิทธิภาพดีกว่าไดเวอร์ซิตีทางความถี่ เพราะว่า ไดเวอร์ซิตีทางสเปซ ใช้ความถี่น้อยกว่า และใช้สำหรับช่องสัญญาณเพียงช่องเดียวก็จะประหยัดกว่าด้วย ไดเวอร์ซิตีแบบนี้มีประโยชน์ ที่ใช้ในการแก้ปัญหาผลกระทบจากการจางหาย เราจะใช้เทคนิคการรวมความหลากหลายของสัญญาณจากไดเวอร์ซิตีค่อมไบเนอร์ สำหรับช่องสัญญาณแบบ SIMO ซึ่งจะมีอยู่ 3 วิธีการหลักๆ คือ 1. วิธีการรวมสัญญาณแบบเลือก (Selection Combining), 2. วิธีการรวมสัญญาณแบบปรับค่า SNR ให้สูงสุด (Maximal Ratio Combining) และ 3. วิธีการรวมสัญญาณแบบกำหนดอัตราขยายให้เท่ากัน (Equal Gain Combining) โดยทั้งหมดนี้จะอธิบายอย่างละเอียด ในหัวข้อต่อไป

2.7 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบสื่อสารไร้สาย แบบหลายทางเข้า หลายทางออก

ช่วงแรกๆ ของงานวิจัยในระบบการสื่อสารไร้สาย จะเป็นการส่งผ่านข้อมูลในระบบโดยใช้สายอากาศที่ภาครับและภาคส่งเพียงแค่นั้นเดียว ที่เรียกว่า ระบบหนึ่งทางเข้า หนึ่งทางออก (Single-Input Single-Output System: SISO) ต่อมาได้มีการพัฒนางานวิจัยมาศึกษา ระบบการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศ (Multiple Antennas) ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งจะพบว่าเมื่อมีการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศนี้ ทำให้ความจุในระบบเพิ่มขึ้น สามารถรับส่งข้อมูลได้มากขึ้น โดยในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีการส่งข้อมูลแบบหลายสายอากาศนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ดังต่อไปนี้

1. ระบบหนึ่งทางเข้าหลายทางออก (Single-Input Multiple-Output System: SIMO) คือ ระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหนึ่งสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหลายสายอากาศ
2. ระบบหลายทางเข้าหนึ่งทางออก (Multiple-Input Single-Output System: MISO) คือ ระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหลายสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหนึ่งสายอากาศ
3. ระบบหลายทางเข้าหลายทางออก (Multiple-Input Multiple-Output System: MIMO) คือ ระบบที่ประกอบด้วย สายอากาศทางภาคส่งหลายสายอากาศ และสายอากาศทางภาครับหลายสายอากาศ เช่นกัน



รูปที่ 2.17 แสดงการรับส่งข้อมูลแบบสายอากาศเดียว และหลายสายอากาศ

2.7.1 สมรรถนะในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก

ในระบบทั้ง 3 รูปแบบนี้ ระบบหลายทางเข้าหลายทางออก จะให้สมรรถนะทางด้านความจุช่องสัญญาณสูงที่สุด จึงมีการวิจัยและพัฒนา รูปแบบ เพื่อนำมาใช้งานแทนระบบหนึ่งทางเข้า หนึ่งทางออก ซึ่งทำให้เกิดการพัฒนาสมรรถนะของระบบ ดังนี้

1. อัตราการขยายแถวลำดับ (Array Gain)

การใช้สายอากาศหลายๆ เสา จะทำให้อัตราการขยายของสัญญาณที่ออกมาจากสายอากาศมีค่าเพิ่มมากขึ้น ทำให้ระยะทาง (Range) และพื้นที่ครอบคลุม (Coverage) ในการส่งสัญญาณเพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในกรณีที่เพิ่มพื้นที่ที่ต้องการส่งสัญญาณให้กว้างขึ้น หรือกรณีที่จำนวนของผู้ใช้งานในพื้นที่นั้นมีอยู่ไม่มาก จะทำให้จำนวนการติดตั้งสถานีฐานลดลง เพราะพื้นที่ที่ครอบคลุมมีมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อดีที่ทำให้กำลังงานส่งจากตัวสถานีเคลื่อนที่ (โทรศัพท์มือถือ) มีค่าลดลง ตามอัตราการขยายของสายอากาศที่สถานีฐานนั้นมีมากขึ้น หรือค่าความไวที่สายอากาศแถวลำดับที่สถานีฐานรับได้มีมากขึ้นนั่นเอง

2. อัตราการขยายไดเวอร์ซิตี (Diversity Gain)

ค่ากำลังของสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงที่ไม่แน่นอนตามการลดทอนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ เทคนิคไดเวอร์ซิตีจึงเป็นวิธีที่มีประโยชน์มากในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการจางหายนั้นๆ ดังนั้นระบบสื่อสารหลายทางเข้าหลายทางออก จึงมีการใช้สายอากาศภาคส่ง MT เสา และสายอากาศภาครับ MR เสา ที่มีการจางหายเป็นอิสระต่อกัน เมื่อส่งสัญญาณออกไปจะทำให้ภาครับสามารถรวมสัญญาณที่เข้ามาได้ โดยลดปัญหาเรื่องของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังของสัญญาณในระบบออกไปได้มาก เมื่อเทียบกับระบบสื่อสารหนึ่งทางเข้าหนึ่งทางออก

3. กำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (Spatial Multiplexing Gain)

ช่องสัญญาณในระบบสื่อสารหลายทางเข้า หลายทางออก จะมีการเพิ่มขึ้นของความจุช่องสัญญาณในระบบเป็นเส้นตรง และมีค่าเท่ากับค่าที่น้อยที่สุดระหว่างจำนวนสายอากาศที่ภาคส่งและภาครับ โดยไม่มีผลต่อค่ากำลังงานหรือการใช้แบนด์วิดท์ ค่ากำลังขยายของการส่งหลายระยะทาง (Spatial Multiplexing Gain) จะส่งผลให้ความจุของช่องสัญญาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการส่งแบบหลายระยะทางนั้น ทางภาคส่งจะทำการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกันออกจากสายอากาศแต่ละเสา ภายใต้เงื่อนไขของช่องสัญญาณที่มีการแพร่กระจายของสัญญาณมากพอ (Rich Scattering) ทำให้ทางภาครับสามารถแยกสัญญาณต่างๆ ออกจากกันได้

4. การลดการแทรกสอด (interference reduction)

การแทรกสอดแบบร่วมภายในช่องสัญญาณ (Co-channel Interference) เกิดจากการใช้ความถี่ซ้ำ (Frequency reuse) เมื่อมีการใช้สายอากาศหลายๆเสา จะเกิดความแตกต่างระหว่างระยะห่างของสัญญาณที่ต้องการกับสัญญาณที่อยู่ในช่องสัญญาณข้างเคียง จึงทำให้สามารถลดการแทรกสอดได้

2.7.2 เทคนิคการส่งสัญญาณในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก

ในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีช่องสัญญาณเป็นแบบหลายทางเข้าหลายทางออก จะมีเทคนิคการส่งข้อมูลอยู่หลายเทคนิค แต่ก็สามารถจัดกลุ่มรวมกันตามเทคนิคหลักๆ ได้ 2 กลุ่ม คือ

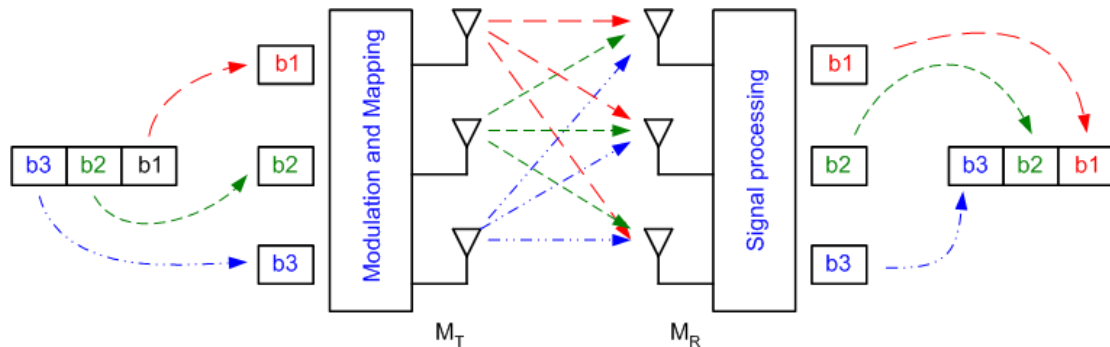
1. การเข้ารหัสเชิงปริภูมิเวลา (space-time coding)

เทคนิคนี้จะใช้สายอากาศที่เพิ่มเข้ามาในระบบ มาช่วยกันเข้ารหัส เพื่อให้ได้ไดเวอร์ซิตีทางปริภูมิเวลา ทำให้ข้อมูลที่ส่งมีความน่าเชื่อถือ และมีความทนทานต่อการผิดพลาดมากขึ้น เมื่อช่อง

สัญญาณที่ส่งผ่านเป็นแบบที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ ซึ่งวิธีการส่งแบบนี้มีข้อดี คือ มีรูปแบบการส่งสัญญาณที่ง่ายและมีความซับซ้อนต่ำ

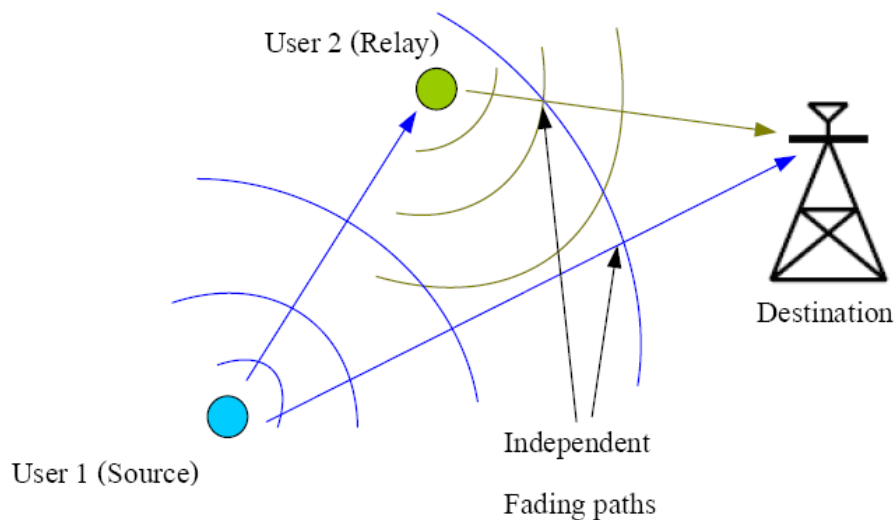
2. การมัลติเพล็กซ์ทางปริภูมิ (spatial multiplexing)

เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้า หลายทางออก ซึ่งเทคนิคการส่งข้อมูลแบบนี้จะให้อัตราการส่งข้อมูลที่สูง โดยขั้นตอนการส่ง จะมีการส่งข้อมูลที่เป็นอิสระกันทั้งหมด M_T ค่า (เท่ากับจำนวนของสายอากาศที่ภาคส่ง) ต่อหนึ่งคาบสัญลักษณ์ คือ ข้อมูลที่ถูกส่งไปในแต่ละสายอากาศจะเป็นข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แบบจำลองการมัลติเพล็กซ์เชิงปริภูมิ

2.8 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับระบบรีเลย์คอปอเรทีฟ (Cooperative Relay)



รูปที่ 2.19 แสดงระบบรีเลย์คอปอเรทีฟ

ระบบรีเลย์คอปอเรทีฟ คือ ระบบสื่อสารที่อาศัยผู้ใช้งานในโครงข่ายระบบสื่อสารไร้สาย (Wireless Communication Network) ทำหน้าที่รับสัญญาณและช่วยส่งต่อสัญญาณที่รับได้ไปยังเครื่องรับปลายทางร่วมกัน โดยผู้ใช้ที่ส่งสัญญาณเป็นคนแรก เรียกว่า เครื่องส่ง (Source) และผู้ใช้ที่ทำหน้าที่ช่วยส่งต่อสัญญาณ เรียกว่า รีเลย์ (Relay) [9] ดังแสดงในรูปที่ 2.19 ซึ่งการช่วยส่งต่อ

สัญญาณจะทำให้เกิดการเพิ่มความหลากหลายของช่องสัญญาณ (Diversity gain) ขึ้นเหมือนในระบบสื่อสารไร้สายแบบหลายทางเข้าหลายทางออก และส่งผลทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลลดลง ข้อดีของระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมืออีกประการหนึ่งคือ การช่วยเพิ่มพิสัย (range) ในการสื่อสารของผู้ใช้งานในโครงข่ายสื่อสารไร้สาย เนื่องจากผู้ใช้งานที่อยู่ใกล้เครื่องรับปลายทางสามารถช่วยส่งต่อข้อมูลของผู้ส่งซึ่งอยู่ห่างไกลออกไปมากๆ ได้ ซึ่งทำให้การใช้พลังงานไฟฟ้าอันจำกัดจากแบตเตอรี่ของผู้ส่งข้อมูลในระบบลดลงได้ ทำให้สามารถสื่อสารได้นานขึ้น

2.8.1 โพรโตคอลสำหรับระบบรีเลย์คอปเปอร์เททีฟ

ในปัจจุบันได้มีการนำเสนอโพรโตคอลสำหรับระบบสื่อสารไร้สายแบบร่วมมือไว้ 3 รูปแบบ[11] ดังต่อไปนี้

1. โพรโตคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง (Fixed Relaying Protocol)

โพรโตคอลแบบนี้มีหลักการ คือ มีการกำหนดจำนวนและระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็น รีเลย์คงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดการสื่อสาร โพรโตคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนน้อยที่สุด

2. โพรโตคอลแบบเลือก (Selecting Relaying Protocol)

โพรโตคอลแบบนี้จะมีหลักการ คือ ไม่มีการกำหนดจำนวนและระบุผู้ใช้งานเพื่อทำหน้าที่เป็น รีเลย์ที่คงที่ โดยมีวิธีการเลือกผู้ใช้งาน เพื่อทำหน้าที่เป็นรีเลย์จากค่าขนาดของสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณระหว่างเครื่องส่งและผู้ใช้ที่จะถูกเลือกเป็นรีเลย์ที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งโพรโตคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนมากกว่าโพรโตคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง

3. โพรโตคอลแบบมีการป้อนกลับ (Incremental Relaying Protocol)

โพรโตคอลแบบนี้จะมีลักษณะคล้ายๆ กับโพรโตคอลแบบเลือก Relay เพียงแต่มีการเพิ่มเงื่อนไขการเลือกผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์มากขึ้น และจุดเด่นของโพรโตคอลนี้ก็คือ เครื่องรับจะทำการส่งข้อความตอบกลับไปยังผู้ใช้ทุกคน เพื่อให้ทราบสถานะของการส่งสัญญาณในแต่ละครั้ง หากการส่งข้อมูลนั้นไม่มีความผิดพลาด เครื่องรับจะส่งข้อความกลับมายังผู้ใช้ทุกคน เพื่อให้รับทราบสถานะของการส่งที่สมบูรณ์จึงทำให้ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์ไม่ต้องส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ แต่ถ้าหากการส่งข้อมูลเกิดความผิดพลาด เครื่องรับจะส่งข้อความกลับมายังผู้ใช้ทุกคน เพื่อรับทราบสถานะของการส่งที่ไม่สมบูรณ์และมีการร้องขอให้มีการส่งข้อมูลใหม่จากผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์โพรโตคอลแบบนี้จะมีความซับซ้อนสูงที่สุด

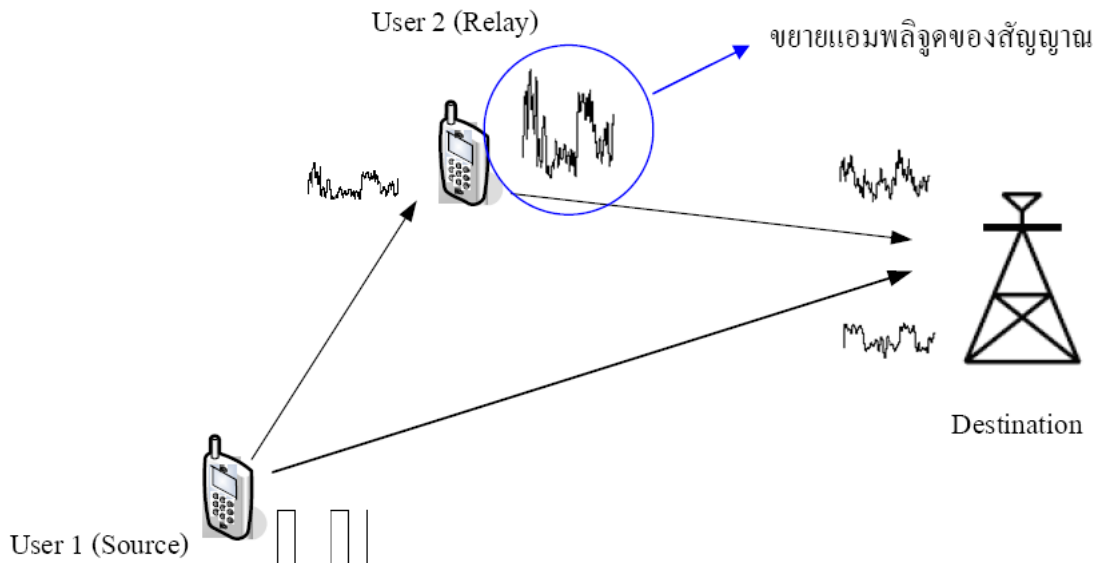
การหาประสิทธิภาพของโพรโตคอลทั้งหมดนี้สามารถทำได้โดย การหาความน่าจะเป็นของสัญญาณที่ขาดหาย (Outage probability) [9] และจะเห็นได้ว่าโพรโตคอลในแต่ละแบบจะมีความซับซ้อนแตกต่างกัน และมีประสิทธิภาพที่ต่างกันด้วย โดยโพรโตคอลแบบมีการป้อนกลับจะมีประสิทธิภาพสูงสุด และโพรโตคอลแบบไม่เปลี่ยนแปลง จะมีประสิทธิภาพต่ำสุด

2.8.2 รูปแบบของระบบรีเลย์คอปเปอร์เททีฟ

การส่งต่อสัญญาณจากรีเลย์ไปยังเครื่องรับ สามารถแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบด้วยกัน คือ [10]

2.8.2.1 ระบบรีเลย์แบบขยายและส่งต่อ (Amplify-and-Forward: AF)

ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์ จะทำการขยายสัญญาณที่รับได้ให้มีขนาดแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนด แล้วส่งต่อไปยังเครื่องรับปลายทาง ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 การส่งต่อสัญญาณแบบขยายและส่งต่อ

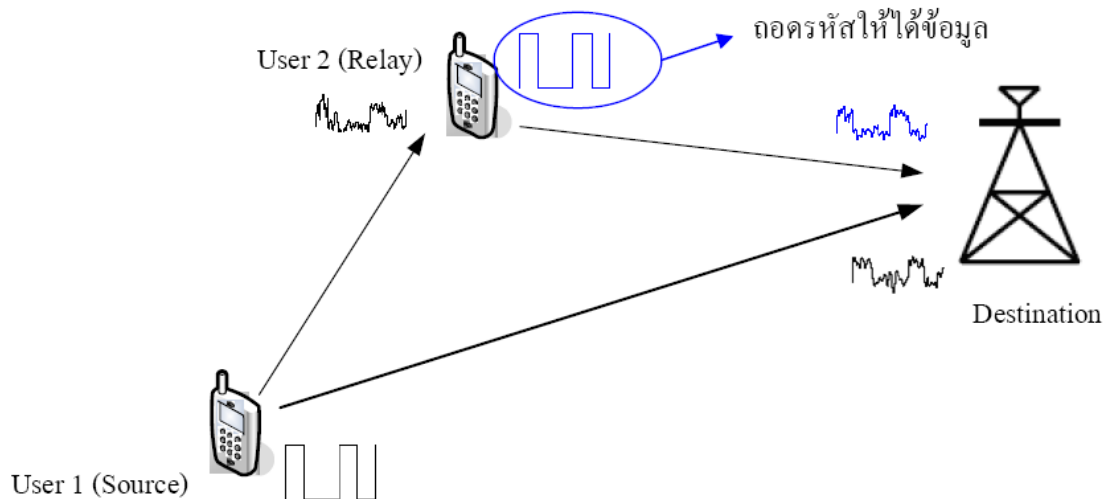
จากการจำลองและการเข้าถึงช่องสัญญาณในรูปที่ 2.20 รีเลย์จะทำการขยายสัญญาณที่รับได้ให้มีแอมพลิจูดสูงขึ้นตามเกณฑ์ที่กำหนด และส่งต่อสัญญาณที่ได้รับไปยังเครื่องรับ ซึ่งผลของข้อมูลที่ได้ จะเป็นดังสมการที่ 2.1

$$x_R(n) = \beta Y_{SR}(n) \quad ; n = \frac{T}{2} + 1..T \quad (2.1)$$

เมื่อ	$Y_{SR}(n)$	คือ สัญญาณที่รีเลย์รับได้จากเครื่องส่ง
	β	คือ อัตราการขยายแอมพลิจูดสัญญาณ $\beta \leq \sqrt{\frac{1}{ a_{SR} ^2 P_1 + N_0}}$
	T	คือ ช่วงเวลาใดๆ ที่ใช้ในการรับ- ส่งสัญญาณ
และ	h_{SR}	คือ ช่องสัญญาณสำหรับการส่งข้อมูลระหว่างเครื่องส่งและรีเลย์
	N_0	คือ แวเรียนซ์ของสัญญาณรบกวนแบบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก (AWGN)

2.8.2.2 ระบบรีเลย์แบบถอดรหัสและส่งต่อ (Decode-and-Forward: DF)

ผู้ใช้ที่ทำหน้าที่เป็นรีเลย์จะถอดรหัสสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณเดิมที่ส่งมาจากเครื่องส่ง แล้วส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 การส่งต่อสัญญาณแบบถอดรหัสและส่งต่อ

จากการจำลองและการเข้าถึงช่องสัญญาณในรูปที่ 2.21 รีเลย์จะทำการถอดรหัสสัญญาณเพื่อให้ได้สัญญาณเดิมที่ส่งมาจากเครื่องส่ง แล้วส่งต่อสัญญาณไปยังเครื่องรับ ซึ่งข้อมูลที่ได้เป็นดังสมการที่ 2.2

$$x_R[n] = \hat{x}_S[n] \quad ; n = \frac{T}{2} + 1 \dots T \quad (2.2)$$

เมื่อ $\hat{x}_S[n]$ คือ ข้อมูลจากเครื่องส่ง ซึ่งถูกถอดรหัสจากรีเลย์

2.8.3 วิธีการรวมสัญญาณในช่องสัญญาณที่มีความหลากหลาย

เนื่องจากระบบสื่อสารไร้สายแบบรวมมือ มีการรับสัญญาณชุดเดียวกันจากเครื่องส่งและรีเลย์ ในแต่ละช่องสัญญาณที่แตกต่างกันจึงต้องมีการรวมสัญญาณ[7] เพื่อให้ได้สัญญาณที่ดีที่สุดไปใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น ระบบสื่อสารไร้สายมีความหลากหลายของช่องสัญญาณมีเท่ากับ 2 ดังนั้น จึงทำให้สามารถรวมสัญญาณ ได้ดังนี้

เมื่อกำหนดให้ $f_1(t)$ เป็นสัญญาณที่รับมาจากช่องสัญญาณ h_1 และ $f_2(t)$ เป็นข้อมูลที่รับมาจากช่องสัญญาณ h_2 ดังนั้นผลรวมของสัญญาณของแต่ละช่องสัญญาณเท่ากับ

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) \quad (2.3)$$

ถ้าพิจารณาระบบสื่อสารที่มีความหลากหลายทางด้านรับมีจำนวนเท่ากับ N สามารถรวมสัญญาณได้ดังสมการที่ 2.4

$$f(t) = f_1(t) + f_2(t) + \dots + f_N(t) = \sum_{j=1}^N f_j(t) \quad (2.4)$$

เนื่องจากระบบที่ทำการศึกษาคือระบบที่มีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น จึงทำให้ระบบมีอัตราการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณ a_j แสดงได้ดังสมการที่ 2.5

$$f(t) = a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) + \dots + a_N f_N(t) = \sum_{j=1}^N a_j f_j(t) \quad (2.5)$$

โดย กำหนดให้

$$f_j(t) = x_j(t) \cdot m(t) + n_j(t)$$

$x_j(t)$ คือ กำลังที่ใช้สำหรับการข้อมูลจากเครื่องส่ง

$m(t)$ คือ ข้อมูลที่ต้องการส่ง

a_j คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณ

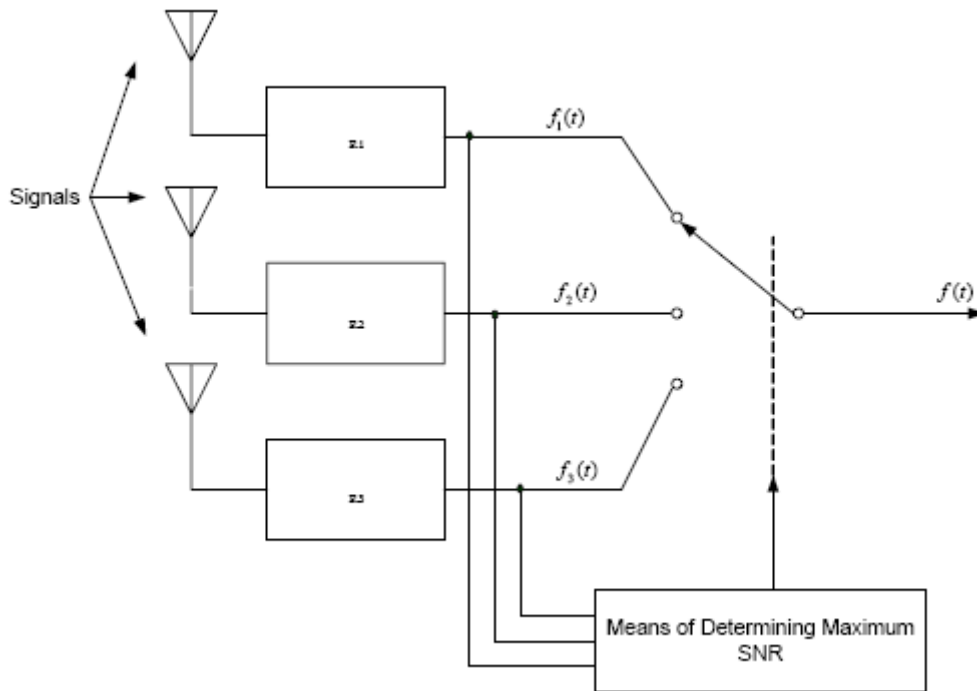
$n_j(t)$ คือ สัญญาณรบกวนของแต่ละช่องสัญญาณทางด้านเครื่องรับ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอวิธีการรวมสัญญาณแบบเลือก

วิธีการนี้จะทำการรวมสัญญาณโดยเลือกสัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณที่ดีที่สุดเพียง 1 สัญญาณเท่านั้น ซึ่งจะทำการพิจารณาเลือกสัญญาณที่มีค่า สัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR) มากที่สุด ของสัญญาณที่รับมาทั้งหมด จากสมการที่ 2.5 กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละช่องสัญญาณได้ดังนี้

$$a_j(t) = \begin{cases} 1, & \text{for } j = k \\ 0, & \text{for } j \neq k \end{cases} \quad (2.6)$$

เมื่อกำหนดให้ k คือ ช่องสัญญาณที่ถูกเลือก ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 วิธีการรวมสัญญาณแบบเลือก

2.9 พารามิเตอร์ที่ใช้วัดสมรรถนะของระบบ และความหมายของค่าต่างๆ

1. อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล (Bit Error Probability: BER)

อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูล หรือความน่าจะเป็นของบิตที่ผิดพลาด คือ อัตราส่วนของจำนวนบิตข้อมูล ที่ทางภาครับตัดสินผิดพลาดเมื่อเทียบกับจำนวนบิตข้อมูลทั้งหมดที่ถูกส่งมาจากภาคส่ง เป็นค่าพารามิเตอร์สำคัญในการวัดสมรรถนะของระบบ เป็นค่าที่แสดงถึงค่าความถูกต้องของการรับส่งข้อมูลโดยตรง อัตราความผิดพลาดบิตเป็นพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบที่สนใจในสถานะต่างๆ เช่น เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน หรือเมื่อจำนวนผู้ใช้เปลี่ยนไป เป็นต้น

2. อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio: SNR)

ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน คือ อัตราส่วนกำลังของสัญญาณเมื่อเทียบกับกำลังของสัญญาณรบกวน ส่วนใหญ่ค่ากำลังของสัญญาณจะมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่ากำลังของสัญญาณรบกวน ดังนั้นค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจึงนิยามวัดกันในหน่วยเดซิเบล (Decibel: dB) โดยค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสำหรับผู้ใช้คนที่ k ในค่าหน่วยเดซิเบล สามารถเขียนได้ดังสมการที่ 2.7

$$SNR_k = 10 \log \left(\frac{A_k^2}{\sigma^2} \right) \quad (2.7)$$

เมื่อ A_k คือ ขนาดของสัญญาณของผู้ใช้คนที่ k
 σ^2 คือ ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน ซึ่งก็คือ กำลังงานของสัญญาณรบกวนนั่นเอง

3. อัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput)

ในแง่ของการสื่อสารข้อมูล ค่าอัตราเร็วในการส่งข้อมูล (Throughput) คือ ความสำเร็จของการนำส่งข้อมูลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งมักกำหนดในหน่วยบิตต่อวินาที (bps) โดยค่าอัตราเร็วในการส่งข้อมูลนี้มีได้หมายถึง อัตราเร็วสูงสุดของระบบที่สามารถรับส่งได้

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Bits}}{\text{Times}} \quad (2.8)$$

Bits คือ ข้อมูลที่สามารถส่งได้ในเวลานั้นๆ

Times คือ เวลาที่ใช้ในการส่งข้อมูล

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

บทที่แล้วได้กล่าวถึงทฤษฎี ข้อดีของระบบ M-ary QAM OFDM และ คอเพอเรทีฟไดเวอริจิตี้ ที่ได้จากการใช้ระบบรีเลย์แบบเลือกช่องที่ดีที่สุด ซึ่งบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลอง ขั้นตอนและวิธีการทดลองของงานวิจัยนี้

3.1 แบบจำลองระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอเพอเรทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด

ระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์แบบคอเพอเรทีฟ ประกอบด้วยระบบ M-ary QAM OFDM และ ระบบการส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอเพอเรทีฟแบบเลือกช่องที่ดีที่สุด

3.1.1 ระบบ M-ary QAM OFDM

ในรูปที่ 3.1 แสดงแบบจำลองของ M-ary QAM ในระบบโอเอฟดีเอ็ม ซึ่งระบบนี้จะมีองค์ประกอบคล้ายกับที่ใช้สำหรับระบบ DMT ใน Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) แต่ด้วยการมอดูเลตที่แต่ละช่องสัญญาณย่อยไม่เปลี่ยนแปลง จากสูตรอัตราความผิดพลาดบิต สำหรับ $M=4$ (QPSK) ที่ Single Carrier [1]

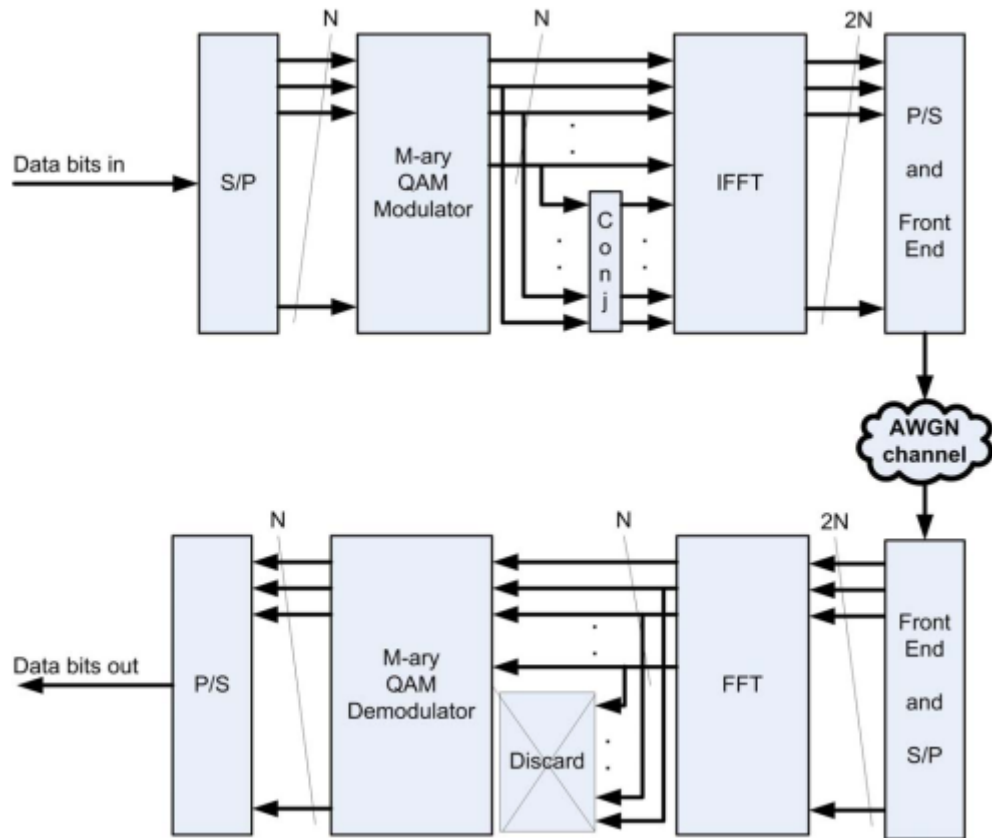
$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_o}} \right) \quad (3.1)$$

สำหรับ $M=4$ (QPSK) ที่ N ช่องสัญญาณย่อย

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{(2^{\sqrt{N}} - 1)}{2^{\sqrt{N}-1}} \cdot \frac{E_b}{N_o}} \right) \quad (3.2)$$

สำหรับ $M=16, 64, 256, \dots$

$$P_e = \frac{\sqrt{M} - 1}{\sqrt{M} \log_2 \sqrt{M}} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{(2^{\sqrt{N}} - 1)}{2^{\sqrt{N}-1}} \cdot \frac{3 \cdot \log_2 M \cdot E_b}{2 \cdot (M - 1) \cdot N_o}} \right) \quad (3.3)$$



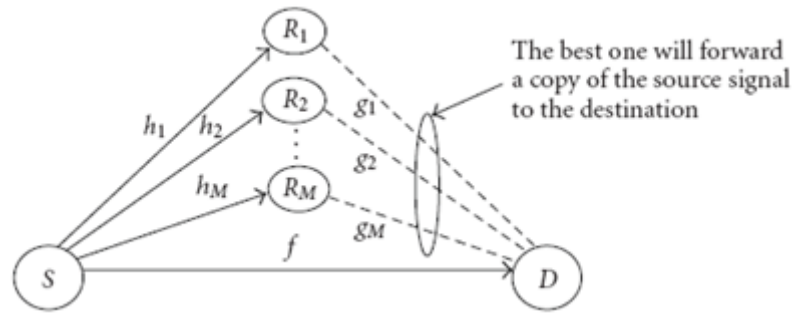
รูปที่ 3.1 แบบจำลอง M-ary QAM ในระบบโอเอฟดีเอ็ม

ภาคส่งของระบบโอเอฟดีเอ็ม เริ่มต้นโดยการแปลงข้อมูลแบบอนุกรมเป็นแบบขนาน เพื่อแบ่งระบบคลื่นพาห์เดียวเป็นหลายๆ คลื่นพาห์ โดยแบ่งเป็น N ช่องสัญญาณย่อย จากนั้น นำไปมอดูเลตทางแอมพลิจูดเชิงเลขทางขนาดและเฟส จากนั้น เพิ่มจำนวนช่องสัญญาณย่อยแบบคอนจูเกต อีก N ช่องสัญญาณย่อย ก่อนนำไปทำการแปลงกลับฟูรีเยร์ และ แปลงข้อมูลแบบขนานเป็นแบบอนุกรม ก่อนส่งออกอากาศ

ในส่วนภาครับของระบบโอเอฟดีเอ็ม เริ่มต้นโดยการแปลงข้อมูลแบบอนุกรมเป็นแบบขนาน เพื่อแบ่งระบบคลื่นพาห์เดียวเป็นหลายๆ คลื่นพาห์ โดยแบ่งเป็น $2N$ ช่องสัญญาณย่อย จากนั้นนำไปทำการแปลงฟูรีเยร์ แล้วตัดข้อมูลออกครึ่งหนึ่ง ก่อนนำไปถอดรหัสทางแอมพลิจูดเชิงเลขทางขนาดและเฟส และ แปลงข้อมูลแบบขนานเป็นแบบอนุกรม

3.1.2 ระบบการส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด

ในรูปที่ 3.2 แสดงแบบจำลองรีเลย์ ต้นทางส่งข้อมูลไปยังปลายทางโดยตรง และส่งผ่านรีเลย์ โดยเลือกเฉพาะรีเลย์ที่ส่งข้อมูลดีที่สุด ระบบนี้ปลายทางจะเลือกรับเพียง 2 เส้นทางที่ส่งมาจากต้นทาง ข้อมูลแรกรับโดยตรงมาจากต้นทาง และข้อมูลที่สองรับมาจากรีเลย์ที่ดีที่สุด



รูปที่ 3.2 แบบจำลองรีเลย์คอพอเรทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด

สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณระหว่างต้นทางและรีเลย์ตัวที่ i แทนด้วยตัวแปร $R_i(h_i)$ สัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณระหว่างรีเลย์ตัวที่ i และปลายทาง แทนด้วยตัวแปร $D(g_i)$ และสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณระหว่างต้นทางและปลายทาง แทนด้วยตัวแปร $D(f)$ โดยใช้สัมประสิทธิ์แบบ Rayleigh fading โดยสัมประสิทธิ์ h_i , g_i และ f เป็นอิสระต่อกัน และไม่เหมือนกันในแต่ละเส้นทาง i และ i ซึ่งระบบนี้มีสัญญาณรบกวนสีขาวแบบเกาส์ในทุกเส้นทาง แทนด้วยตัวแปร N_o

สมมติว่า อัตราขยายของแต่ละรีเลย์เท่ากับ $\sqrt{1/(E_s h_i^2 + N_o)}$ [6] โดยรักษาให้กำลังส่งของรีเลย์อยู่ภายใต้ข้อจำกัดเมื่อสัมประสิทธิ์ความชิตจาง h_i มีค่าต่ำ ตัวแปร E_s คือ พลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณของต้นทาง โดยอัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวน (Signal to Noise Ratio : SNR) ของเส้นทางที่ผ่านรีเลย์ $S \rightarrow R_i \rightarrow D$ สามารถเขียนได้ตามสมการ

$$\gamma_{S \rightarrow R_i \rightarrow D} = \frac{\gamma_{h_i} \gamma_{g_i}}{\gamma_{h_i} + \gamma_{g_i} + 1} \quad (3.3)$$

โดย $\gamma_{h_i} = h_i^2 E_s / N_o$ คือ อัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวนระหว่างต้นทางและรีเลย์ R_i ขณะนั้น และ $\gamma_{g_i} = g_i^2 E_s / N_o$ คือ อัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวนระหว่างรีเลย์ R_i และปลายทาง ตัวแปร E_s คือ พลังงานที่ใช้ในการส่งสัญญาณของรีเลย์ R_i การเลือกรีเลย์ที่ดีที่สุดนั้น เลือกจากรีเลย์ที่มี อัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวนที่มากที่สุดจากต้นทางไปปลายทางโดยผ่านรีเลย์ สมมติว่า ใช้เทคนิคอัตรารวมสูงสุด(Maximum ratio combining : MRC) ที่ปลายทาง ดังนั้น อัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวนรวมของระบบ สามารถเขียนได้ตามสมการ

$$\gamma_{tot} = \gamma_f + \max_i \left(\frac{\gamma_{h_i} \gamma_{g_i}}{\gamma_{h_i} + \gamma_{g_i} + 1} \right) \quad (3.4)$$

โดย $\gamma_f = f^2 E_s / N_o$ คือ อัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวนระหว่างต้นทางและปลายทาง ในการใช้อัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวนรวมของระบบในการหาความผิดพลาด สมการ (3.3) ควรจะแสดงอยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย [7] ดังนั้น จึงเสนอ $\gamma_{S \rightarrow R_i \rightarrow D}$ ในรูปแบบตามสมการ

$$\gamma_{S \rightarrow R_i \rightarrow D} \leq \gamma_i = \min(\gamma_{h_i}, \gamma_{g_i}) \quad (3.5)$$

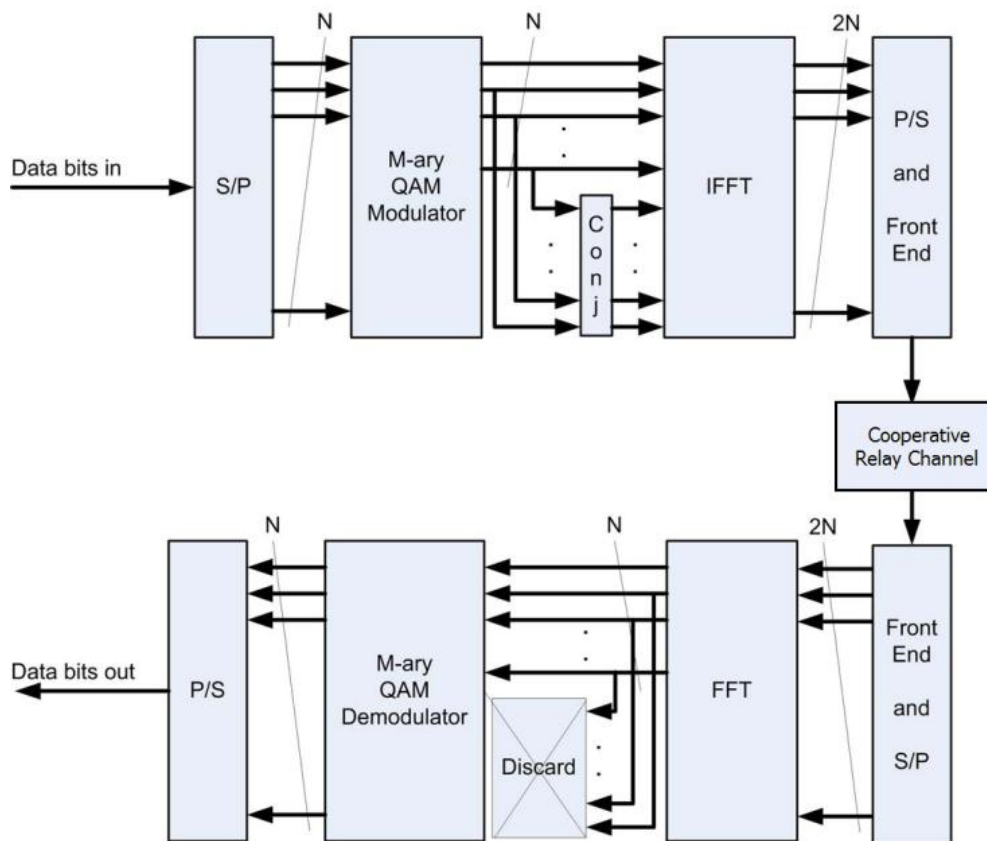
PDF ของ γ_i สามารถแสดงในรูปของค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวน $\overline{\gamma_{h_i}} = E(h_i^2)E_s / N_o$ และ $\overline{\gamma_{g_i}} = E(g_i^2)E_s / N_o$ โดย $E(\bullet)$ คือ การหาค่าเฉลี่ยทางสถิติ โดย $f_{\gamma_i}(\gamma) = (1/\overline{\gamma_i})e^{-\gamma/\overline{\gamma_i}}$ ที่ $\overline{\gamma_i} = \overline{\gamma_{h_i}}\overline{\gamma_{g_i}} / (\overline{\gamma_{h_i}} + \overline{\gamma_{g_i}})$ จากตัวแปรข้างต้น อัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวนรวมของระบบในสมการที่ (3.4) สามารถเขียนใหม่ได้ตามสมการ

$$\gamma_{tot} \leq \gamma_f + \gamma_b \quad (3.6)$$

โดย $\gamma_b \leq \min(\gamma_i) = \max_i(\min(\gamma_{h_i}, \gamma_{g_i}))$ ซึ่งการประมาณของอัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวนรวมของระบบในสมการที่ (3.6) ให้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องกว่าในสมการที่ (3.4)

3.1.3 ระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด

ในรูปที่ 3.3 แสดงแบบจำลอง M-ary QAM ในระบบโอเอฟดีเอ็ม โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 3.3 แบบจำลอง M-ary QAM ในระบบโอเอฟดีเอ็มโดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์

การทดลองในงานวิจัยนี้ ภาคส่งของระบบโอเอฟดีเอ็ม เริ่มต้นโดยการแปลงข้อมูลแบบอนุกรม เป็นแบบขนาน เพื่อแบ่งระบบคลื่นพาห์เดียวเป็นหลายๆ คลื่นพาห์ โดยแบ่งเป็น N ช่องสัญญาณย่อย 1, 4, 16 และ 64 ช่องสัญญาณย่อย จากนั้น นำไปมอดูเลตทางแอมพลิจูดเชิงเลขทางขนาดและเฟส QPSK, 16QAM และ 64QAM จากนั้น เพิ่มจำนวนช่องสัญญาณแบบคอนจูเกต อีก N ช่องสัญญาณย่อย ก่อนนำไปทำการแปลงกลับฟูเรียร์แบบเร็ว และ แปลงข้อมูลแบบขนานเป็นแบบอนุกรม ก่อนส่ง ออกอากาศ โดยส่งผ่านรีเลย์จำนวน 1-4 ตัว

ในส่วนภาครับของระบบโอเอฟดีเอ็ม จะรับสัญญาณแบบผ่านและไม่ผ่านรีเลย์ เริ่มต้นโดยการ แปลงข้อมูลแบบอนุกรมเป็นแบบขนาน เพื่อแบ่งระบบคลื่นพาห์เดียวเป็นหลายๆ คลื่นพาห์ โดย แบ่งเป็น $2N$ ช่องสัญญาณย่อย จากนั้นนำไปทำการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว แล้วตัดข้อมูลออกครึ่งหนึ่ง ก่อนนำไปตีมอดูเลตทางแอมพลิจูดเชิงเลขทางขนาดและเฟส และ แปลงข้อมูลแบบขนานเป็นแบบ อนุกรม

โดยในส่วนการเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุดจากรีเลย์นั้น เลือกจากรีเลย์ที่มีอัตราส่วนของสัญญาณ ที่ส่งต่อสัญญาณรบกวนรวมของระบบมากที่สุด โดยคิดจากสัมประสิทธิ์ของช่องสัญญาณในแต่ละช่วง

3.2 ขั้นตอนการทำงานของระบบ

1. สร้างข้อมูล สัญญาณรบกวนและช่องสัญญาณแบบสุ่ม (Random Integer Signal)
2. แปลงข้อมูลแบบอนุกรมเป็นแบบขนานโดยแบ่งเป็น N ช่องสัญญาณย่อย
3. นำไปมอดูเลตทางแอมพลิจูดเชิงเลขทางขนาดและเฟส แบบ QPSK, 16QAM และ 64QAM
4. คอนจูเกตสัญญาณ และเพิ่มเข้าไปในระบบอีก N ช่องสัญญาณย่อย 1, 4, 16 และ 64 ช่องสัญญาณย่อย
5. ทำการแปลงกลับฟูเรียร์แบบเร็ว
6. แปลงข้อมูลแบบขนานเป็นแบบอนุกรม
7. เพิ่มสัญญาณรบกวนสีขาวแบบเกาส์
8. ส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอเพอเรทีฟ
9. คำนวณค่าอัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวนรวมจากต้นทางไปยังปลายทาง โดยผ่านรีเลย์ อัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวนรวมค่าอัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อ สัญญาณรบกวน
10. เปรียบเทียบค่าอัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวนรวมของเส้นทางที่ผ่านรีเลย์ แล้วเลือกอัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวนสูงกว่าส่งข้อมูล
11. รวมสัญญาณทั้งหมดทั้งที่มีการสื่อสารแบบไม่มีรีเลย์และแบบมีรีเลย์
12. แปลงข้อมูลแบบอนุกรมเป็นแบบขนาน โดยแบ่งเป็น $2N$ ช่องสัญญาณย่อย
13. นำไปทำการแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว แล้วตัดข้อมูลออกครึ่งหนึ่ง
14. นำไปถอดรหัสทางแอมพลิจูดเชิงเลขทางขนาดและเฟส แบบ QPSK, 16QAM และ 64QAM
15. แปลงข้อมูลแบบขนานเป็นแบบอนุกรม
16. ตรวจสอบการวนกลับของการคำนวณค่าอัตราส่วนของสัญญาณที่ส่งต่อสัญญาณรบกวน แล้วเปรียบเทียบใหม่ จนกระทั่งจำนวนบิตข้อมูลหมด จึงสิ้นสุดการทำงาน

3.3 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.1 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าที่ใช้
วิธีการมอดูเลต	OFDM
รูปแบบการมอดูเลต	QPSK, 16QAM, 64QAM
จำนวนช่องสัญญาณย่อย	1, 4, 16, 64 ช่องสัญญาณ
จำนวนไซคลิก	1 เท่าของจำนวนช่องสัญญาณย่อย
จำนวนรีเลย์	1-4 ตัว
อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน	1-15 dB
แบนด์วิท	15 kHz
จำนวนรอบในการจำลอง	3000 รอบ

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในบทนี้แสดงผลการทดลองจำลองแบบระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด โดยเปรียบเทียบความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิต สำหรับการส่งข้อมูลแบบต่างๆ เช่น การมอดูเลตแบบ M-ary QAM OFDM แบบไม่ส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่แบบไม่เลือกช่องสัญญาณ และ แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด

ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้กำหนดให้มีการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่แบบขยายและส่งต่อ (Amplify and Forward) โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

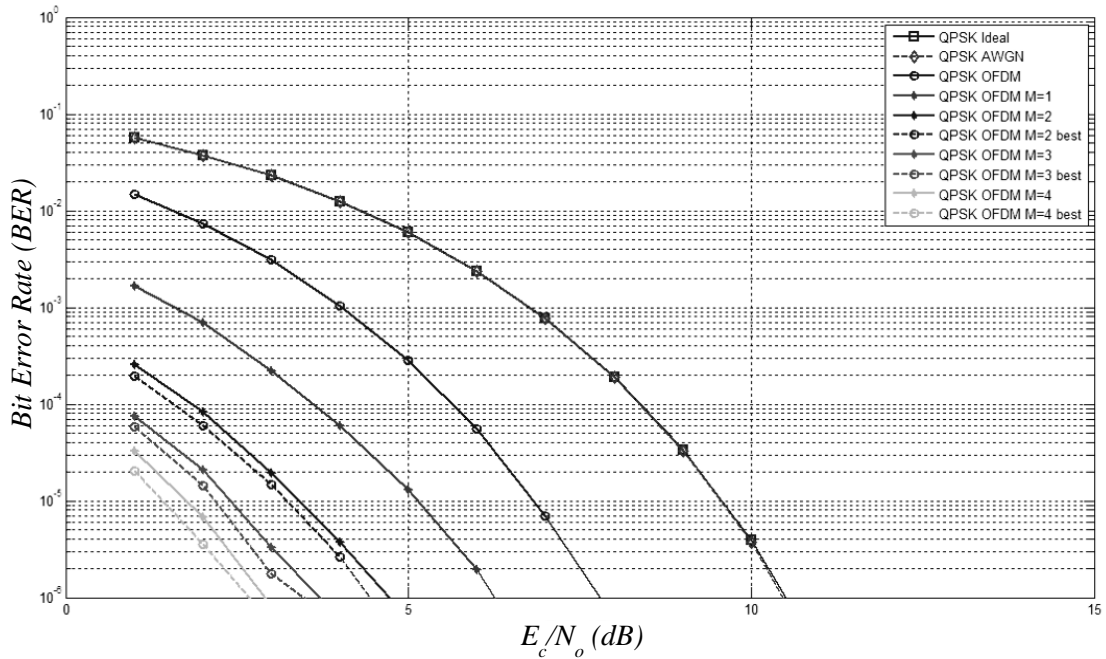
1. จำนวนบิตข้อมูลเท่ากับ 6400 บิต
2. อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเท่ากับ 1 ถึง 15 dB
3. ทดสอบความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตจำนวน 3000 รอบ

แสดงการเปรียบเทียบความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตของการส่งข้อมูลแบบต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

4.1 การทดลองระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่แบบต่างๆ

ทดลองระบบ M-ary QAM OFDM โดยมอดูเลตทางแอมพลิจูดเชิงเลขทางขนาดและเฟส แบบ 4 สัญลักษณ์ ตามเงื่อนไขดังนี้

1. มอดูเลตทางแอมพลิจูดเชิงเลขทางขนาดและเฟส แบบ QPSK
2. จำนวนช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 16 ช่องสัญญาณย่อย
3. ส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่
 - a. ส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่ 1 ตัว
 - b. ส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่ 2 ตัว
 - c. ส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่ 2 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด
 - d. ส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่ 3 ตัว
 - e. ส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด
 - f. ส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่ 4 ตัว
 - g. ส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์ที่ 4 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด
4. แบนด์วิทในการส่งข้อมูลช่องสัญญาณย่อยละ 15 kHz



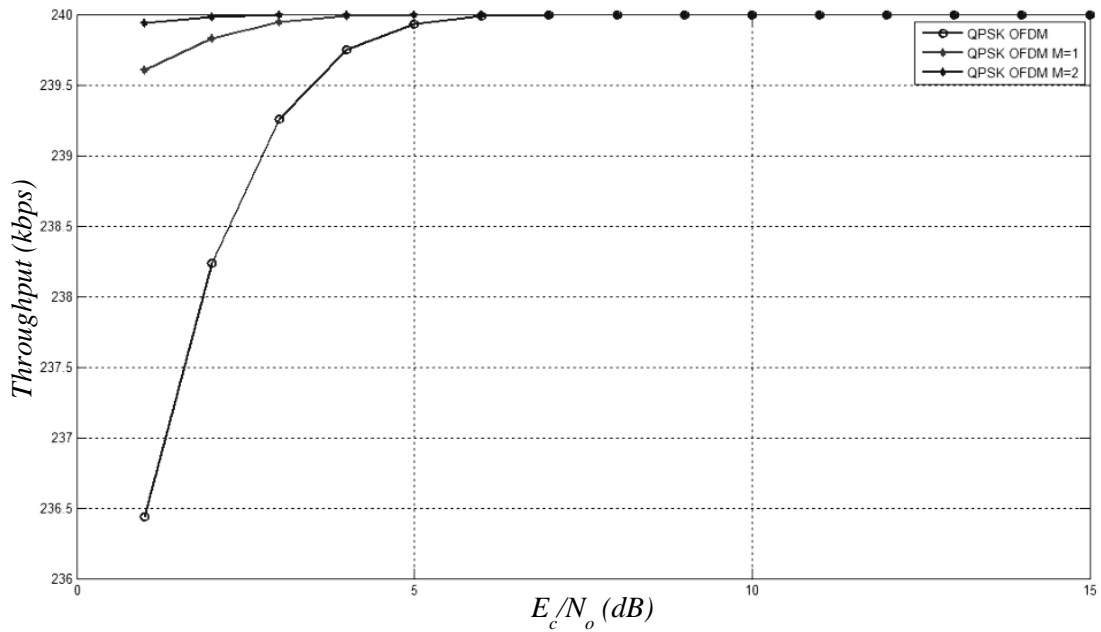
รูปที่ 4.1 เปรียบเทียบความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตของระบบ QPSK-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟแบบต่างๆ

จากรูปที่ 4.1 เปรียบเทียบความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตของระบบ QPSK-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด และการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟแบบปกติ สำหรับจำนวนรีเลย์ที่ต่างกัน พบว่า หากต้องการความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-5} สำหรับระบบ QPSK-1 จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 9.5 dB สำหรับระบบ QPSK-16 จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 7.5 dB สำหรับระบบ QPSK-16 โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 1 ตัว จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 6.9 dB สำหรับระบบ QPSK-16 โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 2 ตัว จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 3.47 dB สำหรับระบบ QPSK-16 โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 2 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 3.18 dB สำหรับระบบ QPSK-16 โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 3 ตัว จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 2.5 dB สำหรับระบบ QPSK-16 โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 2.05 dB สำหรับระบบ QPSK-16 โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 4 ตัว จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 1.77 dB สำหรับระบบ QPSK-16 โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 4 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 1.29 dB

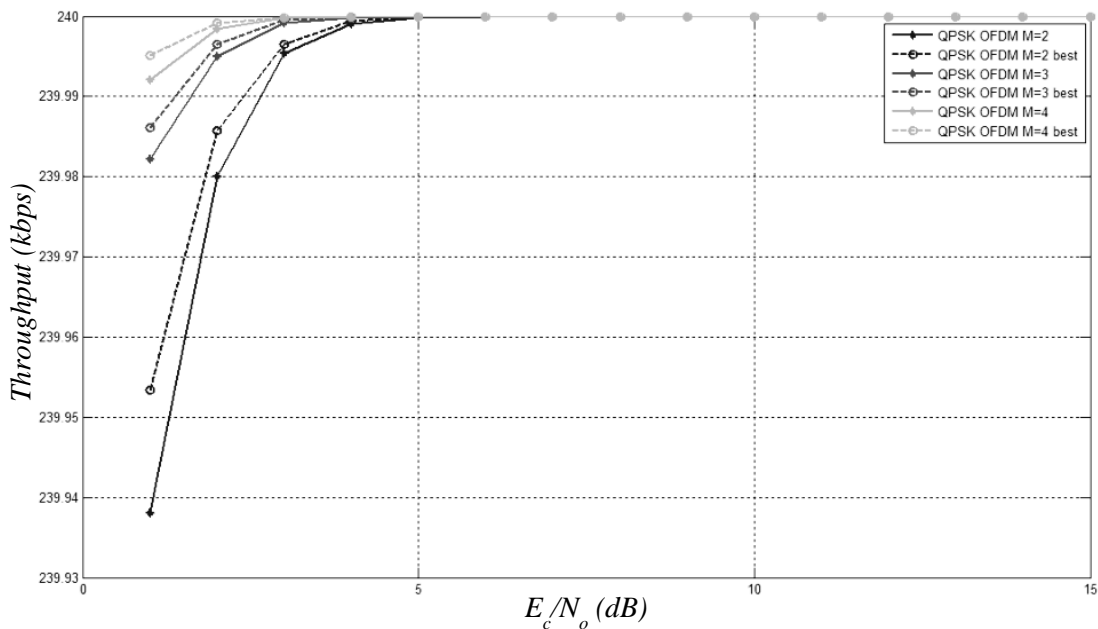
การส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 2 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้นเกือบ 0.29 dB สำหรับการส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้นเกือบ 0.45 dB ส่วนการส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 4 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้นเกือบ 0.48 dB

เมื่อเปรียบเทียบระบบ QPSK กับระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด พบว่า การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์

ที่พ 2 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุดทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้นเกือบ 6.32 dB สำหรับการส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรที่พ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุดทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้นเกือบ 7.45 dB ส่วนการส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรที่พ 4 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้นเกือบ 8.21 dB



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบอัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรที่พ 1-2 ตัว

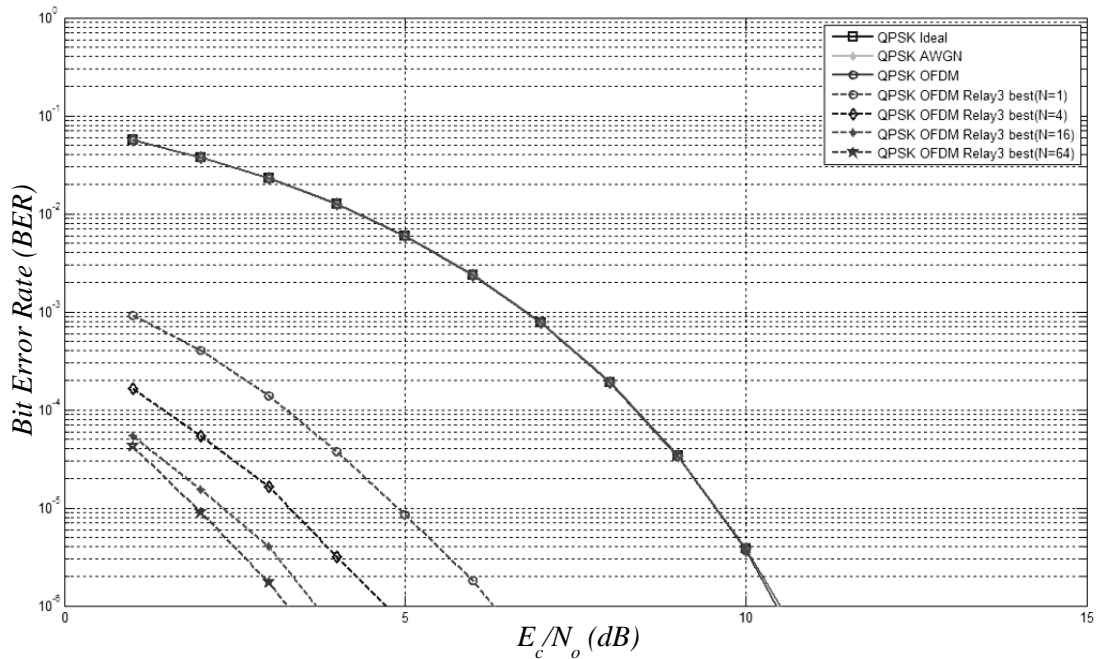


รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบอัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรที่พ 2-4 ตัว

4.2 การทดลองเปรียบเทียบความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิต ที่มีจำนวนช่องสัญญาณย่อยต่างกัน

ทดลองระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุดตามเงื่อนไขดังนี้

1. มอดูเลตทางแอมพลิจูดแบบควอดเรเจอร์แบบ QPSK
2. จำนวนช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 1, 4, 16 และ 64 ช่องสัญญาณ
3. ส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด



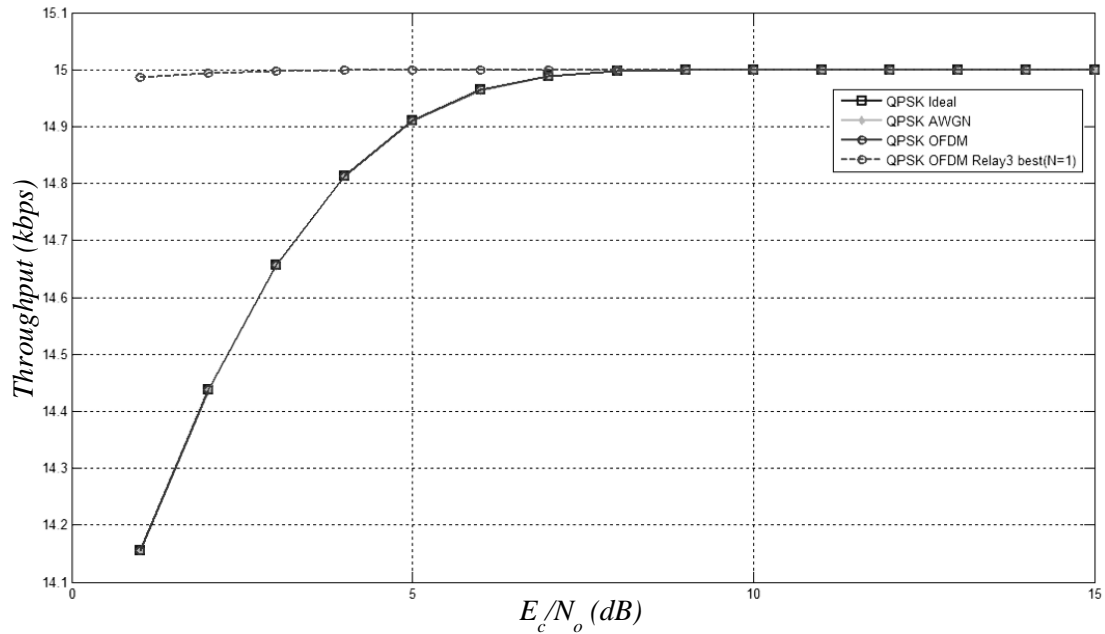
รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบระบบ QPSK-N โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด

จากรูปที่ 4.4 เปรียบเทียบความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตของระบบ QPSK-N โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด พบว่า หากต้องการความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-5} สำหรับระบบ QPSK-1 จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 9.5 dB สำหรับระบบ QPSK-4 จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 5 dB สำหรับระบบ QPSK-4 โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 3.27 dB สำหรับระบบ QPSK-16 โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 2.05 dB สำหรับระบบ QPSK-64 โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 1.93 dB

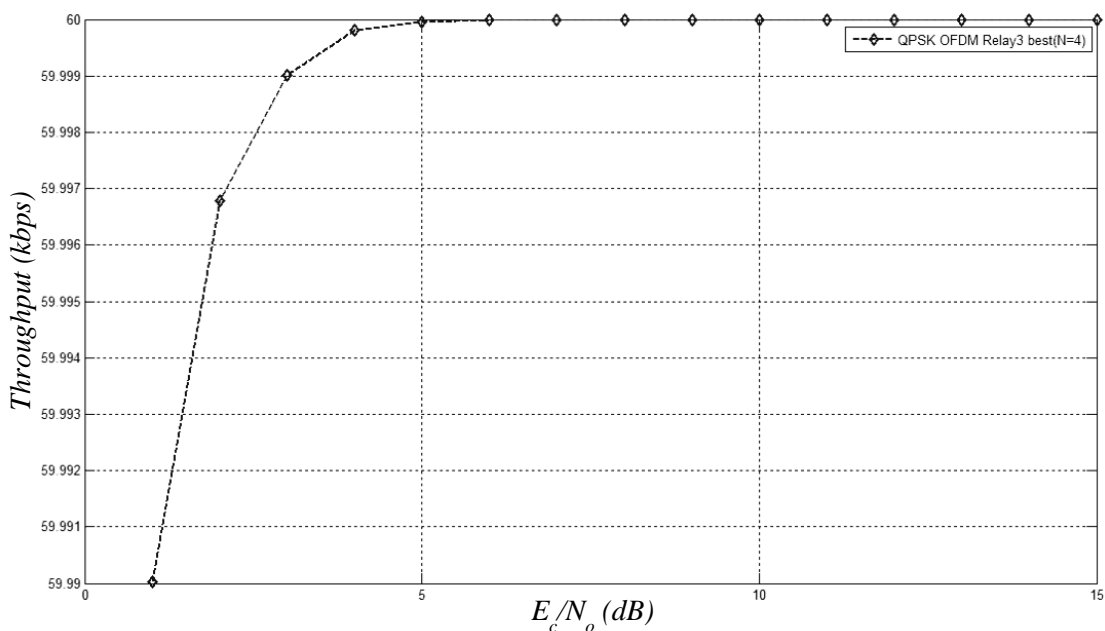
การแบ่งช่องสัญญาณย่อย ทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้นเกือบ 1.7 dB

หากพิจารณาอัตราการส่งข้อมูลของระบบ พบว่า อัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK-N โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอปเปอร์เรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด พบว่า ที่ E_b/N_0 เท่ากับ 1 dB อัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK-1 เท่ากับ 14.99 กิโลบิตต่อวินาที อัตราการ

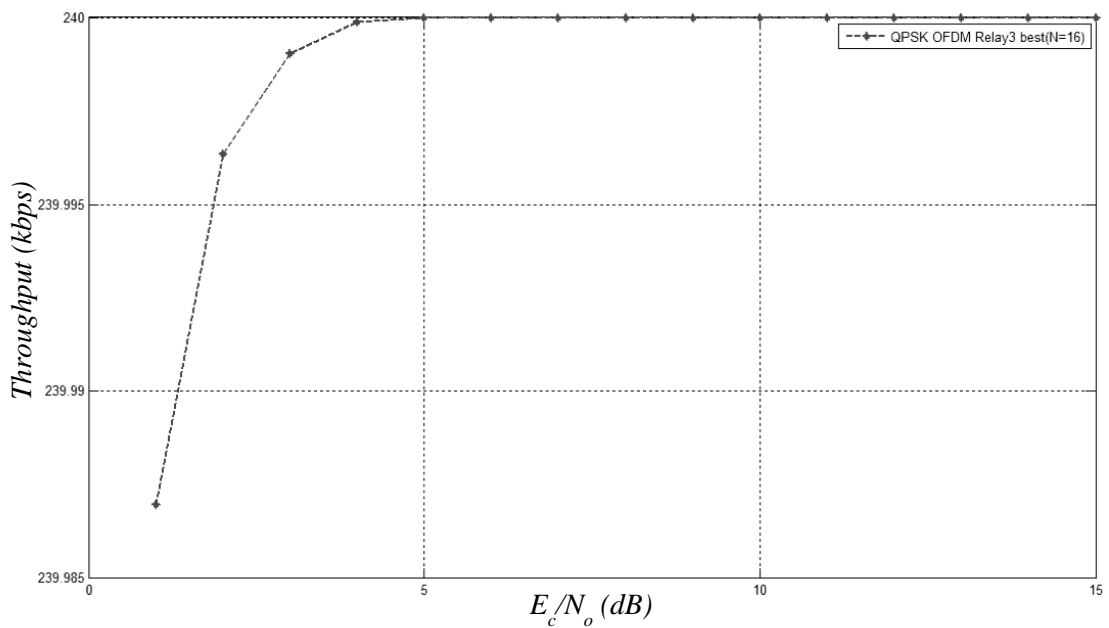
ส่งข้อมูลของระบบ QPSK-4 เท่ากับ 59.99 กิโลบิตต่อวินาที อัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK-16 เท่ากับ 239.986 กิโลบิตต่อวินาที อัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK-64 เท่ากับ 959.959 กิโลบิตต่อวินาที



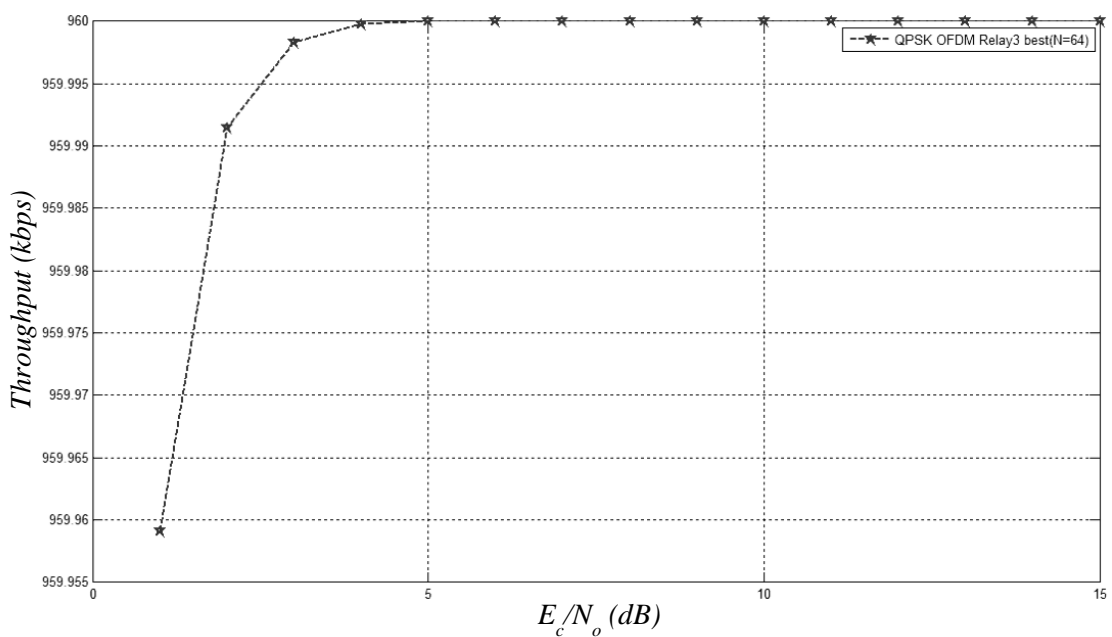
รูปที่ 4.5 อัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK OFDM โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอเพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด



รูปที่ 4.6 อัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK-4 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอเพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด



รูปที่ 4.7 อัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบอัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK-64 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟรีเลย์ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด

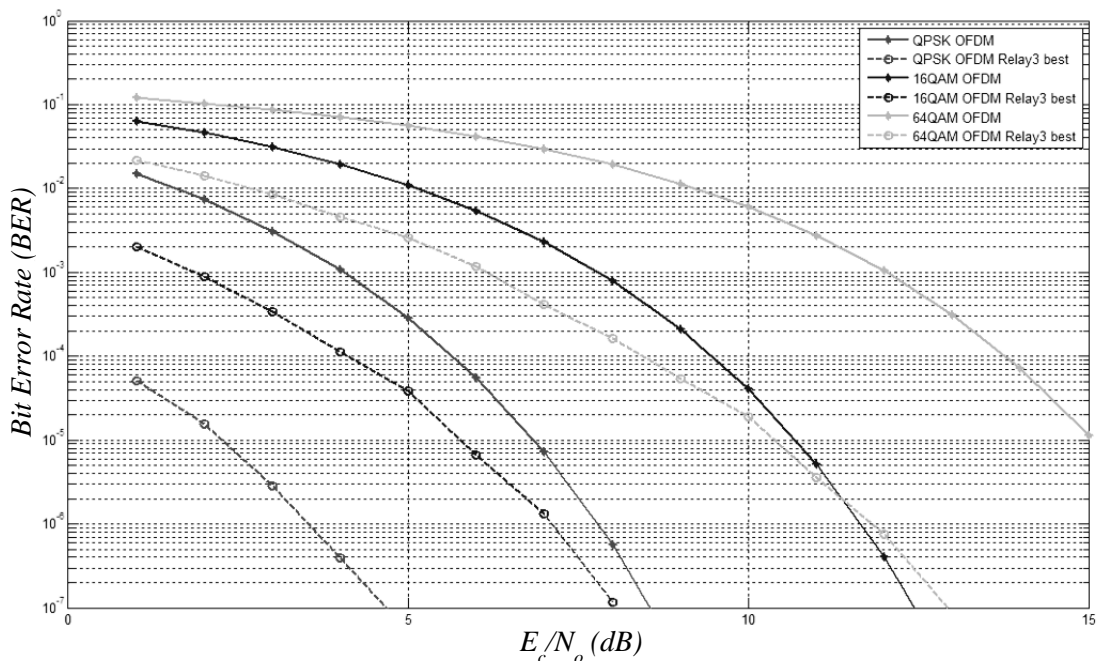
จากรูปที่ 4.5-4.8 เปรียบเทียบระบบ QPSK OFDM กับระบบ QPSK-4 โดยส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด พบว่า การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟเร็วขึ้นที่ฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุดทำให้อัตราการส่งข้อมูลของระบบเร็วขึ้นเกือบ 4 เท่าสำหรับระบบ QPSK-16 โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว

แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ทำให้อัตราการส่งข้อมูลของระบบเร็วขึ้นเกือบ 16 เท่า ส่วนระบบ QPSK-64 โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ทำให้อัตราการส่งข้อมูลของระบบเร็วขึ้นเกือบ 64 เท่า

4.3 การทดลองเปรียบเทียบความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิต โดยการมอดูเลตแบบต่างๆ

ทดลองระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ตามเงื่อนไขดังนี้

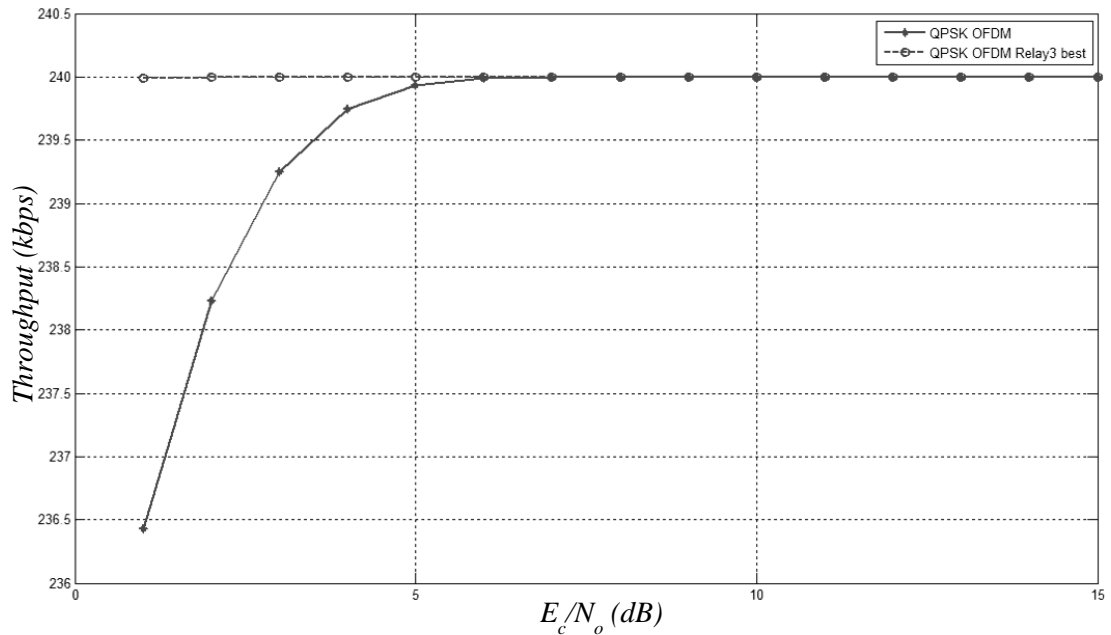
1. มอดูเลตทางแอมพลิจูดแบบควอดเรเจอร์แบบ QPSK, 16QAM และ 64QAM
2. จำนวนช่องสัญญาณย่อยเท่ากับ 16 ช่องสัญญาณ
3. ส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด



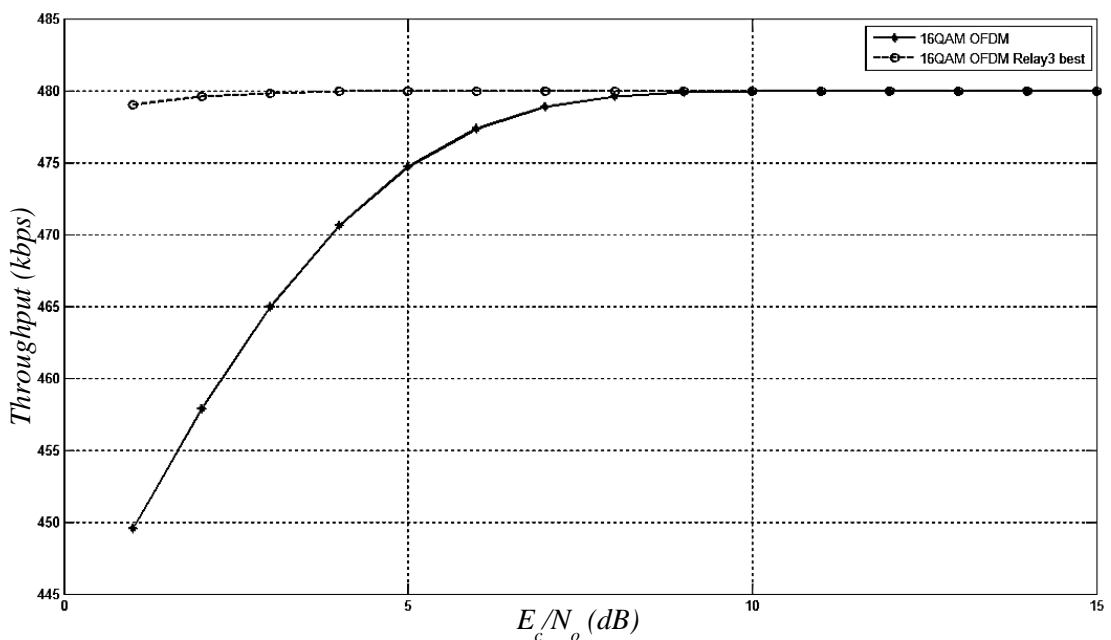
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบระบบ MQAM-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด

จากรูปที่ 4.9 เปรียบเทียบความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตของระบบ MQAM-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด พบว่า หากต้องการความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตเท่ากับ 10^{-5} สำหรับระบบ QPSK-16 จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 7.5 dB สำหรับระบบ QPSK-16 โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 2.05 dB สำหรับระบบ 16QAM-16 จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 10.7 dB สำหรับระบบ 16QAM-16 โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 6 dB สำหรับระบบ 64QAM-16 จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 15 dB สำหรับระบบ 64QAM-16 โดยส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด จะต้องการ E_b/N_0 เท่ากับ 10.2 dB

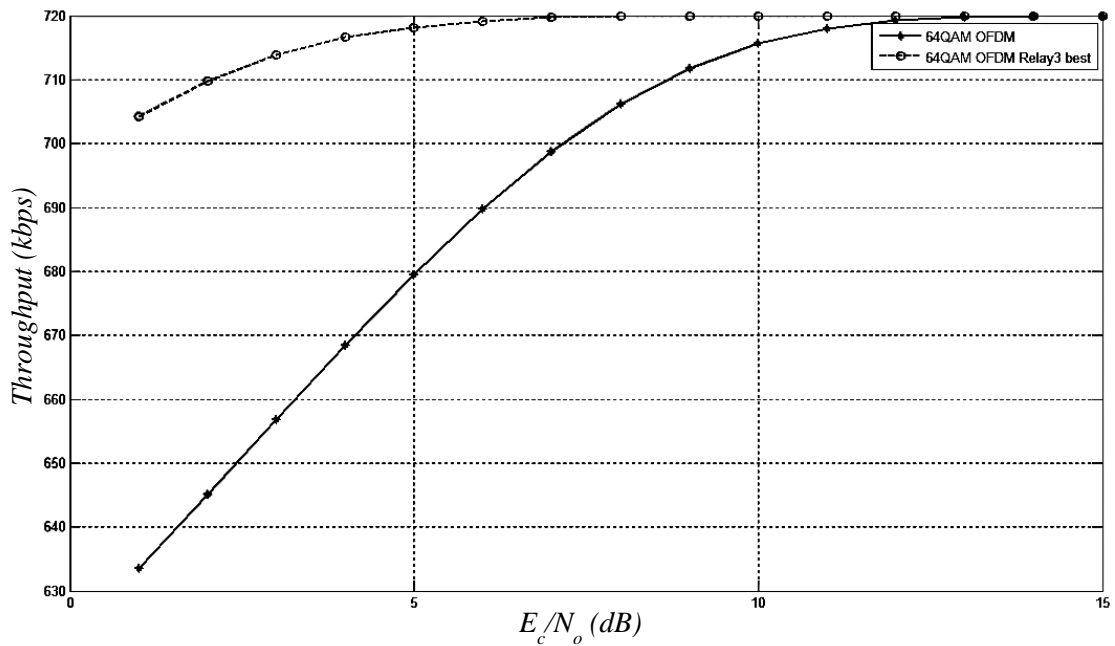
การส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอเพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ทำให้สมรรถนะรวมของระบบดีขึ้นเกือบ 5 dB แต่การเปลี่ยนวิธีการมอดูเลต ทำให้สมรรถนะรวมของระบบลดลงเกือบ 4 dB



รูปที่ 4.10 อัตราการส่งข้อมูลของระบบ QPSK-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอเพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด



รูปที่ 4.11 อัตราการส่งข้อมูลของระบบ 16QAM-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอเพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบอัตราการส่งข้อมูลของระบบ 64QAM-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด

จากรูปที่ 4.10-4.12 พบว่า ระบบ QPSK-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด จะมีอัตราการส่งข้อมูลของระบบ ประมาณ 239.986 กิโลบิตต่อวินาที ระบบ 64QAM-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด จะมีอัตราการส่งข้อมูลของระบบ ประมาณ 704.5 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งเร็วกว่า ระบบ 64QAM-16 ประมาณ 71 กิโลบิตต่อวินาที ระบบ 16QAM-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด จะมีอัตราการส่งข้อมูลของระบบ ประมาณ 479.05 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งเร็วกว่า ระบบ 16QAM-16 ประมาณ 50 กิโลบิตต่อวินาที

เมื่อเปรียบเทียบระบบ M-ary QAM OFDM กับระบบ M-ary QAM OFDM โดยส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด พบว่า ระบบ QPSK-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด จะมีอัตราการส่งข้อมูลของระบบ ประมาณ 239.986 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งเร็วกว่า ระบบ QPSK-16 ประมาณ 3.4 กิโลบิตต่อวินาที ระบบ 16QAM-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด จะมีอัตราการส่งข้อมูลของระบบ ประมาณ 479.05 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งเร็วกว่า ระบบ 16QAM-16 ประมาณ 50 กิโลบิตต่อวินาที ระบบ 64QAM-16 โดยการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ 3 ตัว แบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด จะมีอัตราการส่งข้อมูลของระบบ ประมาณ 704.5 กิโลบิตต่อวินาที ซึ่งเร็วกว่า ระบบ 64QAM-16 ประมาณ 71 กิโลบิตต่อวินาที

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอระบบสื่อสารแบบร่วมมือ ด้วยระบบ M-ary QAM OFDM โดยใช้โปรโตคอลการส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ แบบขยายและส่งต่อไปยังปลายทางแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด ทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการรับส่งสัญญาณ และปรับปรุงสมรรถนะอัตราผิดพลาดของบิตข้อมูลให้ลดต่ำลง

จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบอัตราผิดพลาดของบิตข้อมูลระบบ M-ary QAM OFDM ส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุดกับระบบ M-ary QAM OFDM พบว่าระบบมีสมรรถนะเพิ่มขึ้น 5 dB และเมื่อเปรียบเทียบกับระบบ M-ary QAM พบว่า ระบบมีสมรรถนะเพิ่มขึ้น 7-8 dB

จากการทดลองเมื่อเปรียบเทียบอัตราเร็วในการส่งข้อมูลระบบ M-ary QAM OFDM ส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุดกับระบบ M-ary QAM OFDM พบว่าระบบอัตราเร็วในการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้น 3-70 กิโลบิตต่อวินาที และเมื่อเปรียบเทียบกับระบบ M-ary QAM พบว่า การเพิ่มช่องสัญญาณย่อยทำให้ อัตราเร็วในการส่งข้อมูลเพิ่มขึ้น รูปแบบการมอดูเลตนั้นเพียงแต่ทำให้ความจุหรือมีความสามารถในการส่งข้อมูลสูงขึ้น แต่จะส่งผลให้สมรรถนะของระบบลดลง กล่าวคือ ต้องการ E_b/N_o สูงกว่า หากต้องการอัตราความผิดพลาดบิตเท่ากัน

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานที่ควรศึกษาหรือพัฒนาต่อไปในอนาคตได้แก่

1. พัฒนาระบบ M-ary QAM OFDM ส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุดโดยใช้โปรโตคอลการส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟ แบบถอดรหัสและส่งต่อ
2. พัฒนาระบบ M-ary QAM OFDM ส่งผ่านช่องสัญญาณรีเลย์คอพอเรทีฟแบบเลือกช่องสัญญาณที่ดีที่สุด โดยใช้โปรโตคอลการรับส่งแบบหลายอินพุทหลายเอาท์พุท

เอกสารอ้างอิง

- [1] van Wyk, J. and Linde, L., “Bit error probability for a M-ary QAM OFDM-based system,” in IEEE Trans. on Wireless Comm., , pp. 1-5, 2007
- [2] Salama S. Ikki and Mohamed H. Ahmed, “Performance of Multiple-Relay Cooperative Diversity Systems with Best Relay Selection over Rayleigh Fading Channels,” in Hindawi Publishing Corporation EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, vol. 2008, Article ID 580368, pp. 7, March 2008
- [3] J. G. Proakis, Digital Communications, ch. 5-2-2, pp. 257–282, ch. 14-4-3, pp. 777–793. McGraw-Hill, 4th ed., 2001.
- [4] D. Yoon, K. Cho, and J. Lee, “Bit error probability of M-ary quadrature amplitude modulation,” in Proc. IEEE VTS-Fall VTC '00, (Boston, MA,USA), 24-28 September 2000.
- [5] Yi Zhao, Raviraj Adve and Teng Joon Lim, “Symbol Error Rate of Selection Amplify-and-Forward Relay Systems,” IEEE Trans. on Wireless Comm., vol. 10, no.11, pp. 757–759, November 2006.
- [6] M. O.Hasna and M.-S. Alouini, “Harmonic mean and end-to-end performance of transmission systems with relays,” IEEE Transactions on Communications, vol. 52, no. 1, pp. 130–135, 2004.
- [7] S. S. Ikki and M. H. Ahmed, “Performance analysis of cooperative diversity wireless networks over Nakagami-m fading channel,” IEEE Communications Letters, vol. 11, no. 4, pp. 334–336, 2007.
- [8] <http://www.telco.mut.ac.th/telco/index.php/en/news/3-2009-08-14-13-13-16/198-ofdm>
- [9] J. N. Laneman, D.C. Tse, G.W. Wornell. “Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior.” IEEE Signal Processing Letters. 12 (September 2005) : 597-600.
- [10] A. Nosratinia, Todd E. Hunter. “Cooperative Communication in Wireless Networks.” IEEE Communications Magazine. (October 2004) : 74-80.
- [11] Kraus, J.D., and Marhefka, R.J. “Antenna for all applications.” 3rd ed. New York : McGraw-Hill. 2003.

ภาคผนวก

Bit Error Probability of Cooperative Diversity for M-ary QAM OFDM-based system with Best Relay Selection

Pussadee Kiratipongvooth and Asst. Prof Dr Suvepon Sittichivapak

Telecommunication Engineering, Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
 3 Moo 2 Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520 Thailand

Abstract. Cooperative relay networks in OFDM-based systems have been shown to improve performance in wireless communication systems as a form of spatial diversity, but are not readily available cooperative diversity for M-ary QAM OFDM-based system where the best relay only participates in the relaying. In this paper, we investigate the error rate performance of cooperative Diversity for M-ary QAM OFDM-based system with best-relay selection. The results present bit error probability of M-ary QAM OFDM-based system with best-relay selection for different values of the numbers of relays (M), the numbers of subchannels and modulation scheme. M-ary QAM OFDM-based system with best-relay selection provides higher performance.

Keywords: OFDM, M-ary QAM, cooperative diversity, best relay selection

1. Introduction

Relays are exploited to improve performance in wireless communication systems. The advantages of the cooperative diversity protocols come at the expense of a reduction in the spectral efficiency since the relays must transmit on orthogonal channels in order to avoid interfering between the source node and each other as well. Hence for a regular cooperative diversity network with M relaying nodes, $M+1$ channels are employed, which incurs a bandwidth penalty. This problem of the inefficient use of the channel resources can be eliminated with the use of the best-relay selection scheme. In such a scheme, the best relay node only is selected to retransmit to the destination. Hence, two channels only are required in this case (regardless of the number of relays). In this paper, we investigate the error rate performance in a multiple path amplify-and-forward relay with best-relay selection network using orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signals. Multiple-relay cooperative diversity in M-ary QAM OFDM-based systems with Best Relay Selection has better performance than the regular cooperative system.

2. System Model

2.1. M-ary QAM OFDM-based system

Fig. 1. shows the system consists of an OFDM-based implementation, with M-ary QAM on each subchannel. This is similar to the configuration used for DMT-based Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL), but with fixed modulation on each subchannel. [1]

The single-carrier system was extended to a multicarrier (multiple subchannels) system by dividing the available bandwidth into N subchannels. The M-ary QAM OFDM system was simulated for $M=4, 16, 64$ and 256 , over $N=4, 16, 64$ and 256 subchannels respectively. We refer to these combinations of M-ary modulation scheme (used per subchannel) and N subchannels as MQAM- N (e.g. 64QAM-16 is 64-QAM modulation over 16 subchannels).

* Corresponding author. Tel.: +66 81874 3337; fax: -.
 E-mail address: piggy_a@hotmail.com

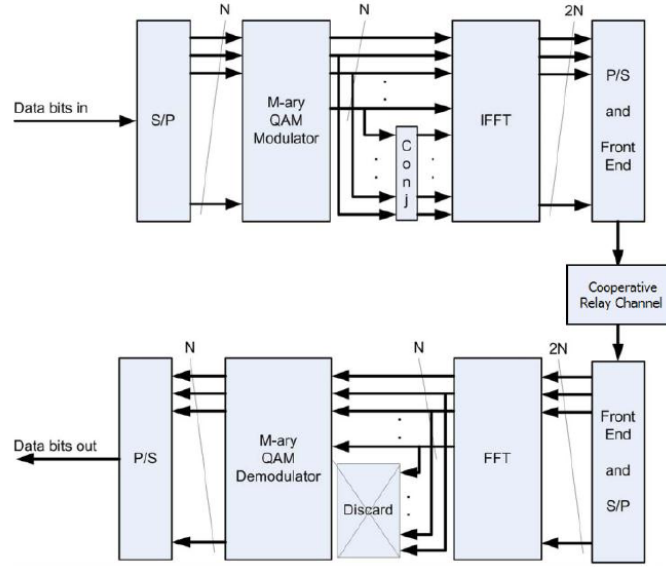


Fig. 1: Illustration of M-ary QAM on OFDM Relay Network System.

According to [1], the BER expression for M-ary QAM OFDM is:

For M=4 (QPSK):

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{(2^{\sqrt{N}} - 1) \cdot E_b}{2^{\sqrt{N}-1} \cdot N_0}} \right) \quad (1)$$

For M=16, 64, 256,....:

$$P_e = \frac{\sqrt{M} - 1}{\sqrt{M} \log_2 \sqrt{M}} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{(2^{\sqrt{N}} - 1) \cdot 3 \cdot \log_2 M \cdot E_b}{2^{\sqrt{N}-1} \cdot 2(M-1) \cdot N_0}} \right) \quad (2)$$

2.2. Multiple-Relay Cooperative Diversity Systems with Best Relay Selection System

Fig. 2 shows a source node (S) communicates with the destination (D) through the direct link and the indirect link (through the best relay). This best-relay selection scheme allows the destination to get two copies of the source signal. The first one is from the source (direct link). The channel coefficients between the source S and the i th relay R_i (h_i), between R_i and D (g_i) and between S and D (f) are flat Rayleigh fading coefficients. In addition, h_i , g_j , and f are mutually-independent and nonidentical for all i and j . We also assume here, without any loss of generality that additive white Gaussian noise (AWGN) terms of all links have zero mean and equal variance N_0 .

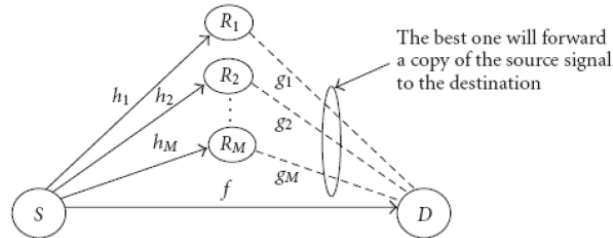


Fig. 2. Illustration of the cooperative diversity network with the best-relay selection scheme

Assuming that the relaying gain equals $\sqrt{1/(E_s h_i^2 + N_o)}$ [6] (to keep the relay power within its constraints, especially when the fading coefficient (hi) is low), where E_s is the transmitted signal energy of the source, it is straightforward to show that the end-to-end SNR of the indirect link $S \rightarrow R_i \rightarrow D$ can be written as

$$\gamma_{S \rightarrow R_i \rightarrow D} = \frac{\gamma_{h_i} \gamma_{g_i}}{\gamma_{h_i} + \gamma_{g_i} + 1} \quad (3)$$

Where $\gamma_{h_i} = h_i^2 E_s / N_o$ is the instantaneous SNR of the source signal at R_i and $\gamma_{g_i} = g_i^2 E_s / N_o$ is the instantaneous SNR of the relayed signal (by R_i) at D , where E_i is the signal transmitted energy of the relay. The best relay will be selected as the one that achieves the highest end-to-end SNR of the indirect link. Then assuming that maximum ratio combining (MRC) technique is employed at the destination node, the total SNR at the destination node can be written as

$$\gamma_{tot} = \gamma_f + \max_i \left(\frac{\gamma_{h_i} \gamma_{g_i}}{\gamma_{h_i} + \gamma_{g_i} + 1} \right) \quad (4)$$

where $\gamma_f = f^2 E_s / N_o$ is the instantaneous SNR between S and D . In order to use the total SNR in the outage and error performance calculations, (3) should be expressed in a more mathematically tractable form. To achieve it, we proposed in [7] a tight upper bound for $\gamma_{S \rightarrow R_i \rightarrow D}$, given by

$$\gamma_{S \rightarrow R_i \rightarrow D} \leq \gamma_i = \min(\gamma_{h_i} \gamma_{g_i}) \quad (5)$$

The PDF of γ_i can be expressed in terms of the average SNR $\bar{\gamma}_{h_i} = \mathbf{E}(h_i^2) E_s / N_o$ and $\bar{\gamma}_{g_i} = \mathbf{E}(g_i^2) E_s / N_o$ (where $\mathbf{E}(\cdot)$ is the statistical average operator) as $f_{\gamma_i}(\gamma) = (1/\bar{\gamma}_i) e^{-\gamma/\bar{\gamma}_i}$ where $\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_{h_i} \bar{\gamma}_{g_i} / (\bar{\gamma}_{h_i} + \bar{\gamma}_{g_i})$. Using the value of, we can rewrite the total SNR in (4) as

$$\gamma_{tot} \leq \gamma_f + \gamma_b \quad (6)$$

where $\gamma_b \leq \min(\gamma_i) = \max_i(\min(\gamma_{h_i} \gamma_{g_i}))$. This approximation of the end-to-end SNR in (6) is analytically more tractable than the exact value in (4)

3. Simulation Result

We used an amplify and forward cooperative diversity system where a source node communicates with a destination node directly and indirectly.

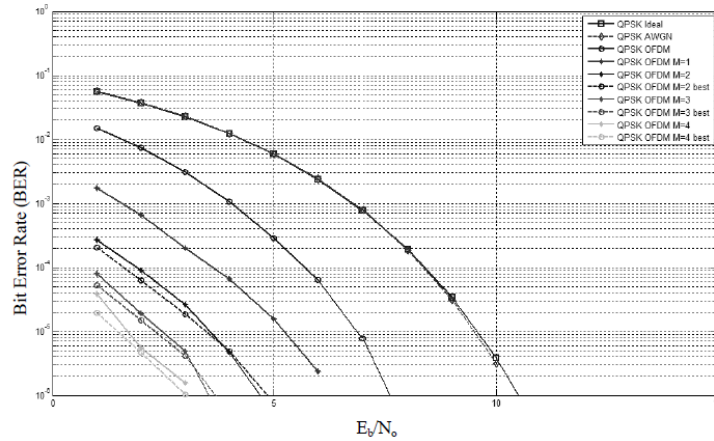


Fig. 3: Comparison of the best-relay selection schema and the regular cooperative diversity

Fig. 3. , We simulated BER versus SNR for QPSK OFDM into 16 subchannels with the best-relay selection. Fig. 3. compares BER performance of the best-relay selection schema and the regular cooperative diversity for different values of the numbers of relays(M). At $\text{BER}=10^{-5}$, QPSK-16 will require a $E_b / N_o=9.5$

dB., QPSK-16 for numbers of relays (M) equal 1 will require a $E_b/N_o= 6.9$ dB., QPSK-16 for numbers of relays (M) equal 2 will require a $E_b/N_o= 3.47$ dB., QPSK-16 for numbers of relays (M) equal 2 with best-relay selection will require a $E_b/N_o= 3.18$ dB., QPSK-16 for numbers of relays (M) equal 3 will require a $E_b/N_o= 2.5$ dB., QPSK-16 for numbers of relays (M) equal 3 with best-relay selection will require a $E_b/N_o= 2.05$ dB., QPSK-16 for numbers of relays (M) equal 4 will require a $E_b/N_o= 1.77$ dB., QPSK-16 for numbers of relays (M) equal 4 with best-relay selection will require a $E_b/N_o= 1.29$ dB. The best-relay selection which numbers of relays (M) equal 2 provides a performance improvement of nearly 0.29 dB. The best-relay selection which numbers of relays (M) equal 3 provides a performance improvement of nearly 0.45 dB. The best-relay selection which numbers of relays (M) equal 4 provides a performance improvement of nearly 0.48 dB.

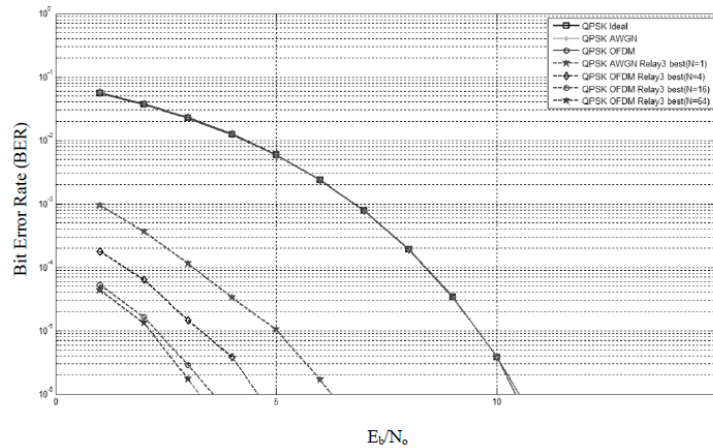


Fig. 4: Comparison of the best-relay selection schema for different values of the numbers of subchannels

Fig. 4. , We simulated BER versus SNR for QPSK OFDM with the best-relay selection for numbers of relays (M) equal 3. Fig. 4. compares BER performance of the best-relay selection schema for different values of the numbers of subchannels. At $BER=10^{-5}$, A single carrier will require a $E_b/N_o= 5$ dB. By subdividing the single carrier into 4 subchannels will require a $E_b/N_o= 3.27$ dB. By subdividing the single carrier into 16 subchannels will require a $E_b/N_o= 2.09$ dB. By subdividing the single carrier into 64 subchannels will require a $E_b/N_o= 1.93$ dB. Subdividing the available bandwidth thus provides a performance improvement of nearly 2.7-3.1 dB.

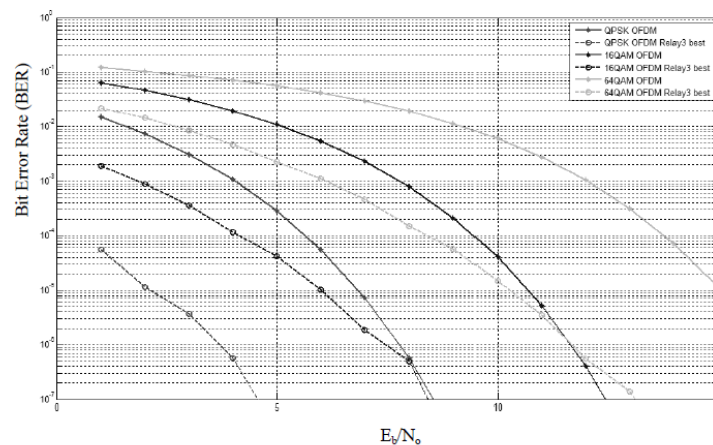


Fig. 5: Comparison of the best-relay selection schema for M-ary QAM OFDM-based system

Fig. 5. , We simulated BER versus SNR for M-ary OFDM into 16 subchannels with the best-relay selection for numbers of relays (M) equal 3. Fig. 5. compares BER performance of M-ary QAM OFDM-

based and with the best-relay selection schema. At $\text{BER}=10^{-5}$, 4QAM-16 will require a $E_b/N_o=6.9$ dB. 4QAM-16 with the best-relay selection will require a $E_b/N_o=2.05$ dB. 16QAM-16 will require a $E_b/N_o=10.7$ dB. 16QAM-16 with the best-relay selection will require a $E_b/N_o=6$ dB. 64QAM-16 will require a $E_b/N_o=15$ dB. 64QAM-16 with the best-relay selection will require a $E_b/N_o=10.2$ dB. The cooperative diversity with best-relay selection provides a performance improvement of nearly 4.7 dB.

4. Conclusion

The results show M-ary QAM OFDM-based system with Best Relay Selection the best-relays selection cooperative has BER better than the regular cooperative diversity. It was found that the performance gain between M-ary QAM OFDM-based system with Best Relay Selection the best-relays selection cooperative and the regular cooperative diversity (irrespective of modulation scheme used) was about 0.29-0.45 dB. When we change modulation scheme for higher capacity, we can increase number of subchannel and use cooperative diversity with best-relay selection for higher performance.

In this paper, we investigate only amplify and forward cooperative diversity system in the multiple path. For example, decode and forward, the single path can be considered.

5. References

- [1] van Wyk, J. and Linde, L., "Bit error probability for a M-ary QAM OFDM-based system," in *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, pp. 1-5, 2007
- [2] Salama S. Ikki and Mohamed H. Ahmed, "Performance of Multiple-Relay Cooperative Diversity Systems with Best Relay Selection over Rayleigh Fading Channels," in *Hindawi Publishing Corporation EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2008, Article ID 580368, pp. 7, March 2008
- [3] J. G. Proakis, *Digital Communications*, ch. 5-2-2, pp. 257–282, ch. 14-4-3, pp. 777–793. McGraw-Hill, 4th ed., 2001.
- [4] D. Yoon, K. Cho, and J. Lee, "Bit error probability of M-ary quadrature amplitude modulation," in *Proc. IEEE VTS-Fall VTC '00*, (Boston, MA, USA), 24-28 September 2000.
- [5] Yi Zhao, Raviraj Adve and Teng Joon Lim, "Symbol Error Rate of Selection Amplify-and-Forward Relay Systems," *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, vol. 10, no.11, pp. 757–759, November 2006.
- [6] M. O.Hasna and M.-S. Alouini, "Harmonic mean and end-to-end performance of transmission systems with relays," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, no. 1, pp. 130–135, 2004.
- [7] S. S. Ikki and M. H. Ahmed, "Performance analysis of cooperative diversity wireless networks over Nakagami-m fading channel," *IEEE Communications Letters*, vol. 11, no. 4, pp. 334–336, 2007.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวมุสตี กิรติพงษ์วุฒิ
วัน เดือน ปีเกิด 4 สิงหาคม 2524 ที่กรุงเทพมหานคร
ที่อยู่ 16/7 ซอนอินทามระ 15 ถนนสุทธิสารวินิจฉัย แขวงสามเสนใน
เขตพญาไท กรุงเทพฯ 10400
ประวัติการศึกษา 2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) ระบบโทรคมนาคม
2.) ระบบโอเอพีดีเอ็ม
3.) ระบบคอเพอเรทีฟไดเวอร์ซิตี
ประสบการณ์การทำงานและผลงานวิจัย
พ.ศ.2546-ปัจจุบัน ตำแหน่งวิศวกรชำนาญการ บริษัท แอดวานซ์ อินโฟร์ เซอร์วิส จำกัด
(มหาชน)