

การประยุกต์ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลกับผู้ใช้อัตราข้อมูลสูงร่วมด้วยการหักล้างสัญญาณแทรกสอด  
สำหรับระบบดีเอสซีดีเอ็มเอแบบหลายอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัส



นายเสรี วณิชภักดีเดชา

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1519-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF BIORTHOGONAL SCHEME ON HIGH-RATE USERS WITH INTERFERENCE  
CANCELLATION FOR MULTICODE MULTIRATE DS-CDMA SYSTEMS



Mr. Seree Wanichpakdeedecha

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Electrical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1519-4



เสรี วณิชภักดีเดชา : การประยุกต์ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลกับผู้ใช้อัตราข้อมูลสูงร่วมด้วย การหักล้างสัญญาณแทรกสอดสำหรับระบบซีดีเอ็มเอแบบหลายอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัส (APPLICATION OF BIORTHOGONAL SCHEME ON HIGH-RATE USERS WITH INTERFERENCE CANCELLATION FOR MULTICODE MULTIRATE DS-CDMA SYSTEMS) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล, 127 หน้า. ISBN 974-03-1519-4.

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการนำแบบแผนไบออร์ทอกอนอลหรือแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสมาใช้ในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงของระบบซีดีเอ็มเอแบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัส เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอแบบสามอัตราในข่ายเชื่อมโยงขาขึ้น โดยจะช่วยลดค่ากำลังสัญญาณสูงสุดของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่มากเกินไปซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาความผิดเพี้ยนแบบไม่เชิงเส้นที่ตัวขยายสัญญาณ โดยสัญญาณที่ส่งด้วยแบบแผนไบออร์ทอกอนอลจะมีกำลังสูงสุดที่ลดลง ในขณะที่สัญญาณที่ส่งด้วยแบบแผนหลายรหัสจะมีกำลังสูงสุดแปรตามอัตราข้อมูลที่ส่ง นอกจากนี้สัญญาณแทรกสอดในกรณีที่ส่งด้วยแบบแผนไบออร์ทอกอนอลหรือแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัส จะมีความแรงลดน้อยลง ทำให้การประมาณสัญญาณของผู้ใช้รายอื่นมีความเชื่อถือได้มากขึ้น เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานซึ่งเป็นกลุ่มที่มุ่งหักล้างสัญญาณแทรกสอดให้กับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงจะถูกใช้เป็นการรับสำหรับการส่งข้อมูลที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลหรือแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสกับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ซึ่งจะอาศัยความเชื่อถือได้ที่เพิ่มขึ้นของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางที่ใช้แบบแผนหลายรหัสมาหักล้างสัญญาณแทรกสอดให้กับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลหรือแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัส

ผลการจำลองระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลหรือแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสในการส่งข้อมูลของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง และใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานเป็นกลุ่มที่มุ่งหักล้างสัญญาณแทรกสอดให้กับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง เปรียบเทียบกับระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสในผู้ใช้ทุกราย และใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน พบว่าระบบที่เสนอสามารถปรับปรุงสมรรถนะของระบบสามอัตราให้ดีขึ้นสำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ และกลาง และที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ค่า SNR ค่อนข้างสูง

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....  
สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า.....  
ปีการศึกษา.....2544.....

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## 4370596621 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: MULTIRATE / MULTICODE / BIORTHOGONAL / MULTIUSER DETECTION / CDMA

SEREE WANICHPAKDEEDECHA : APPLICATION OF BIORTHOGONAL SCHEME ON HIGH-RATE USERS WITH INTERFERENCE CANCELLATION FOR MULTICODE MULTIRATE DS-CDMA SYSTEMS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. DR.SOMCHAI JITAPUNKUL, Dr. Ing. 127 pp. ISBN 974-03-1519-4.

This thesis proposed multicode tri-rate CDMA systems using biorthogonal or biorthogonal multicode scheme on high-rate users for the objective of improving the up-link performance. This aplyment reduces high-rate signal's peak power that might cause a nonlinear distortion problem at power amplifiers. By biorthogonal schemes, the peak power of a signal can be fixed to a constant, different from multicode scheme's case where the peak power of a signal increases with data rate. Moreover, interferences occuring from signal using biorthogonal or biorthogonal multicode scheme are lower than those occuring from signal using multicode scheme. This characteristic increases reliability in bit detections. Groupwise parallel interference cancellation that tends to cancel interference for high-rate users is used to be a receiver of the system that uses biorthogonal or biorthogonal multicode scheme on high-rate users. With this receiver, reliable estimated multicode low-rate and medium-rate's data will be fed back to cancel the interferences for biorthogonal or biorthogonal multicode high-rate users

The results of multicode tri-rate CDMA systems using biorthogonal or biorthogonal multicode scheme on high-rate users with the groupwise parallel interference cancellation, comparing with tri-rate CDMA systems that use multicode scheme at all users with parallel interference cancellation, show that the proposed systems give higher performances on low-rate and medium-rate users and on high-rate users with rather high SNR.

Department.....	Electrical Engineering.....	Student's signature.....
Field of study.....	Electrical Engineering.....	Advisor's signature.....
Academic year.....	2001.....	Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้ความช่วยเหลือทางด้านความรู้ ตลอดจนได้ให้คำแนะนำ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัยมาโดยตลอด

เนื่องจากการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์จาก ทบวงมหาวิทยาลัย จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการวิจัยกรรมวิธีสัตวญาณดิจิทัล ซึ่งเป็นสถานที่ทำวิจัย รวมถึง เพื่อน พี่น้องนิสิตที่ห้องปฏิบัติการทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือในการให้ข้อคิดเห็น และคำแนะนำ ต่างๆ ตลอดจนได้ให้บรรยากาศการทำงานที่ดียิ่ง

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ที่ได้มอบความรัก ความอบอุ่น และกำลังใจตลอดมา ตลอดจนพี่ๆ ของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนเสมอมา



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูป.....	ฉ
บัญชีคำศัพท์.....	ค
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบ CDMA.....	2
1.2 เครื่องรับแบบธรรมดา หรือเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์.....	4
1.3 เครื่องรับสำหรับผู้หลายราย.....	4
1.3.1 เครื่องรับที่เหมาะสมที่สุด.....	6
1.3.2 เครื่องรับที่เหมาะสมรองลงไป.....	6
1.3.2.1 เครื่องรับแบบเชิงเส้น.....	6
1.3.2.2 เครื่องรับแบบไม่เชิงเส้น.....	7
1.3.3 เครื่องรับสำหรับผู้หลายคนที่มีการปรับตัวได้.....	10
1.4 ข้อดี-ข้อเสียของเครื่องรับแต่ละแบบ.....	10
1.5 แบบแผนหลายอัตรา (Multirate scheme) สำหรับระบบ DS-CDMA.....	10
1.5.1 แบบแผนที่ใช้การมอดูเลตหลายค่า.....	10
1.5.2 แบบแผนที่มีการเปลี่ยนอัตราชีพ.....	11
1.5.3 แบบแผนที่ใช้อัตราส่วนแผ่หลายค่า.....	12
1.5.4 แบบแผนหลายรหัส.....	13
1.6 ข้อดี-ข้อเสียของแบบแผนหลายอัตราแต่ละแบบ.....	15
1.7 ปัญหาของแบบแผนหลายรหัส.....	16
1.8 วิธีการแก้ปัญหาที่มีผู้เสนอขึ้น.....	16



## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
1.9	แนวทางของวิทยานิพนธ์.....17
1.10	วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์.....17
1.11	ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....18
1.12	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....18
1.13	ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ.....18
1.14	ภาพรวมของวิทยานิพนธ์.....19
1.15	นิยามสัญลักษณ์.....20
2	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....21
2.1	รหัสแรมซี.....21
2.1.1	รหัสตั้งฉาก.....22
2.1.2	ลำดับสัญญาณรบกวนสุ่มเทียม.....23
2.2	ปัจจัยที่ส่งผลเสียดต่อสมรรถนะของระบบ.....24
2.2.1	สัญญาณแทรกสอดจากผู้รัยอื่น.....24
2.2.2	ปรากฏการณ์ใกล้-ไกล.....26
2.2.3	ข้อจำกัดของตัวขยายสัญญาณ.....27
2.2.4	เฟดดิ้ง.....28
2.2.5	ความเป็นอะซิงโครนัส.....29
2.3	ระบบ DS-CDMA สามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัส.....30
2.3.1	แบบจำลองระบบ.....30
2.4	แบบแผนไบนารีทอคอนอล.....34
2.5	แบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส.....36
2.6	เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอด.....39
2.6.1	เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน สำหรับระบบอัตราเดียว.....40
2.6.2	เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน สำหรับระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัส.....41
2.7	วิธีการวัดสมรรถนะและความหมายของค่าต่าง ๆ.....43
2.7.1	อัตราความผิดพลาดบิต.....43



สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า	
2.7.2	อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน.....	44
2.7.3	ความต้านทานต่อปรากฏการณ์ใกล้-ไกล.....	44
3	ระบบและเครื่องรับที่นำเสนอ.....	45
3.1	ระบบ DS-CDMA สามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัส ร่วมกับแบบแผนไบนารีทอคอนอล.....	45
3.1.1	แบบจำลองระบบภาคส่ง.....	46
3.1.2	แบบจำลองระบบภาครับ.....	48
3.2	ระบบ DS-CDMA สามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัส ร่วมกับแบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส.....	50
3.2.1	แบบจำลองระบบภาคส่ง.....	52
3.2.2	แบบจำลองระบบภาครับ.....	54
3.3	เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานเป็นกลุ่มที่มีการป้อนกลับ เพื่อมุ่งหักล้างสัญญาณแทรกสอดให้กับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง.....	57
4	ผลการวิจัย.....	64
4.1	วิธีการจำลองระบบ.....	65
4.1.1	รหัสแรมป์ที่ใช้.....	65
4.1.2	สัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณ.....	66
4.1.3	จำนวนผู้ใช้ในระบบ อัตราข้อมูล จำนวนบิตข้อมูลที่ใช้ในการจำลองระบบ.....	66
4.1.4	ค่าตัวแปรของตัวขยายสัญญาณที่ใช้.....	67
4.1.5	เฟดดิ้ง.....	69
4.2	อัตราความผิดพลาดบิตเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน.....	70
4.3	ผลของขนาดสัญญาณที่มาถึงภาครับไม่เท่ากัน.....	76
4.3.1	ค่า BER ที่ SNR ต่างๆ ของระบบที่มีการควบคุมกำลังแบบไม่สมบูรณ์.....	76
4.3.2	ค่า BER เมื่อทำการเปลี่ยนกำลังสัญญาณแทรกสอด.....	81
4.4	ผลของเฟดดิ้ง.....	89
4.5	การส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส.....	94
4.5.1	ช่องสัญญาณอะซิงโครนัสปราศจากเฟดดิ้ง.....	94

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.5.2 ช่องสัญญาณอะซิงโครนัสที่มีเฟดดิ้ง.....	99
4.6 ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้.....	103
4.7 ผลสรุปโดยรวม.....	108
5 บทสรุป.....	111
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	111
5.2 ข้อดี-ข้อเสียของการนำแบบแผนไบออร์ทอกอนอลหรือแบบแผน ไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสมาใช้แทนแบบแผนหลายรหัสที่ ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงด้วยเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอด.....	112
5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต.....	113
รายการอ้างอิง.....	114
ภาคผนวก.....	119
ภาคผนวก ก.....	120
ภาคผนวก ข.....	125
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	127

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1	เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของเครื่องรับที่เหมาะสมรองลงไปแต่ละแบบ.....9
ตารางที่ 1.2	เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของแบบแผนหลายอัตราแต่ละแบบ.....15
ตารางที่ 2.1	จำนวนรหัสที่จำเป็นสำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่างๆ.....38
ตารางที่ 2.2	ค่ากำลังสัญญาณค่ายอดต่อค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยสำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่างๆ.....39
ตารางที่ 4.1	จำนวนผู้ใช้ที่ใช้ในหัวข้อที่ 4.2 – 4.5 และจำนวนบิตข้อมูลที่ใช้ ในทุกหัวข้อการวิจัย.....66
ตารางที่ 4.2	กำลังสูงสุดของตัวขยายสัญญาณที่ใช้ในระบบ A และระบบ B.....68
ตารางที่ 4.3	เวลาประวิงที่ใช้ สำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ 5 ราย อัตรากลาง 4 ราย และอัตราสูง 3 ราย ตามลำดับ.....94
ตารางที่ 4.4	จำนวนผู้ใช้ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะเมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้.....103
ตารางที่ 4.5	ผลสรุปเปรียบเทียบระบบโดยรวม.....108

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1	ลักษณะการเรียงตัวของสัญลักษณ์ของ (ก) 4-QAM (ข) 16-QAM.....	11
รูปที่ 1.2	รูปแบบการส่งเชิงความถี่ของสัญญาณที่มีอัตราข้อมูลต่างกัน สำหรับแบบแผนที่มีการเปลี่ยนอัตราชีพ.....	12
รูปที่ 1.3	รูปแบบการส่งเชิงเวลาของสัญญาณที่มีอัตราข้อมูลต่างกัน สำหรับแบบแผนที่มีการเปลี่ยนอัตราชีพ.....	12
รูปที่ 1.4	รูปแบบการส่งเชิงเวลาของสัญญาณที่มีอัตราข้อมูลต่างกัน สำหรับแบบแผนที่ใช้อัตราส่วนแผ่หลายค่า.....	13
รูปที่ 1.5	รูปแบบการส่งเชิงเวลาของสัญญาณที่มีอัตราข้อมูลต่างกัน 2 เท่า สำหรับแบบแผนหลายรหัส.....	14
รูปที่ 1.6	ตัวอย่างคุณลักษณะของตัวขยายกำลังทั่วไป.....	16
รูปที่ 2.1	ตัวอย่างอัตรสหสัมพันธ์ของรหัสตั้งฉาก.....	22
รูปที่ 2.2	ตัวอย่างสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสตั้งฉาก.....	22
รูปที่ 2.3	ตัวอย่างอัตรสหสัมพันธ์ของลำดับสัญญาณรบกวนสุ่มเทียม.....	23
รูปที่ 2.4	ตัวอย่างสหสัมพันธ์ข้ามของลำดับสัญญาณรบกวนสุ่มเทียม.....	23
รูปที่ 2.5	ตัวอย่างการตัดสินใจผิดพลาดจากผลของสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้รายอื่น.....	25
รูปที่ 2.6	แบบจำลองการรับส่งข้อมูลของระบบ DS-CDMA พื้นฐาน.....	25
รูปที่ 2.7	ลักษณะสมบัติของตัวขยายสัญญาณเมื่อใช้ค่า $p = 1, 2, 4$ และ $10$ .....	28
รูปที่ 2.8	ตัวอย่างช่องสัญญาณที่เกิดเฟดดิ้งหลายวิถี.....	29
รูปที่ 2.9	แบบจำลองด้านส่งของระบบ DS-CDMA สามอัตรา (อัตรา R, 2R และ 4R) ที่ส่งด้วยแบบแผนหลายอัตรา.....	31
รูปที่ 2.10	แบบจำลองด้านรับของระบบ DS-CDMA สามอัตรา (อัตรา R, 2R และ 4R) ที่ส่งด้วยแบบแผนหลายอัตรา.....	33
รูปที่ 2.11	ลักษณะภาคส่งของระบบที่ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอล โดยใช้อัตราข้อมูล 4R.....	35
รูปที่ 2.12	ลักษณะภาครับของระบบที่ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอล โดยใช้อัตราข้อมูล 4R.....	35
รูปที่ 2.13	ลักษณะภาคส่งของระบบที่ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส โดยใช้อัตราข้อมูล 4R.....	37
รูปที่ 2.14	ลักษณะภาครับของระบบที่ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส โดยใช้อัตราข้อมูล 4R.....	37

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.15 เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในระบบอัตราเดียว.....	40
รูปที่ 2.16 เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในระบบสามอัตรา ที่ใช้แบบแผนหลายรหัส.....	42
รูปที่ 3.1 แบบจำลองภาคส่งของระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสใน ผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง (2R) และต่ำ (R) และใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอล ในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (4R).....	47
รูปที่ 3.2 แบบจำลองภาครับของระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสใน ผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง (2R) และต่ำ (R) และใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอล ในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (4R).....	48
รูปที่ 3.3 แบบจำลองภาคส่งของผู้ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส ที่ใช้ในระบบที่เสนอ (ข้อมูลอัตรา 4R).....	51
รูปที่ 3.4 แบบจำลองภาครับของผู้ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส ที่ใช้ในระบบที่เสนอ (ข้อมูลอัตรา 4R).....	51
รูปที่ 3.5 แบบจำลองภาคส่งของระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัส ในผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง (2R) และต่ำ (R) และใช้แบบแผน ไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (4R).....	53
รูปที่ 3.6 ชุดบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงของแบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัสที่ใช้.....	54
รูปที่ 3.7 แบบจำลองภาครับของระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสใน ผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง (2R) และต่ำ (R) และใช้แบบแผน ไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (4R).....	55
รูปที่ 3.8 แผนภูมิบล็อกของเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณรบกวนเป็นกลุ่มที่มี การป้อนกลับเพื่อมุ่งหักล้างสัญญาณแทรกสอดให้กับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง.....	57
รูปที่ 3.9 การหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางและต่ำ.....	58
รูปที่ 3.10 การหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง สำหรับระบบในหัวข้อที่ 3.1.....	61
รูปที่ 3.11 การหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง สำหรับระบบในหัวข้อที่ 3.2.....	61
รูปที่ 4.1 การแจกแจงของสัมประสิทธิ์การลดทอนขนาดสัญญาณแบบเรย์ลีที่ใช้ในการวิจัย.....	69









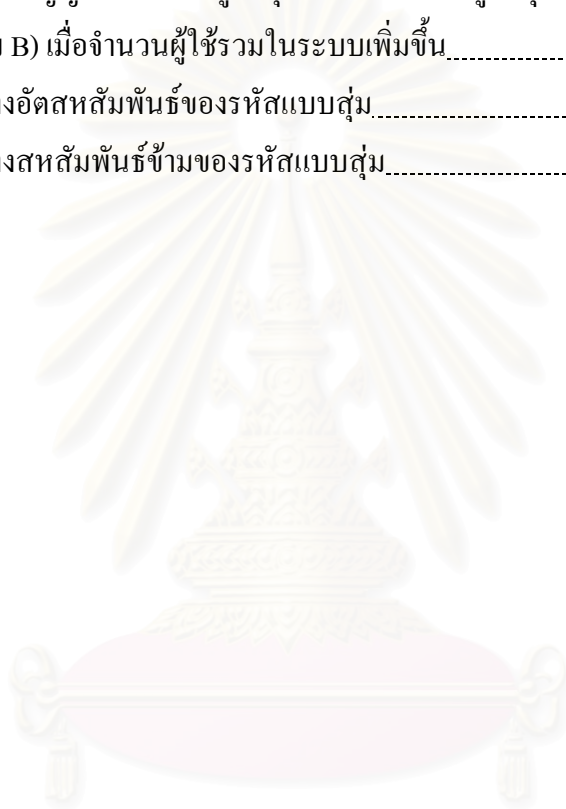




สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.45	อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง ของระบบที่ใช้ ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงที่สุดของผู้ใช้อัตรากลาง (ระบบ B) เมื่อจำนวนผู้ใช้รวมในระบบเพิ่มขึ้น.....	107
รูปที่ 4.46	อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ของระบบที่ใช้ ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงที่สุดของผู้ใช้อัตรากลาง (ระบบ B) เมื่อจำนวนผู้ใช้รวมในระบบเพิ่มขึ้น.....	107
รูปที่ ข.1	ตัวอย่างอัตรหสัมพันธ์ของรหัสแบบสุ่ม.....	125
รูปที่ ข.2	ตัวอย่างสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแบบสุ่ม.....	125



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บัญชีคำศัพท์

การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่	Frequency Division Multiple Access ย่อว่า FDMA
การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา	Time Division Multiple Access ย่อว่า TDMA
การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส	Code Division Multiple Access ย่อว่า CDMA
การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสชนิดจัดลำดับ เข้าถึงโดยตรง	Direct Sequence - Code Division Multiple Access ย่อว่า DS-SS-SSA
การจัดลำดับเข้าถึงโดยตรง	Direct Sequence ย่อว่า DS
ความกว้างแถบ	bandwidth
รหัสแผ่	spreading code
ชิพ	chip
แผ่	spread
รวมกลับ	despread
การตัดสินใจ	bit decision
เครื่องรับแบบแมตช์ฟิลเตอร์	Matched filter หรือ Conventional receiver
เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายราย	Multisuser detection ย่อว่า MUD
สัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้รายอื่น	Multiple Access Interference ย่อว่า MAI
สถานีฐาน	base station
สถานีเคลื่อนที่	mobile station
การส่งข้อมูลขาขึ้น หรือขาเชื่อมโยงขาขึ้น	Up link หรือ Reverse link
การส่งข้อมูลขาลง หรือขาเชื่อมโยงขาลง	Down link หรือ Forward link
เครื่องรับที่เหมาะสมที่สุด	Optimum receiver
เครื่องรับที่เหมาะสมรองลงไป	Sub-optimum receiver
เครื่องรับแบบเชิงเส้น	Linear receiver
เครื่องรับแบบดีคอรรีเลต	Decorrelating detector ย่อว่า DD
เครื่องรับชนิดที่ทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของ ค่าผิดพลาดต่ำที่สุด	Minimum Mean Square Error Receiver ย่อว่า MMSE

เครื่องรับแบบไม่เชิงเส้น	Non-linear Receiver
เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน	Parallel Interference Cancellation ย่อว่า PIC
เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างต่อเนื่อง	Successive Interference Cancellation ย่อว่า SIC
เครื่องรับแบบนำข้อมูลที่ตัดสินใจแล้วมาป้อนกลับ	Decision-feedback detector
เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายคนที่มีการปรับตัวได้	Adaptive multiuser detection
การประวิง	delay
การสื่อสารแบบแบ่งรหัสแบบหลายอัตรา	Multirate CDMA
แบบแผนหลายอัตรา	Multirate scheme
มัลติเพลกซ์	multiplex
ดีมัลติเพลกซ์	demultiplex
แบบแผนที่ใช้การมอดูเลตหลายค่า	Multi-modulation scheme
แบบแผนที่มีการเปลี่ยนอัตราชีพ	Variable chip rate scheme
แบบแผนที่ใช้อัตราส่วนแผ่หลายค่า	Multi-spreading factor
แบบแผนหลายรหัส	Multicode scheme
อัตราส่วนแผ่	spreading factor หรือ spreading ratio
ความต้านทานต่อปรากฏการณ์ใกล้-ไกล	Near-far resistance
อัตราส่วนกำลังค่ายอดต่อกำลังเฉลี่ย	peak-to-average ratio ย่อว่า PAV
ความผิดเพี้ยนแบบไม่เชิงเส้น	Nonlinear distortion
การมอดูเลตแบบไบออร์โทกอนอล	Biorthogonal modulation
แบบแผนไบออร์โทกอนอล	Biorthogonal scheme
การมอดูเลตแบบไบออร์โทกอนอลแบบหลายรหัส	Biorthogonal Multicode modulation
แบบแผนไบออร์โทกอนอลแบบหลายรหัส	Biorthogonal Multicode scheme
สัญญาณย่อย	sub-stream
ซิงโครนัส	synchronous
อะซิงโครนัส	asynchronous
เฟดดิ้งแบบเรย์ลี	Rayleigh fading
สหสัมพันธ์ข้าม	cross-correlation
อัตสหสัมพันธ์	auto-correlation
รหัสยาว	long code
รหัสสั้น	short code

รหัสตั้งฉาก	Orthogonal code หรือ OG code
ลำดับสัญญาณรบกวนสุ่มเทียม	Pseudorandom Noise sequence หรือ PN squence
รหัสแบบสุ่ม	random code
เฟดดิ้งหลายวิถี	Multipath fading
ปรากฏการณ์ใกล้-ไกล	Near-far effect
การควบคุมกำลัง	power control
การควบคุมกำลังแบบสมบูรณ์	perfect power control
การควบคุมกำลังแบบไม่สมบูรณ์	imperfect power control
ตัวขยายสัญญาณ	power amplifier ย่อว่า PA
ระบบสามอัตรา	tri-rate system
แบบจำลองระบบ	system model
อัตราความผิดพลาดบิต	bit error rate ย่อว่า BER
อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน	signal-to-noise ratio ย่อว่า SNR
การทำให้เป็นบรรทัดฐาน	normalization
AWGN	เป็นตัวย่อของ Additive White Gaussian Noise
S/P	เป็นตัวย่อของ Serial-to-Parallel Conversion
P/S	เป็นตัวย่อของ Parallel-to-Serial Conversion



# บทที่ 1

## บทนำ

ในระบบสื่อสารเคลื่อนที่โดยทั่วไปจะเปิดโอกาสให้ผู้ใช้หลายรายเข้าใช้ทรัพยากรโครงข่ายร่วมกัน ดังนั้น จึงต้องมีการจัดการให้ผู้ใช้แต่ละรายเข้าใช้ทรัพยากรโครงข่ายด้วยความเท่าเทียมกัน การจัดการดังกล่าวเรียกว่า การเข้าถึงหลายทาง (Multiple Access) ซึ่งระบบสื่อสารเคลื่อนที่ในยุคแรกๆ นั้น จะใช้การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (Frequency Division Multiple Access, FDMA) ซึ่งเป็นการจัดสรรทรัพยากรความถี่ให้กับผู้ใช้แต่ละราย ต่อมาเมื่อจำนวนผู้ใช้เพิ่มมากขึ้น การจัดสรรทรัพยากรความถี่เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอต่อจำนวนผู้ใช้ การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access, TDMA) ซึ่งเป็นการแบ่งช่วงเวลาให้ผู้ใช้แต่ละรายร่วมกับการแบ่งความถี่ในแบบเดิมจึงถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มการรองรับจำนวนผู้ใช้ที่มากขึ้น อย่างไรก็ตามการเข้าถึงหลายทางด้วยวิธีดังกล่าวยังมีข้อจำกัดในด้านความจุของระบบ จึงได้มีการนำวิธีการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (Code Division Multiple Access, CDMA) มาใช้ โดยอาจเรียกระบบสื่อสารที่ใช้การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัสว่า ระบบ CDMA

ระบบ CDMA เป็นระบบที่แบ่งแยกสัญญาณของผู้ใช้แต่ละรายด้วยรหัสที่ต่างกัน โดยผู้ใช้จะสามารถใช้ทรัพยากรความถี่ และทรัพยากรเวลาได้อย่างเต็มที่ ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าระบบ CDMA เป็นระบบที่ไม่มีข้อจำกัดทางด้านความจุที่แน่นอน ทั้งนี้เนื่องจากความจุของระบบจะถูกจำกัดด้วยจำนวนรหัสที่ใช้และค่าสัญญาณแทรกสอดที่เพิ่มขึ้นจากจำนวนผู้ใช้ที่เพิ่มขึ้นในระบบ แทนที่จะเป็นทรัพยากรความถี่และเวลาดังเช่นในกรณีที่ใช้การเข้าถึงหลายทางแบบเดิม ด้วยเหตุนี้ระบบ CDMA จึงได้รับการคาดหมายว่าจะเป็นระบบสื่อสารที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการสื่อสารเคลื่อนที่ยุคที่ 3

โดยทั่วไป ระบบ CDMA มีวิธีการแบ่งแยกผู้ใช้ด้วยรหัสหลายวิธี อาทิเช่นวิธีการแบบกระโดดเปลี่ยนความถี่ (Frequency Hopping , FH) และวิธีการแบบจัดลำดับเข้าถึง โดยตรง (Direct Sequence , DS) สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาเฉพาะระบบ CDMA ที่ใช้วิธีการแบบจัดลำดับเข้าถึง โดยตรง หรือเรียกว่าระบบ DS-SS-CDMA เท่านั้น เนื่องจากเป็นวิธีการที่มีความซับซ้อนต่ำ และได้มีการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์แล้ว อย่างไรก็ตามการใช้ระบบ DS-SS-CDMA อาจต้องประสบปัญหาเกี่ยวกับสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้รายอื่น ซึ่งเกิดจากรหัสไม่ตั้งฉากกันโดยสมบูรณ์ นอกจากนี้ปรากฏการณ์ใกล้-ไกลจะทำให้ปัญหาดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น อย่างไรก็ตาม การควบคุมกำลังและการใช้เครื่องรับแบบผู้ใช้หลายรายจะช่วยลดปัญหาดังกล่าวได้มาก



ในบทนี้จะกล่าววาทกรรมถึงความเป็นมา และความรู้เบื้องต้นของระบบ CDMA จากนั้นจะกล่าวแนะนำเครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายที่มีผู้เสนอขึ้นมา รวมไปถึงข้อดีข้อเสียของเครื่องรับชนิดต่างๆ ในส่วนท้ายจะกล่าวถึงแนวทาง วัตถุประสงค์ ขอบเขตงาน ขั้นตอนการดำเนินงาน ตลอดจนภาพรวมของเนื้อหาในแต่ละบท และการนิยามสัญลักษณ์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์

## 1.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบ CDMA

ระบบสื่อสาร CDMA ถูกนำมาใช้งานครั้งแรกโดยกองทัพสหรัฐอเมริกาในสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ด้วยเหตุผลสำคัญทางด้านการรักษาความปลอดภัยในการข่าว และความทนทานต่อการถูกรบกวน โดยแต่เดิมนั้นเรียกว่า การมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่ (Spread Spectrum) ซึ่งมีที่มาจากวิธีการที่ทำให้ข้อมูลดั้งเดิมที่มีความกว้างแถบแคบถูกแผ่ออกเป็นข้อมูลที่มีความกว้างแถบกว้างขึ้นกว่าเดิมในระหว่างการส่ง ทำให้ทนทานต่อสัญญาณรบกวนที่มีความกว้างแถบแคบ และยากต่อการดักฟังจากศัตรู ทั้งนี้การมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่ มีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภทใหญ่ ๆ [1] คือ

- 1) **ชนิดกระโดดเปลี่ยนความถี่ (Frequency Hopping, FH)** อาจกล่าวได้ว่าเป็นวิธีการแผ่ด้วยรหัสทางความถี่ โดยความถี่ทั้งหมดที่ใช้จะถูกแบ่งออกเป็น  $N$  ช่อง ทั้งนี้การส่งบิตข้อมูลจะมีการเปลี่ยนแถบความถี่ที่ใช้ส่งไปตามช่วงความถี่ทั้ง  $N$  ช่องนั้น ซึ่งรูปแบบการเปลี่ยนแถบความถี่จะสอดคล้องกับรหัสของผู้ใช้รายนั้น ๆ
- 2) **ชนิดจัดลำดับเข้าถึงโดยตรง (Direct Sequence, DS)** อาจกล่าวได้ว่าเป็นวิธีการแผ่ด้วยรหัสทางเวลา โดยในการส่งข้อมูล ข้อมูลแต่ละบิตจะถูกแทนที่ด้วยรหัสที่มีจำนวนของบิตมากกว่า ทั้งนี้จะเรียกแต่ละบิตของรหัสว่า ชิป

ต่อมา เทคโนโลยีการมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อวัตถุประสงค์ในเชิงพาณิชย์ โดยได้พัฒนาเป็นการเข้าถึงหลายทางแบบใหม่ เรียกว่า การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งรหัส (CDMA) ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาในด้านความจุที่จำกัดในการเข้าถึงหลายทางแบบเดิม ระบบ CDMA ที่นำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบันอยู่บนพื้นฐานของการมอดูเลตแบบสเปกตรัมแผ่ชนิดจัดลำดับเข้าถึงโดยตรง หรือเป็นที่รู้จักกันในชื่อ DS-SS-SSMA

ระบบ CDMA จะอนุญาตให้ผู้ใช้หลายรายส่งข้อมูลด้วยแถบความถี่ และช่วงเวลาเดียวกันได้ ทั้งนี้สัญญาณของผู้ใช้แต่ละรายจะถูกแยกแยะด้วยรหัสที่แตกต่างกันไป โดยรหัสดังกล่าวเรียกว่า ลำดับลายมือชื่อ (signature sequence) หรือ รหัสแผ่ (spreading code) ในภาคส่ง บิตข้อมูลของผู้ใช้แต่ละรายจะถูกเปลี่ยนเป็นรหัสแผ่ของผู้ใช้รายนั้นๆ บนพื้นฐานของการมอดูเลตแบบสเปกตรัม

แผ่ชนิดจัดลำดับเข้าถึงโดยตรงที่กล่าวมาแล้วข้างต้น และผู้ใช้แต่ละรายจะส่งข้อมูลที่ถูกแผ่แล้วออกสู่ช่องสัญญาณด้วยแถบความถี่และช่วงเวลาเดียวกัน ทำให้ในช่องสัญญาณจะประกอบด้วยข้อมูลที่ถูกแผ่แล้วของผู้ใช้หลายๆ รายรวมกัน ดังนั้นที่ภาครับจำเป็นต้องทราบรหัสสำหรับผู้ใช้รายหนึ่งๆ สำหรับการแผ่กลับ (despread) เพื่อรับทราบข้อมูลของผู้ใช้รายนั้น กล่าวโดยสรุปคือ ข้อมูลของผู้ใช้แต่ละรายจะแบ่งกันใช้ช่องสัญญาณด้วยรหัสแผ่ที่ใช้ในการส่งนั่นเอง

ประวัติศาสตร์ในเชิงพาณิชย์ของระบบ CDMA เริ่มต้นในปี ค.ศ. 1989 โดยบริษัท QUALCOMM ของสหรัฐอเมริกาได้นำระบบ DS-SS-SSMA มาใช้เป็นระบบสื่อสารสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยในระยะแรกนั้นระบบ CDMA ยังไม่เป็นที่แพร่หลายและไม่ได้รับการยอมรับเท่าที่ควร บริษัท QUALCOMM จึงได้ทำการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนอีก 4 ปีให้หลัง Telecommunications Industry Association (TIA) จึงยอมรับให้ระบบ DS-SS-SSMA เป็นมาตรฐานของการต่อร่วมทางอากาศ (air-interface) สำหรับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่แบบดิจิทัลเซลลูลาร์ (digital cellular) ยุคที่ 2 เมื่อวันที่ 16 มิถุนายน ค.ศ.1993 โดยมาตรฐานนี้มีชื่อว่า มาตรฐาน IS-95 ซึ่งจะกำหนดให้ช่องสัญญาณแต่ละช่องมีความกว้างแถบเป็น 1.228 MHz ทั้งนี้มาตรฐานดังกล่าวได้ถูกใช้มาจนถึงปัจจุบัน

ในอนาคตอันใกล้นี้ ระบบสื่อสารเคลื่อนที่ที่ใช้จะเป็นระบบการสื่อสารแบบเคลื่อนที่ใน ยุคที่ 3 ตาม มาตรฐาน Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) ของยุโรป และ มาตรฐาน International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000) ของนานาชาติ ทั้งนี้ระบบสื่อสารเคลื่อนที่ยุคที่ 3 นี้มีความต้องการการรองรับความจุที่มากขึ้น ตลอดจนการบริการที่หลากหลาย ทำให้การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งความถี่ (FDMA) รวมทั้งการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งเวลา (TDMA) ซึ่งมีขีดจำกัดในหลายๆ ด้านไม่สามารถรองรับความต้องการดังกล่าวได้ ดังนั้นระบบ DS-SS-SSMA จึงได้รับการคาดหมายว่าจะเข้ามามีบทบาทสำคัญต่อการสื่อสารแบบเคลื่อนที่ในยุคที่ 3 โดยมีมาตรฐานของการต่อร่วมทางอากาศที่อยู่ในระหว่างการพัฒนาอยู่ 2 มาตรฐาน ก็คือ มาตรฐาน WCDMA ของยุโรปและญี่ปุ่น และมาตรฐาน CDMA2000 ของอเมริกาเหนือ ซึ่งทั้งสองมาตรฐานนี้ กำหนดให้ช่องสัญญาณแต่ละช่องมีความกว้างแถบ 5 MHz ขึ้นไป เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IS-95 ซึ่งมีความกว้างแถบเพียง 1.2288 MHz จึงเรียกมาตรฐาน IS-95 ว่า CDMA แถบแคบ (Narrowband CDMA) และเรียกมาตรฐาน WCDMA และ CDMA2000 ว่า CDMA แถบกว้าง (Wideband CDMA) [2,3]

## 1.2 เครื่องรับแบบดั้งเดิม หรือเครื่องรับแบบแมตช์ฟิลเตอร์ (Conventional Receiver หรือ Matched Filter, MF)

เครื่องรับพื้นฐานที่ใช้ในระบบ DS-CDMA จะเป็นเครื่องรับที่มีลักษณะเป็นแมตช์ฟิลเตอร์ ซึ่งจะใช้เพียงรหัสของผู้ใช้รายที่สนใจในการตรวจรับสัญญาณของผู้ใช้ดังกล่าว ทั้งนี้โดยปกติชุดรหัสที่ใช้นั้นมีค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างรหัสของผู้ใช้ต่างรายจะมีค่าน้อย นั่นคือสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อื่นที่เกิดขึ้นหลังจากทำการแมตช์จะมีค่าน้อย อย่างไรก็ตาม เมื่อจำนวนของผู้ใช้มากขึ้นค่าสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อื่นก็จะมากขึ้นตาม เป็นผลให้การรับข้อมูลที่ถูกส่งมาเกิดความผิดพลาด ส่งผลเสียต่อความจุของระบบ ด้วยเหตุนี้สัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อื่นจึงเป็นปัญหาสำคัญในระบบ DS-CDMA

ปัจจัยอย่างหนึ่งที่มีผลต่อค่าสัญญาณแทรกสอดดังกล่าวคือปรากฏการณ์ใกล้-ไกล ปรากฏการณ์ใกล้-ไกลเป็นสถานะที่สัญญาณของผู้ใช้แต่ละรายที่เดินทางมาถึงสถานีฐานมีกำลังไม่เท่ากัน ซึ่งอาจเกิดจากระยะห่างจากสถานีฐานของผู้ใช้แต่ละรายไม่เท่ากัน โดยปรากฏการณ์ใกล้-ไกลจะทำให้ผลของสัญญาณแทรกสอดต่อผู้ใช้ที่กำลังต่ำมีมากขึ้น ซึ่งจะส่งผลเสียต่อสมรรถนะโดยรวมของระบบ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมกำลังที่คิดเพื่อให้กำลังสัญญาณของผู้ใช้แต่ละรายที่เดินทางมาถึงสถานีฐานมีค่าใกล้เคียงกัน

## 1.3 เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายราย (Multiuser Detection, MUD) [4-8]

สืบเนื่องจากปัญหาที่เกิดจากสัญญาณแทรกสอดระหว่างผู้ใช้ดังที่ได้กล่าวมาในหัวข้อที่แล้ว ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลเสียต่อสมรรถนะของระบบ และยังเป็นผลให้ระบบประเภชบางต่อปรากฏการณ์ใกล้-ไกลอีกด้วย ดังนั้นจึงได้มีการเสนอเครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายขึ้นเพื่อจุดประสงค์ในการลดค่าสัญญาณแทรกสอดดังกล่าว โดยการนำความรู้เกี่ยวกับรหัสแผ่และกำลังสัญญาณของผู้ใช้อื่นๆ ในเซลล์มาช่วยกำจัดสัญญาณแทรกสอด ก่อนที่จะนำสัญญาณไปตัดสินใจรับ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ส่งมา

เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายโดยปกติจะถูกใช้ที่สถานีฐานเท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากสถานีฐานจะต้องรับส่งข้อมูลกับผู้ใช้ทุกรายในเซลล์ที่รับผิดชอบ ดังนั้นเครื่องรับที่สถานีฐานจะทราบข้อมูลรหัสแผ่ของผู้ใช้ทุกรายในเซลล์ นอกจากนี้โดยทั่วไปการส่งข้อมูลขาขึ้น ซึ่งเป็นการส่งสัญญาณจากสถานีเคลื่อนที่ ไปยังสถานีฐานมักจะมีค่าน้อยและประเภชบางมากกว่า ข่ายเชื่อมโยงทาง

ซึ่งเป็นการส่งสัญญาณจากสถานีฐานไปยังสถานีเคลื่อนที่ ดังนั้นการเพิ่มความจุให้กับข่ายเชื่อมโยงขาขึ้น โดยการใช้เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายที่สถานีฐาน จึงเป็นการเพิ่มความจุของทั้งระบบไปด้วย

งานวิจัยที่จุดประกายให้เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายเกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1984 โดย Verdu S. ได้เสนอเครื่องรับที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งเป็นเครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายที่มีสมรรถนะในแง่ของอัตราความผิดพลาดคี่ที่สุด และ Verdu ก็ได้แสดงให้เห็นว่าระบบ CDMA นั้น แท้จริงแล้วไม่ได้เป็นระบบที่ถูกจำกัดด้วยปัญหาสัญญาณแทรกสอดระหว่างผู้ใช้ โดยปัญหาดังกล่าวเป็นเพียงข้อจำกัดของเครื่องรับแบบธรรมดาเท่านั้น มิใช่เป็นข้อจำกัดของระบบ CDMA หลังจากนั้นเป็นต้นมา เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายก็ได้รับความสนใจอย่างมาก โดยงานวิจัยในระยะต่อมามุ่งเน้นไปที่เครื่องรับที่มีสมรรถนะต่ำลงแต่มีความซับซ้อนน้อยกว่า ซึ่งเรียกว่า เครื่องรับที่เหมาะสมรองลงไป ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องรับที่เหมาะสมที่สุดนั้นมีความซับซ้อนสูงมาก รวมทั้งต้องการทราบข้อมูลต่างๆ มากเกินกว่าที่จะนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ

ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาได้เกิดเครื่องรับที่เหมาะสมรองลงไปเป็นจำนวนมาก โดยเครื่องรับแต่ละแบบจะมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป ทั้งนี้เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปในระบบที่ผู้ใช้แต่ละรายส่งข้อมูลด้วยอัตราบิตเท่ากันหมด (single-rate system) จนกระทั่งในปี ค.ศ. 1996 Mitra U. ได้เสนอเครื่องรับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับระบบแบบหลายอัตรา (multirate system) ขึ้นเป็นครั้งแรก หลังจากนั้นจึงค่อย ๆ เกิดเครื่องรับที่เหมาะสมรองลงไปสำหรับระบบ CDMA แบบหลายอัตราตามมา ซึ่งโดยส่วนใหญ่ก็จะใช้หลักการเดียวกับที่ใช้ในระบบ CDMA แบบอัตราเดียว เพียงแต่มีการปรับปรุงโครงสร้างบางอย่างให้เหมาะสมกับแบบแผนหลายอัตรา

เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายอาจจำแนกได้เป็นประเภทต่างๆ ดังนี้

### 1.3.1 เครื่องรับที่เหมาะสมที่สุด (Optimum Receiver)

เครื่องรับที่เหมาะสมที่สุดแรกเริ่มนั้นถูกเสนอโดย Verdu S. [9] เครื่องรับที่เหมาะสมที่สุดนี้ใช้หลักการของ Maximum-Likelihood Sequence Estimation (MLSE) ในการหาค่าสัญญาณที่ส่งมา กล่าวคือ จะทำการพิจารณาชุดของข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมดเปรียบเทียบกับสัญญาณที่รับได้ โดยจะถือว่าชุดของข้อมูลที่ทำให้ได้สัญญาณเหมือนกับลำดับของสัญญาณที่รับได้มากที่สุดเป็นข้อมูลที่ผู้ใช้ส่งมา อย่างไรก็ตามแม้ว่าเครื่องรับชนิดนี้จะมีสมรรถนะที่ดีมาก แต่ก็มีข้อเสียที่สำคัญ คือ มีความซับซ้อนสูงมาก โดยความซับซ้อนจะเพิ่มขึ้นตามจำนวนผู้ใช้ด้วยอัตราแบบเอกซ์โพเนนเชียล

อีกทั้งยังต้องการทราบค่าพารามิเตอร์ของผู้ใช้และพารามิเตอร์ของระบบเป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้ไม่สามารถนำเครื่องรับชนิดนี้ไปประยุกต์ใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ ดังนั้นงานวิจัยส่วนใหญ่จึงมุ่งเน้นไปยังเครื่องรับซึ่งมีสมรรถนะที่ดีกว่าเครื่องรับที่เหมาะสมที่สุด แต่ยังมีสมรรถนะที่ดีกว่าเครื่องรับแบบธรรมดา ซึ่งเรียกว่าเครื่องรับที่เหมาะสมรองลงไปนั่นเอง

### 1.3.2 เครื่องรับที่เหมาะสมรองลงไป (Sub-optimum receiver)

เครื่องรับที่เหมาะสมรองลงไป เป็นเครื่องรับที่มีสมรรถนะดีน้อยกว่าเครื่องรับที่เหมาะสมที่สุด แต่ยังคงมีสมรรถนะที่ดีกว่าเครื่องรับแบบธรรมดา รวมทั้งมีความซับซ้อนไม่มากนัก เครื่องรับที่เหมาะสมรองลงไป สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ เครื่องรับแบบเชิงเส้น และเครื่องรับแบบไม่เชิงเส้น

#### 1.3.2.1 เครื่องรับแบบเชิงเส้น (Linear receiver)

เครื่องรับชนิดนี้ประกอบด้วยเครื่องรับแบบธรรมดาของผู้ใช้ทุกรายในระบบ โดยสัญญาณที่ออกจากเครื่องรับแบบธรรมดา จะถูกนำมาผ่านกระบวนการแบบเชิงเส้น แล้วจึงค่อยนำผลรับที่ได้ไปตัดสินใจผล เครื่องรับแบบนี้มีอยู่ 2 ชนิดที่สำคัญ โดยแตกต่างกันตรงกระบวนการแบบเชิงเส้นที่ใช้ ดังนี้

- เครื่องรับแบบดีคორเรลเลต (Decorrelating Detector : DD) [10,11]

เครื่องรับแบบดีคอรเรลเลตจะใช้กระบวนการแบบเชิงเส้นที่มีผลตอบเป็นเมตริกซ์ผกผันของเมตริกซ์สหสัมพันธ์ (correlation matrix) ของรหัสของผู้ใช้ทุกรายในระบบ ซึ่งเป็นวิธีการขจัดสัญญาณแทรกสอดที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามเครื่องรับแบบดีคอรเรลเลตจะเพิ่มผลของสัญญาณรบกวน (noise) ดังนั้นในกรณีที่กำลังของสัญญาณรบกวนมีค่ามาก เครื่องรับแบบดีคอรเรลเลตจะมีสมรรถนะที่ไม่ดี

ในระยะหลังได้มีการนำเครื่องรับแบบดีคอรเรลเลตมาประยุกต์ใช้ในระบบ CDMA แบบหลายอัตรา อาทิเช่น เครื่องรับแบบดีคอรเรลเลตชนิดอัตราบิดต่ำ (Low-rate Decorrelator : LRD) และเครื่องรับแบบดีคอรเรลเลตชนิดอัตราบิดสูง (High-rate Decorrelator : HRD) เป็นต้น [12]



- **เครื่องรับชนิดที่ทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าผิดพลาดต่ำที่สุด (Minimum Mean Square Error receiver : MMSE) [13]**

เครื่องรับชนิดที่ทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าผิดพลาดต่ำที่สุดจะใช้กระบวนการแบบเชิงเส้นที่มีผลตอบเป็นเมตริกซ์ผกผันของเมตริกซ์สหสัมพันธ์ของรหัสผู้ใช้ร่วมกับเมตริกซ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวน ดังนั้นเครื่องรับชนิดนี้จะมีสมรรถนะที่ดีกว่าเครื่องรับแบบดีคอริเลตในกรณีที่ระบบมีสัญญาณรบกวนสูง และมีสมรรถนะใกล้เคียงกับเครื่องรับแบบดีคอริเลตในกรณีที่ระบบมีสัญญาณรบกวนต่ำ

สุวิชัย คุนารัตนพฤกษ์ ได้พยายามลดความซับซ้อนของเครื่องรับนี้ในระบบ CDMA แบบอัตราเดียว [14-16]

### 1.3.2.2 เครื่องรับแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear Receiver)

โดยทั่วไปเครื่องรับชนิดนี้จะทำงานโดยการประมาณสัญญาณของผู้ใช้รายอื่นในระบบจากการตัดสินใจข้อมูลในขั้นแรก แล้วนำไปหักล้างออกจากสัญญาณรวม (สัญญาณที่ได้รับ) ซึ่งเป็นการขจัดสัญญาณแทรกสอดของผู้ใช้ดังกล่าว จากนั้นสัญญาณที่ถูกหักล้างแล้วจะถูกนำไปสู่กระบวนการตัดสินใจของผู้ใช้รายที่สนใจ สมรรถนะของเครื่องรับชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับความถูกต้องในการประมาณสัญญาณของผู้ใช้รายอื่นที่จะนำมาหักล้างจากสัญญาณรวมเป็นหลัก ถ้ามีความถูกต้องมากเครื่องรับชนิดนี้ก็จะมีประสิทธิภาพที่ดีตามไปด้วย เครื่องรับที่มีการทำงานในลักษณะดังกล่าวและเป็นที่น่าสนใจในงานวิจัย มีอยู่ 3 ชนิดด้วยกัน คือ

- **เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน (Parallel Interference Cancellation, PIC) [17]**

เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานจะทำการประมาณบิตข้อมูลของผู้ใช้ทุกรายออกมาก่อนในขั้นแรกโดยใช้เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ แล้วนำบิตข้อมูลเหล่านั้นไปใช้ในการหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ใช้รายอื่นออกจากสัญญาณที่รับได้ โดยการหักล้างสัญญาณแทรกสอดจะทำพร้อมกันในผู้ใช้ทุกรายก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการตัดสินใจของผู้ใช้แต่ละราย ดังนั้นเครื่องรับแบบนี้จึงใช้เวลาในกระบวนการต่างๆ ต่ำ อย่างไรก็ตามเครื่องรับแบบนี้จะมีสมรรถนะขึ้นอยู่กับความแม่นยำในการประมาณข้อมูลในขั้นแรกเป็นหลัก และจะเหมาะสมสำหรับระบบที่มีการควบคุมกำลังอย่างดีเท่านั้น ทั้งนี้ในการประมาณสัญญาณขั้นแรกอาจใช้เครื่องรับที่มีสมรรถนะที่ดีขึ้นเพื่อปรับปรุงสมรรถนะโดยรวมของเครื่องรับชนิดนี้ได้

เจนวิทย์ สิ้นธุสัถค ได้เพิ่มสมรรถนะของเครื่องรับชนิดนี้ในระบบ CDMA แบบอัตราเดียว [18]

- **เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างต่อเนื่อง (Successive Interference Cancellation, SIC) [19,20]**

เครื่องรับชนิดนี้เหมาะสำหรับระบบที่ไม่มีการควบคุมกำลังที่ดีพอ โดยจะพิจารณาความเชื่อถือได้ของสัญญาณผู้ใช้ต่างๆ ตามกำลังของผู้ใช้ กล่าวคือจะทำการหาบิตข้อมูลของผู้ใช้ที่มีกำลังแรงที่สุดออกมาก่อน โดยใช้เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ จากนั้นทำการหักล้างการแทรกสอดของผู้ใช้รายนี้ออกจากสัญญาณที่รับได้ แล้วนำสัญญาณที่ผ่านการหักล้างแล้วนี้ไปหาบิตข้อมูลของผู้ใช้ที่มีกำลังสูงที่สุดในบรรดาผู้ใช้ที่เหลือ เมื่อทำซ้ำกระบวนการเดิมไปเรื่อยๆ ก็จะได้บิตข้อมูลของผู้ใช้ทุกรายออกมาอย่างต่อเนื่องกัน เครื่องรับนี้จะใช้เวลาในกระบวนการทั้งหมดมากกว่าเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน แต่สมรรถนะจะขึ้นอยู่กับการประมาณบิตในขั้นแรกๆ เช่นเดียวกัน

- **เครื่องรับแบบนำข้อมูลที่ตัดสินใจแล้วมาป้อนกลับ (Decision feedback detector) [21]**

เครื่องรับชนิดนี้ประกอบด้วยวงจรกรอง 2 วงจร คือ วงจรกรองป้อนไปหน้า และวงจรกรองป้อนกลับ โดยวงจรกรองป้อนไปหน้าทำหน้าที่กำจัดผลของผู้ใช้ที่มีกำลังต่ำกว่าออกจากผู้ใช้ที่มีกำลังสูงกว่า ส่วนวงจรกรองป้อนกลับมีหน้าที่ป้อนผลการตัดสินใจบิตของผู้ใช้ที่มีกำลังสูงกว่า เพื่อนำไปช่วยในการตัดสินใจบิตของผู้ใช้ที่มีกำลังต่ำกว่า กระบวนการที่ใช้วงจรกรองทั้งสองทำให้เครื่องรับชนิดนี้มีสมรรถนะที่ดีมาก

เพ็ชรพร หลินประเสริฐ ลดความซับซ้อนของเครื่องรับชนิดนี้ในระบบ CDMA แบบอัตราเดียว [22-24]



ตารางที่ 1.1 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของเครื่องรับที่เหมาะสมลงไปแต่ละแบบ

เครื่องรับ	ข้อดี	ข้อเสีย
ดีคอร์รีเลเตอร์	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ไม่ต้องทราบขนาดของสัญญาณ</li> <li>● มีสมรรถนะสูง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● มีโอกาสหาเมตริกซ์ผกผันไม่ได้</li> <li>● มีความซับซ้อนสูง</li> <li>● เพิ่มผลของสัญญาณรบกวน</li> </ul>
เครื่องรับชนิดที่ทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าผิดพลาดต่ำที่สุด (MMSE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● มีสมรรถนะสูง</li> <li>● ไม่เพิ่มผลของสัญญาณรบกวน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ต้องทราบขนาดของสัญญาณที่มาถึง</li> <li>● มีโอกาสหาเมตริกซ์ผกผันไม่ได้</li> <li>● มีความซับซ้อนสูง</li> </ul>
เครื่องรับแบบหักล้างอย่างขนาน (PIC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● มีความซับซ้อนต่ำ</li> <li>● ไม่ต้องทำการหาเมตริกซ์ผกผัน</li> <li>● เวลาประวิง (delay) น้อยมาก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ต้องทราบขนาดของสัญญาณที่มาถึง</li> <li>● ไม่ทนต่อปรากฏการณ์ใกล้-ไกล</li> <li>● สมรรถนะขึ้นอยู่กับการประมาณในขั้นแรก</li> </ul>
เครื่องรับแบบหักล้างอย่างต่อเนื่อง (SIC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ไม่จำเป็นต้องมีการควบคุมกำลังที่ดี</li> <li>● มีความซับซ้อนต่ำ</li> <li>● ไม่ต้องทำการหาเมตริกซ์ผกผัน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ต้องทราบขนาดของสัญญาณ</li> <li>● เวลาประวิงมากขึ้นตามจำนวนผู้ใช้</li> <li>● สมรรถนะขึ้นอยู่กับการประมาณในขั้นแรกๆ</li> </ul>
เครื่องรับแบบนำข้อมูลที่ตัดสินแล้วมาป้อนกลับ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● มีสมรรถนะสูง</li> <li>● ทนทานต่อสภาวะไม่อุดมคติต่างๆ เช่น สัญญาณรบกวน ปรากฏการณ์ใกล้-ไกล เป็นต้น</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ต้องทราบขนาดของสัญญาณที่มาถึง</li> <li>● มีโอกาสหาเมตริกซ์ผกผันไม่ได้</li> <li>● มีความซับซ้อนสูง</li> </ul>

### 1.3.3 เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายที่มีการปรับตัวได้ (Adaptive Multiuser Detection) [25,26]

เครื่องรับที่เหมาะสมจะไปดังกล่าวนี้ ถ้าต้องการสมรรถนะที่สูงจะต้องแลกกับความซับซ้อนที่สูงมาก ดังนั้นจึงมีงานวิจัยจำนวนมากเสนอเครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายที่มีการปรับตัวได้ เพื่อลดความซับซ้อนดังกล่าว โดยยังคงสมรรถนะที่ด้อยลงไม่มากนัก

### 1.4 ข้อดี-ข้อเสียของเครื่องรับแต่ละแบบ

ข้อดี-ข้อเสียของเครื่องรับที่เหมาะสมจะไปแต่ละแบบแสดงไว้ในตารางที่ 1.1 โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะสนใจเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดเป็นหลัก เนื่องจากมีความซับซ้อนต่ำ และไม่มีความเสี่ยงจากเมตริกซ์สหสัมพันธ์ข้ามที่เป็นเมตริกซ์เอกฐาน (singular matrix) ซึ่งจะมีปัญหาในการหาเมตริกซ์ผกผันในกระบวนการกำจัดสัญญาณแทรกสอดของเครื่องรับชนิดอื่น

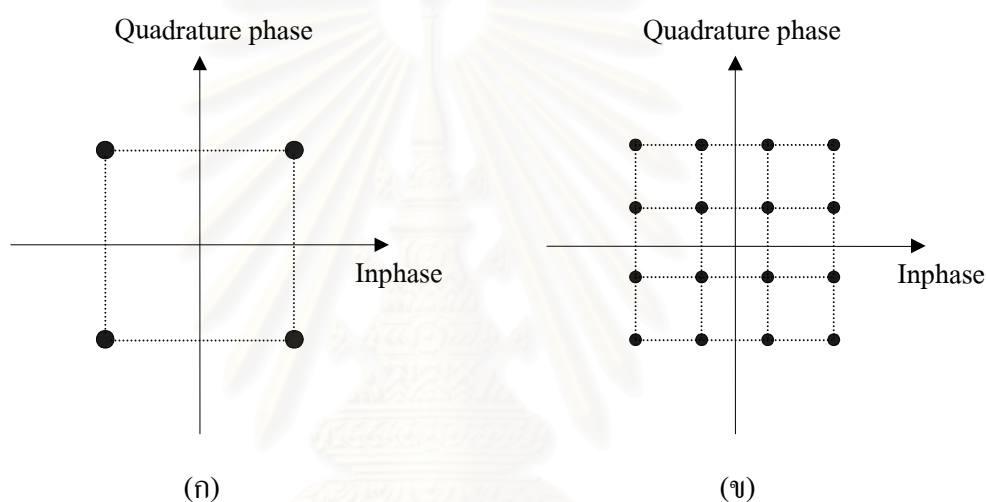
### 1.5 แบบแผนหลายอัตรา (Multirate scheme) สำหรับระบบ DS-CDMA [27-29]

สืบเนื่องจากการสื่อสารแบบเคลื่อนที่ในยุคที่ 3 นั้นต้องการให้บริการผู้ใช้ด้วยอัตราส่งที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงเกิดระบบการสื่อสารแบบแบ่งรหัสแบบหลายอัตราขึ้น โดยได้มีวิธีการหลายวิธีในการส่งข้อมูลที่มีอัตราต่างกันลงบนช่องสัญญาณเดียวกัน วิธีการเหล่านี้จะอยู่บนหลักการของการมัลติเพลกซ์ในรูปแบบต่างๆ อันได้แก่ การมอดูเลต (Modulation Division Multiplexing, MDM) การมัลติเพลกซ์ด้วยรหัส (Code Division Multiplexing, CDM) การมัลติเพลกซ์ด้วยความถี่ (Frequency Division Multiplexing, FDM) และการมัลติเพลกซ์ด้วยเวลา (Time Division Multiplexing, TDM) โดยวิธีการแต่ละวิธีเมื่อถูกนำมาใช้เพื่อรองรับบริการแบบหลายอัตราในระบบ DS-CDMA จะถูกเรียกว่า แบบแผนหลายอัตรา ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงแบบแผนพื้นฐาน 4 แบบแผน ดังนี้

#### 1.5.1 แบบแผนที่ใช้การมอดูเลตหลายค่า (Multi-modulation scheme)

แบบแผนนี้จะใช้การมอดูเลตแบบ M-ary QAM (Quadrature Amplitude Modulation) โดยระดับการมอดูเลต M จะเปลี่ยนไปตามอัตราข้อมูล กล่าวคือ ที่อัตราข้อมูลสูงจะทำการมอดูเลต

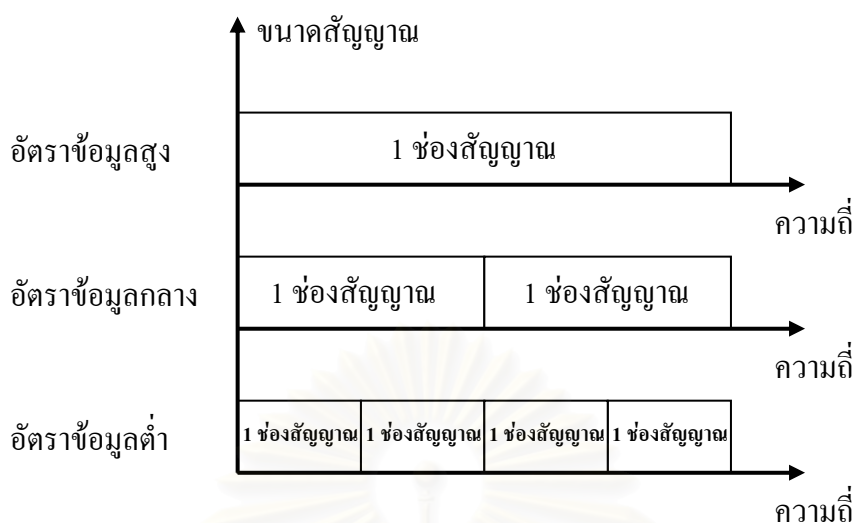
ด้วยจำนวนสัญลักษณ์ (M) ที่มากกว่าที่อัตราข้อมูลต่ำ เช่น ผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลต่ำอาจทำการมอดูเลตด้วย 4-QAM (รูปที่ 1.1 (ก)) ในขณะที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงใช้การมอดูเลตแบบ 16-QAM (รูปที่ 1.1 (ข)) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม จากคุณสมบัติของการมอดูเลตพบว่าที่ค่า SNR เดียวกัน ค่าอัตราความผิดพลาดจะสูงขึ้นเมื่อ M มากขึ้น (จากรูปที่ 1.1 จะเห็นได้ว่า สัญลักษณ์ของ 16-QAM จะมีระยะห่างระหว่างสัญลักษณ์น้อยกว่าสัญลักษณ์ของ 4-QAM) ดังนั้นถ้าต้องการให้ได้ค่าอัตราความผิดพลาดเท่ากัน จำเป็นต้องใช้กำลังส่งที่ต่างกันเมื่ออัตราข้อมูลต่างกัน โดยผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลสูงจะต้องส่งด้วยกำลังที่สูงมาก ซึ่งจะไปรบกวนผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลต่ำกว่าในลักษณะเดียวกับปรากฏการณ์ใกล้-ไกล ส่งผลให้สมรรถนะของระบบที่ใช้แบบแผนนี้มีค่าต่ำ



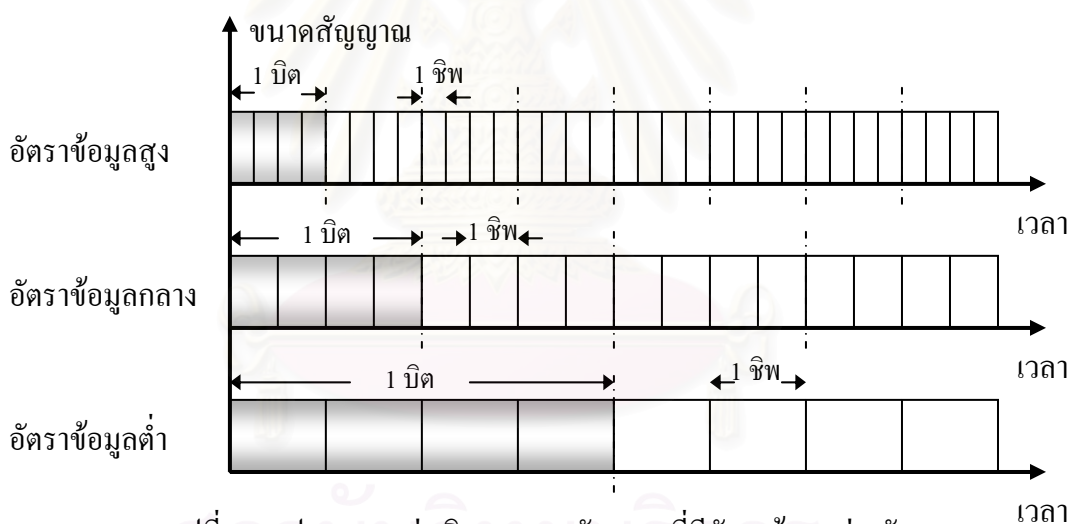
รูปที่ 1.1 ลักษณะการเรียงตัวของสัญลักษณ์ของ (ก) 4-QAM (ข) 16-QAM

### 1.5.2 แบบแผนที่มีการเปลี่ยนอัตราชิพ (Variable chip rate scheme)

แบบแผนนี้จะจัดสรรแถบความถี่ให้ข้อมูลที่มีอัตราต่างกันด้วยความกว้างแถบที่ไม่เท่ากัน โดยสำหรับสัญญาณที่มีอัตราข้อมูลต่ำ เช่น สัญญาณเสียง จะถูกแผ่ลงบนแถบความถี่ขนาดเล็ก และสัญญาณที่มีอัตราข้อมูลสูง เช่น สัญญาณภาพเคลื่อนไหว จะถูกแผ่ลงบนแถบความถี่ขนาดใหญ่ (รูปที่ 1.2) หรือเมื่อพิจารณาในทางเวลาจะกล่าวได้ว่าแบบแผนนี้เป็นการเปลี่ยนอัตราชิพไปตามอัตราข้อมูล (รูปที่ 1.3) โดยอัตราส่วนแผ่จะคงที่ทำให้ได้สมรรถนะที่ดี อย่างไรก็ตาม แบบแผนนี้มีข้อเสียในด้านความซับซ้อนในการวางแผนการจัดการความถี่ อันเนื่องมาจากแถบความถี่ที่ไม่เท่ากันของสัญญาณที่มีอัตราข้อมูลต่างกัน



รูปที่ 1.2 รูปแบบการส่งเชิงความถี่ของสัญญาณที่มีอัตราข้อมูลต่างกัน  
สำหรับแบบแผนที่มีการเปลี่ยนอัตราชีพ



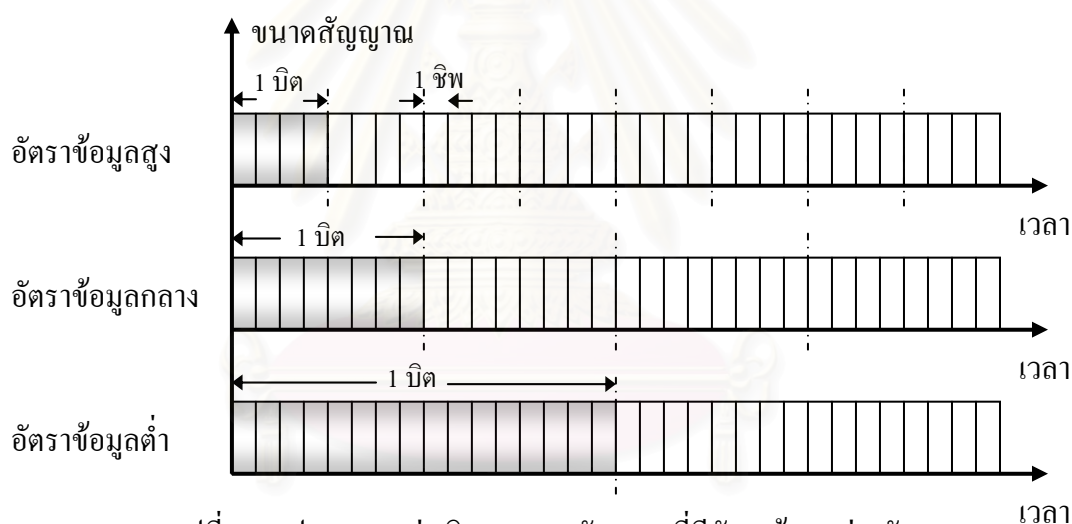
รูปที่ 1.3 รูปแบบการส่งเชิงเวลาของสัญญาณที่มีอัตราข้อมูลต่างกัน  
สำหรับแบบแผนที่มีการเปลี่ยนอัตราชีพ

### 1.5.3 แบบแผนที่ใช้อัตราส่วนแผ่หลายค่า (Multi-spreading factor)

แบบแผนนี้เปรียบเหมือนการแบ่งทางเวลาเพื่อให้ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงสามารถส่งบิตข้อมูลได้มากกว่าผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำในช่วงคาบเวลาเท่ากัน โดยยังคงค่าอัตราชีพที่เท่ากันในผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่างกัน ทั้งนี้คาบบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงจะสั้นกว่าคาบบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ ดังนั้นอัตราส่วนแผ่ในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงจึงมีค่าต่ำกว่าในผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ อัตราส่วนแผ่ที่ต่ำนี้จะส่งผล

ให้ค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างรหัสของผู้ใช้แต่ละรายมีค่าเพิ่มขึ้น ตลอดจนจะลดความต้านทานต่อความไม่อุดมคติของช่องสัญญาณ ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะของระบบ นอกจากนี้จากการที่คาบบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตราที่ต่างกันไม่เท่ากัน ทำให้ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงจะต้องส่งข้อมูลด้วยกำลังที่สูงกว่าในผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำเพื่อคงค่ากำลังต่อบิตให้เท่ากัน ซึ่งจะทำให้เกิดการรบกวนมากขึ้นในผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำในลักษณะเดียวกับปรากฏการณ์ใกล้-ไกล อย่างไรก็ตามแบบแผนนี้มีข้อดีในด้านความง่ายในการใช้งาน รวมไปถึงความความซับซ้อนที่ต่ำเมื่อเทียบกับแบบแผนหลายอัตราอื่นๆ ลักษณะการส่งข้อมูลของแบบแผนที่ใช้อัตราส่วนแฝหลายค่า มีลักษณะดังรูปที่ 1.4

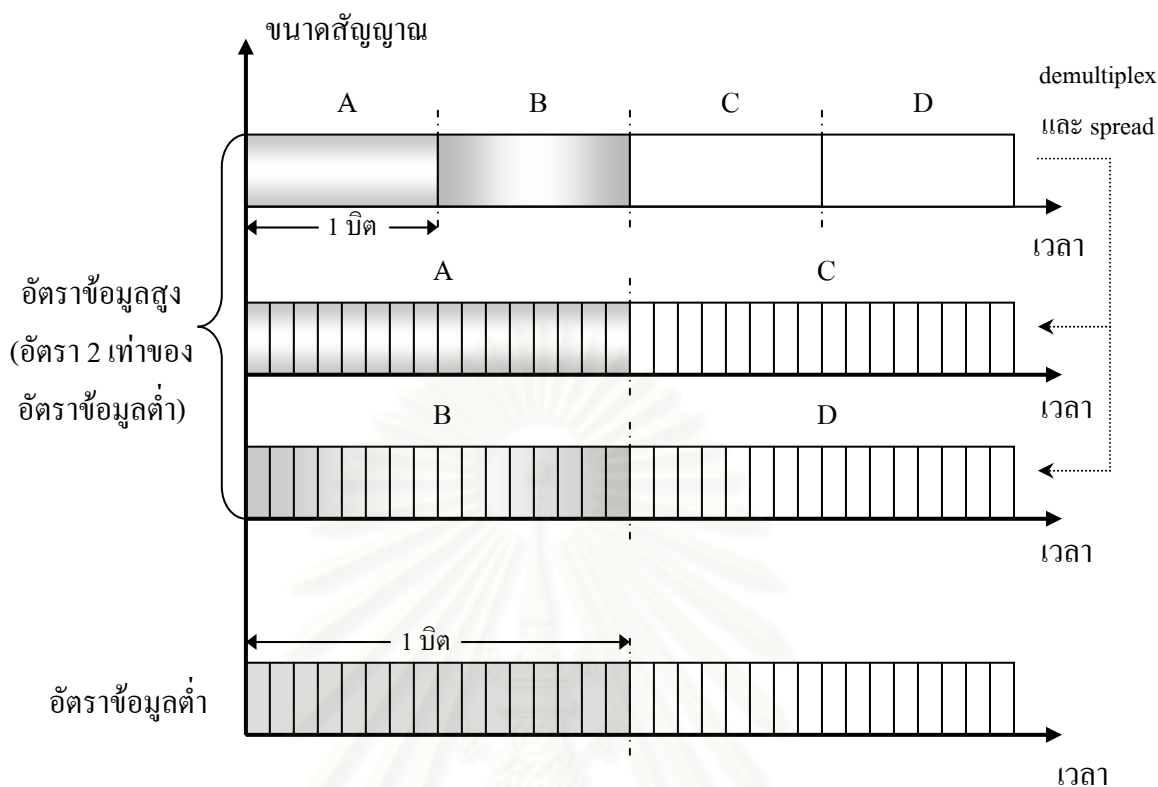
วรวิทย์ กวีวิจน์ ได้เสนอเครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายแบบนำข้อมูลที่ตัดสินแล้วมาป้อนกลับที่ใช้กระบวนการปรับอัตราโน้ดดิซนิคบอด สำหรับระบบซีดีเอ็มเอหลายอัตราที่ใช้แบบแผนที่ใช้อัตราส่วนแฝหลายค่า [30-32]



รูปที่ 1.4 รูปแบบการส่งเชิงเวลาของสัญญาณที่มีอัตราข้อมูลต่างกัน สำหรับแบบแผนที่ใช้อัตราส่วนแฝหลายค่า

#### 1.5.4 แบบแผนหลายรหัส (Multicode scheme) [33-36]

แบบแผนนี้ สัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงจะถูกคีมัลติเพลกซ์ ออกเป็นสัญญาณย่อยที่มีอัตราข้อมูลเท่ากับอัตราข้อมูลต่ำที่สุดในระบบ ก่อนที่จะถูกแผ่ด้วยรหัสตั้งฉาก และเข้ารหัสสำหรับผู้ใช้แต่ละราย จากนั้นสัญญาณย่อยจะถูกรวมเข้าด้วยกันเพื่อผ่านเครื่องขยายสัญญาณ แล้วส่งออกสู่ช่องสัญญาณต่อไป แบบแผนหลายรหัสจะมีวิธีการส่งข้อมูล เป็นดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 รูปแบบการส่งเชิงเวลาของสัญญาณที่มีอัตราข้อมูลต่างกัน 2 เท่า สำหรับแบบแผนหลายรหัส

วิธีการนี้อัตราส่วนของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงและของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำมีค่าเท่ากัน ซึ่งจะขจัดผลอันไม่พึงประสงค์ดังเช่นในกรณีแบบแผนที่ใช้อัตราส่วนแบ่งหลายค่าลงได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากสัญญาณในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงจะถูกตีมันตีเฟลกซ์ออกเป็นสัญญาณย่อยที่ขนานกันหลายสัญญาณย่อยซึ่งสัญญาณย่อยนี้จะทำตัวเสมือนเป็นผู้ใช้รายใหม่ของระบบ และจะส่งผลเหมือนระบบมีผู้ใช้เพิ่มขึ้น เป็นผลให้ความจุของระบบลดลง นอกจากนี้การที่มีหลายสัญญาณย่อยมารวมกันในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงแต่ละราย ทำให้ค่าอัตราส่วนกำลังถ่ายถอดต่อกำลังเฉลี่ยของสัญญาณมีค่าสูง นั่นคือความแปรปรวนรอบจุดทำงานของตัวขยายสัญญาณมีค่ามาก ทำให้เกิดปัญหาที่ตัวขยายสัญญาณ ซึ่งโดยปกติตัวขยายสัญญาณจะมีค่าคุณลักษณะสัญญาณเข้า-สัญญาณออกไม่เป็นเชิงเส้น ทำให้สัญญาณที่ส่งมีการผิดเพี้ยนไปได้ ปัญหาดังกล่าวเรียกว่า ปัญหาความผิดเพี้ยนแบบไม่เชิงเส้น

อย่างไรก็ตาม แบบแผนหลายรหัสนั้นมีข้อดีในหลายๆ ด้าน เช่น สมรรถนะที่ดี และความทนทานต่อสภาวะที่ไม่อุดมคติ ซึ่งเป็นผลมาจากการที่ใช้อัตราส่วนแบ่งสูงในอัตราข้อมูลทุกอัตรา นอกจากนี้การใช้เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายในการส่งข้อมูลด้วยแบบแผนหลายรหัส [37-41]



นั้นง่ายต่อการประยุกต์ใช้งาน ด้วยเหตุผลทางคุณสมบัติที่ดีดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้จึงให้ความสนใจแบบแผนหลายรหัสเป็นหลัก

## 1.6 ข้อดี-ข้อเสียของแบบแผนหลายอัตราแต่ละแบบ

ข้อดี-ข้อเสียของแบบแผนหลายอัตราแต่ละแบบแสดงไว้ในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของแบบแผนหลายอัตราแต่ละแบบ

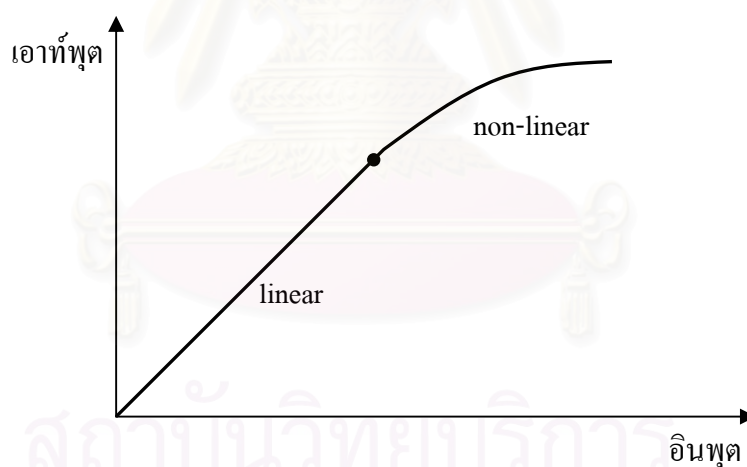
เครื่องรับ	ข้อดี	ข้อเสีย
แบบแผนที่ใช้การมอดูเลตหลายค่า	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ไม่ต้องเปลี่ยนรูปแบบการแผ่ข้อมูล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● สมรรถนะต่ำ</li> <li>● ไม่ทนทานต่อสภาวะไม่อุดมคติของช่องสัญญาณ</li> </ul>
แบบแผนที่มีการเปลี่ยนอัตราชีพ	<ul style="list-style-type: none"> <li>● มีสมรรถนะสูง</li> <li>● อัตราส่วนแผ่เท่ากันทุกอัตราข้อมูล</li> <li>● ทนทานต่อสภาวะไม่อุดมคติของช่องสัญญาณ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● มีความซับซ้อนสูง</li> <li>● ต้องมีการวางแผนจัดการความถี่</li> </ul>
แบบแผนที่ใช้อัตราส่วนแผ่หลายค่า	<ul style="list-style-type: none"> <li>● มีความซับซ้อนต่ำและง่ายต่อการใช้</li> <li>● สมรรถนะดีพอใช้</li> <li>● ทนทานต่อสภาวะไม่อุดมคติของช่องสัญญาณในระดับหนึ่ง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● อัตราส่วนแผ่ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงจะมีค่าต่ำ</li> <li>● ส่งด้วยกำลังสัญญาณไม่เท่ากัน จึงเกิดปรากฏการณ์ใกล้-ไกล</li> </ul>
แบบแผนหลายรหัส	<ul style="list-style-type: none"> <li>● สมรรถนะดีพอใช้</li> <li>● อัตราส่วนแผ่เท่ากันทุกอัตราข้อมูล</li> <li>● ทนทานต่อสภาวะไม่อุดมคติของช่องสัญญาณ</li> <li>● ส่งด้วยกำลังเท่ากันทุกอัตราข้อมูล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● เกิดสัญญาณย่อยเพิ่มขึ้นจนรบกวนสัญญาณของผู้ใช้รายอื่น</li> <li>● เกิดปัญหาความผิดเพี้ยนแบบไม่เชิงเส้น</li> </ul>



## 1.7 ปัญหาของแบบแผนหลายรหัส [42-44]

แบบแผนหลายรหัสนั้นเป็นแบบแผนที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการนำมาเป็นแบบแผนที่ใช้ในการรองรับการส่งข้อมูลแบบหลายอัตรา เนื่องจากคุณสมบัติในด้านสมรรถนะตลอดจนความทนทานต่อความไม่อุดมคติของช่องสัญญาณ อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้กับระบบด้วยความซับซ้อนที่เพิ่มขึ้นไม่มาก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการใช้แบบแผนหลายรหัสจะทำให้เกิดสัญญาณย่อยเป็นจำนวนมากในผู้ใช้ที่มีอัตราสูง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้อื่นในระบบ

นอกจากนี้การใช้แบบแผนหลายรหัสจะทำให้เกิดปัญหาขึ้นที่ตัวขยายสัญญาณซึ่งโดยปกติจะมีคุณลักษณะที่ไม่เชิงเส้นที่ค่ากำลังสัญญาณสูงๆ ดังรูปที่ 1.6 โดยสัญญาณย่อยในผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลสูงจะถูกรวมเข้าด้วยกันก่อนที่จะผ่านตัวขยายสัญญาณเพื่อส่งออกสู่ช่องสัญญาณ ซึ่งการรวมสัญญาณย่อยมากๆ เข้าด้วยกันจะส่งผลให้ค่าอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังค่ายอดต่อกำลังเฉลี่ย หรือ PAV มีค่าสูง ทำให้สัญญาณที่ผ่านตัวขยายสัญญาณอาจมีการผิดเพี้ยนขึ้นได้ ปัญหานี้เรียกว่าปัญหาความผิดเพี้ยนแบบไม่เชิงเส้น นั่นเอง



รูปที่ 1.6 ตัวอย่างคุณลักษณะของตัวขยายกำลังทั่วไป

## 1.8 วิธีการแก้ปัญหาที่มีผู้เสนอขึ้น

ได้มีการเสนอวิธีการแก้ปัญหาค่าความผิดเพี้ยนแบบไม่เชิงเส้นในแบบแผนหลายรหัสนั้นหลายวิธี [42,44] หนึ่งในวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวคือการลดจำนวนสัญญาณย่อยในผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลสูง ซึ่งได้แก่ การใช้การมอดูเลตแบบไบออร์ทอกอนอล หรือเรียกว่า แบบแผนไบออร์ทอกอนอล [45-46] ซึ่งจะส่งเพียงหนึ่งสัญญาณย่อยสำหรับผู้ใช้หนึ่งราย และการใช้การมอดูเลตแบบไบออร์ทอ

คอนอลแบบหลายรหัส หรือเรียกว่า แบบแผนไบนารีทอกอนอลแบบหลายรหัส [45-46] ซึ่งจะมีการรวมสัญญาณย่อยเป็นจำนวนต่ำกว่าอัตราข้อมูลที่มากกว่าอัตราพื้นฐาน อย่างไรก็ตามการนำการมอดูเลตดังกล่าวมาใช้ในแบบแผนหลายรหัสจะมีข้อเสียที่สำคัญคือ สมรรถนะของระบบจะด้านทานต่อสัญญาณรบกวนและสัญญาณแทรกสอดได้น้อยลง

## 1.9 แนวทางของวิทยานิพนธ์นี้

เนื่องจากรูปแบบการบริการส่วนใหญ่จะแบ่งได้เป็น การบริการสัญญาณเสียง (voice) การบริการสัญญาณข้อมูล (data) และการบริการสัญญาณวิดีโอ (video) ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จะให้ความสนใจระบบที่มีอัตราข้อมูล 3 อัตรา ทั้งนี้แบบแผนหลายอัตราที่ใช้จะใช้แบบแผนหลายรหัสเป็นหลัก โดยจะนำเสนอรูปแบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสกับผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลกลางและต่ำ และใช้แบบแผนไบนารีทอกอนอล หรือแบบแผนไบนารีทอกอนอลแบบหลายรหัส กับผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลสูง ซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาข้อจำกัดของตัวขยายสัญญาณในระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสซึ่งมักเกิดขึ้นที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงได้ นอกจากนี้จะใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่ด้านรับเพื่อช่วยเพิ่มความเชื่อถือได้ให้กับข้อมูลโดยรวม โดยเฉพาะข้อมูลอัตราสูง

### 1.10 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อพัฒนาปรับปรุงสมรรถนะของระบบ DS-CDMA แบบหลายอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัส
2. ศึกษาและวิเคราะห์สมรรถนะของระบบ DS-CDMA แบบหลายอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสร่วมด้วยแบบแผนไบนารีทอกอนอล หรือแบบแผนไบนารีทอกอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้การหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่ได้เสนอ

### 1.11 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

นำเสนอรูปแบบที่นำแบบแผนไบนารีทอคอนอลหรือแบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัสมาใช้แทนที่แบบแผนหลายรหัสสำหรับผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลสูงในระบบ DS-CDMA แบบหลายอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสเป็นหลัก และใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่มุ่งเน้นในการเพิ่มสมรรถนะในผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลสูง โดยมีเป้าหมายในการลดปัญหาความผิดพลาดแบบไม่เชิงเส้นในกรณีที่ใช้แบบแผนหลายรหัสในผู้ใช้ทุกอัตรา

ในที่นี้จะพิจารณาทั้งระบบแบบซิงโครนัส และระบบแบบอะซิงโครนัส และพิจารณาให้ช่องสัญญาณเป็นแบบ Additive White Gaussian Noise (AWGN) และพิจารณาผลของเฟดดิ้งแบบเรย์ลี นอกจากนี้จะทำการเปรียบเทียบระบบทั้งในสถานะที่มีการควบคุมกำลังแบบสมบูรณ์และมีการควบคุมกำลังแบบไม่สมบูรณ์ และคิดผลของความผิดพลาดแบบไม่เชิงเส้นโดยการจำลองตัวขยายกำลังด้วยฟังก์ชันตัวขยายที่เหมาะสม ทั้งนี้จะใช้ค่าอัตราความผิดพลาดบิต เป็นหลักในการวัดสมรรถนะ บนสมมติฐานที่ว่าที่ด้านรับทราบขนาดของสัญญาณ รวมทั้งเวลาประวิงที่สัญญาณของผู้ใช้แต่ละรายมาถึงด้านรับ

### 1.12 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้ทางเลือกในการใช้รูปแบบของแบบแผนและเครื่องรับใหม่ๆ ในการเพิ่มสมรรถนะให้กับระบบสื่อสาร DS-CDMA แบบหลายอัตราที่คาดว่าจะมีบทบาทสำคัญในการสื่อสารอนาคต

### 1.13 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ

1. ศึกษาค้นคว้าระบบสื่อสาร DS-CDMA รวมทั้งเครื่องรับและแบบแผนหลายอัตราชนิดต่างๆ ที่มีผู้เสนอขึ้นในระบบสื่อสาร DS-CDMA โดยมีรายละเอียดดังนี้
  - ศึกษาระบบ DS-CDMA ทั่วไป และเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์
  - ศึกษาเครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายชนิดต่างๆ เช่น เครื่องรับชนิดหักล้างสัญญาณแทรกสอดแบบต่างๆ ดีคอร์ดเรเตอร์ เป็นต้น
  - ศึกษาแบบแผนหลายอัตราชนิดต่างๆ ที่ใช้ในระบบ CDMA โดยเฉพาะแบบแผนหลายรหัส

- ศึกษาแบบแผนไบนารีทอคอนอล และแบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส ที่ใช้ใน ระบบ CDMA แบบหลายอัตรา
2. วิเคราะห์และทดสอบระบบที่ใช้เครื่องรับและแบบแผนหลายอัตราที่เคยมีผู้เสนอมาแล้ว อัน ประกอบด้วย
    - วิเคราะห์หาข้อดีข้อเสียของเครื่องรับแต่ละแบบ
    - วิเคราะห์หาข้อดีข้อเสียของแบบแผนหลายอัตราต่างๆ
    - วิเคราะห์หาข้อดีข้อเสียของแบบแผนไบนารีทอคอนอลและแบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัสเมื่อเทียบกับแบบแผนในอดีต
    - เขียนโปรแกรมจำลองระบบที่ใช้แบบแผนและเครื่องรับต่างๆ ดังกล่าวเพื่อเปรียบเทียบผลของเครื่องรับในแต่ละระบบ
  3. คิดค้น พัฒนาระบบใหม่ด้วยแบบแผนและเครื่องรับที่เหมาะสมเพื่อปรับปรุงสมรรถนะระบบ
  4. ทดสอบระบบที่คิดค้นขึ้น และประเมินผลระบบ
  5. สรุป วิเคราะห์และจัดทำรายงานฉบับสมบูรณ์

#### 1.14 ภาพรวมของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ แบ่งออกเป็น 5 บท โดยที่

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงรหัสแรมป์ ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลเสียต่อสมรรถนะของระบบ ระบบ DS-CDMA สามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองระบบภาคส่งและภาครับ จากนั้นจะกล่าวถึงแบบแผนไบนารีทอคอนอลและแบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส ตลอดจนเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอด และวิธีวัดสมรรถนะที่ใช้

บทที่ 3 ระบบและเครื่องรับที่นำเสนอ เนื้อหาในบทนี้ประกอบไปด้วยระบบ DS-CDMA สามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสร่วมกับแบบแผนไบนารีทอคอนอล และระบบ DS-CDMA สามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสร่วมกับแบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส จากนั้นจะกล่าวถึงเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานเป็นกลุ่มที่มีการป้อนกลับเพื่อมุ่งหักล้างสัญญาณแทรกสอดในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ซึ่งใช้กับสองระบบที่ได้กล่าวถึงในบทนี้

บทที่ 4 ผลการวิจัย ในบทนี้จะเป็นส่วนของผลการวิจัย และการวิจารณ์สมรรถนะของระบบและเครื่องรับที่เสนอในบทที่ 3 โดยเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสและเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน ในสถานะแวดล้อมต่างๆ

บทที่ 5 บทสรุป เนื้อหาในบทนี้จะเริ่มจากการสรุปผลการวิจัย จากนั้นจะกล่าวถึงข้อดี-ข้อเสียของการนำแบบแผนไบออร์ทอกอนอลหรือแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสมาใช้ร่วมกับแบบแผนหลายรหัส และสุดท้ายเป็นข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

### 1.15 นิยามสัญลักษณ์

สัญลักษณ์ตัวพิมพ์เล็ก หมายถึง ตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงทุกคาบบิต หรือตัวกำกับที่ไม่ใช่ตัวกำกับอัตราข้อมูล

สัญลักษณ์ตัวพิมพ์เล็ก (t) หมายถึง ตัวแปรที่เปลี่ยนแปลงทุกคาบชีพ

สัญลักษณ์ตัวพิมพ์ใหญ่ หมายถึง ตัวแปรที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามคาบเวลาและคาบชีพ หรือตัวกำกับอัตราข้อมูล

นิยามสัญลักษณ์ที่กล่าวมาข้างต้นนี้ จะถูกใช้ไปตลอดทุกบทของวิทยานิพนธ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงรหัสแผ่ ปัจจัยที่ส่งผลเสียต่อสมรรถนะของระบบ แบบแผนหลายอัตราที่วิทยานิพนธ์นี้ให้ความสนใจ ซึ่งได้แก่ แบบแผนหลายรหัส แบบแผนไบนารีทอคอนอลและแบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส แบบจำลองระบบสามอัตราของแบบแผนหลายรหัส เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอด รวมทั้งวิธีการวัดสมรรถนะของระบบ

#### 2.1 รหัสแผ่ (Spreading code)

ในระบบ DS-CDMA สัญญาณของผู้ใช้แต่ละรายจะส่งด้วยแถบความถี่และที่ช่วงเวลาเดียวกัน แต่จะถูกแบ่งแยกออกจากกันด้วยรหัสแผ่ และเพื่อผลในการแบ่งแยกที่ดี ชุดรหัสแผ่จะต้องมีค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างรหัสเข้าใกล้ศูนย์ นอกจากนี้จำนวนรหัสแผ่ในชุดของรหัสแผ่และค่าสหสัมพันธ์ข้ามเมื่อมีการประวิงเวลาก็เป็นคุณสมบัติสำคัญของชุดรหัสแผ่ที่จะต้องนำมาพิจารณาในการเลือกใช้ โดยรหัสที่ดีจะมีค่าสหสัมพันธ์และสหสัมพันธ์ข้ามต่ำเมื่อเกิดเวลาประวิง ทั้งนี้รหัสแผ่อาจจำแนกตามลักษณะการแผ่ได้เป็น รหัสสั้นและรหัสยาว

รหัสสั้น หมายถึง การใช้ 1 รหัส ในการแผ่ข้อมูล 1 บิต สำหรับผู้ใช้ใดๆ ด้วยเหตุนี้จึงเรียกว่าเป็น รหัสที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเวลา (time-invariant spreading code) ส่วนรหัสยาว หมายถึง การใช้ 1 รหัส แผ่ข้อมูลหลาย ๆ บิต โดยแต่ละบิตข้อมูลจะถูกแผ่ด้วยส่วนย่อย ๆ ที่แตกต่างกันของรหัสนั้น จึงเรียกว่าเป็น รหัสที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเวลา (time-varying spreading code)

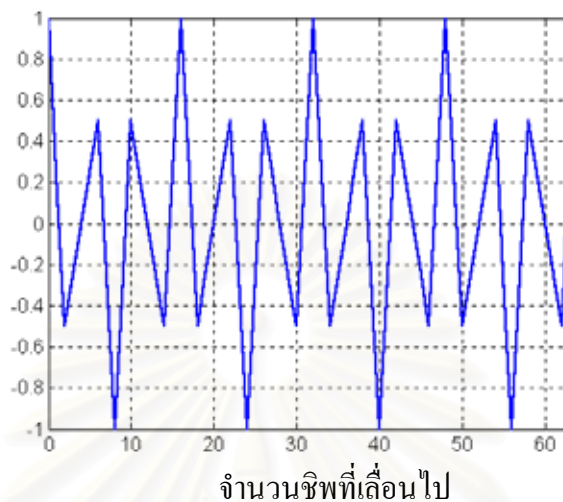
รหัสยาวนั้นจะมีข้อดีในแง่ของการกระจายรหัสที่ดีให้กับผู้ใช้ทุกๆ ราย ทั้งนี้เนื่องจากเป็นรหัสที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ดังนั้นจึงไม่มีผู้ใช้ที่ได้รับรหัสที่เลวตลอดเวลา ในขณะที่รหัสสั้นจะให้ผลของความผิดพลาดที่อาจเป็นไปได้ทั้งดีมากหรือเลวมาก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณารหัสที่นำไปใช้ในระบบที่ใช้เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายราย พบว่ารหัสสั้นจะมีความเหมาะสมมากกว่ารหัสยาวเนื่องจากความซับซ้อนจะต่ำกว่ามาก ในขณะที่สมรรถนะใกล้เคียงกัน [47]

เมื่อจำแนกด้วยคุณสมบัติทางด้านค่าสหสัมพันธ์ข้าม รหัสแผ่สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ



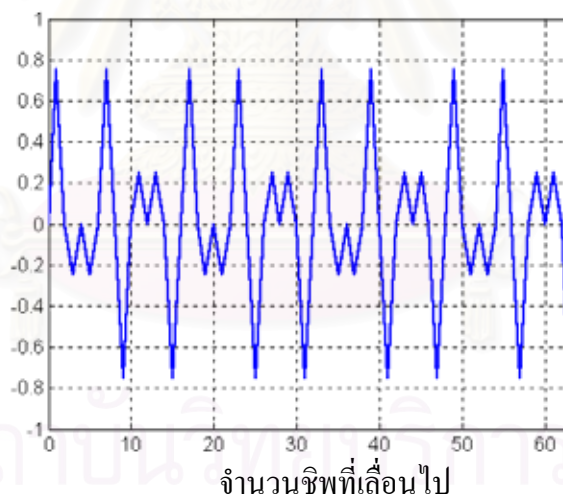
### 2.1.1 รหัสตั้งฉาก (Orthogonal code, OG)

อิตสหสัมพันธ์



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างอิตสหสัมพันธ์ของรหัสตั้งฉาก

สหสัมพันธ์ข้าม



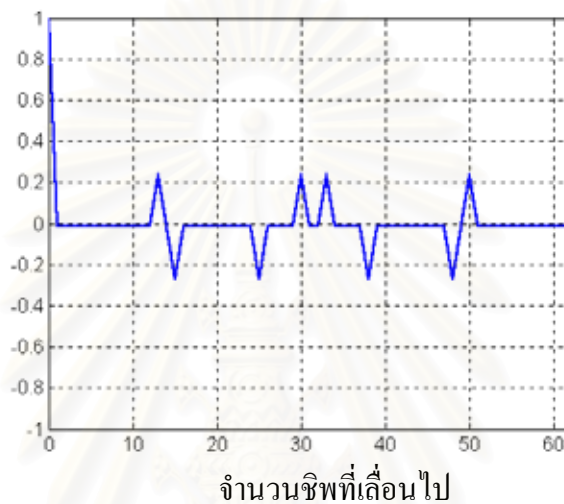
รูปที่ 2.2 ตัวอย่างสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสตั้งฉาก

เป็นรหัสฐานสองที่มีค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างรหัสเป็นศูนย์ นั่นคือจะให้ผลการแบ่งแยกสัญญาณที่ดีมาก อย่างไรก็ตามเมื่อเกิดเวลาประวิงขึ้นระหว่างรหัสจะทำให้ค่าอิตสหสัมพันธ์และค่าสหสัมพันธ์ข้ามสูงมาก ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 ด้วยเหตุนี้รหัสตั้งฉากจึงไม่เหมาะสำหรับแยกแยะผู้ใช้ในการส่งสัญญาณขาขึ้นจากสถานีเคลื่อนที่ไปยังสถานีฐานที่มีเวลาประวิงเกิดขึ้นระหว่างสัญญาณของผู้ใช้รายต่างๆ นอกจากนี้ข้อเสียอีกประการหนึ่งของชุดรหัสตั้งฉากคือจำนวนรหัสทั้ง

หมดในชุดรหัสจะมีค่าน้อย นั่นก็จะสามารถรองรับผู้ใช้ได้น้อยตามไปด้วย ตัวอย่างของรหัสประเภทนี้ ได้แก่ Hadamard-Walsh Code [48] เป็นต้น

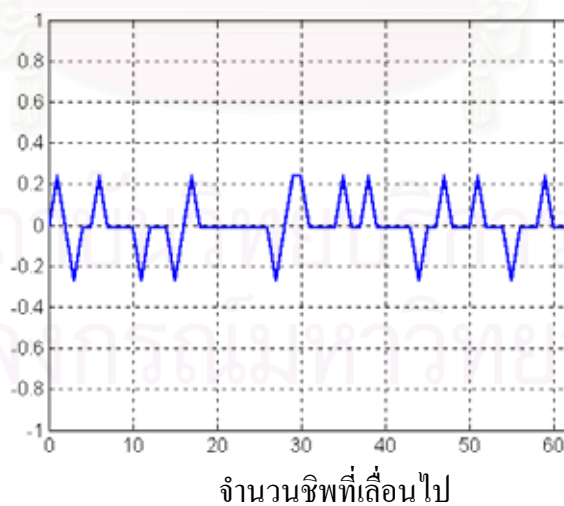
### 2.1.2 ลำดับสัญญาณรบกวนสุ่มเทียม (Pseudorandom Noise sequence, PN)

อัตรสหัสัมพันธ์



รูปที่ 2.3 ตัวอย่างอัตรสหัสัมพันธ์ของลำดับสัญญาณรบกวนสุ่มเทียม

สหัสัมพันธ์ข้าม



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างสหัสัมพันธ์ข้ามของลำดับสัญญาณรบกวนสุ่มเทียม

เป็นรหัสฐานสองที่มีลักษณะคล้ายสัญญาณรบกวนแบบสุ่มและเป็นรหัสที่ไม่ตั้งฉากกันอย่างสมบูรณ์ ทำให้มีค่าสหสัมพันธ์ข้ามที่ไม่เท่ากับศูนย์ดังเช่นรหัสตั้งฉาก อย่างไรก็ตามรหัสชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่ดีทั้งกรณีที่มีการประวิงเวลาและไม่มีการประวิงเวลาระหว่างรหัส โดยสหสัมพันธ์ข้ามจะมีค่าต่ำในทุกๆ ช่วงของการประวิงเวลา และจะมีค่าสหสัมพันธ์ตัวเองสูงเฉพาะกรณีที่ไม่มีการประวิงเวลาเท่านั้น (รูปที่ 2.3 และ 2.4) ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติที่ดีในระบบที่อะซิงโครนัส และมีเฟดดิ้งหลายวิถี ตัวอย่างของรหัสประเภทนี้ ได้แก่ Maximal length-sequence (M-sequence) [48] Gold code [48] และ Kasami sequence [48] เป็นต้น

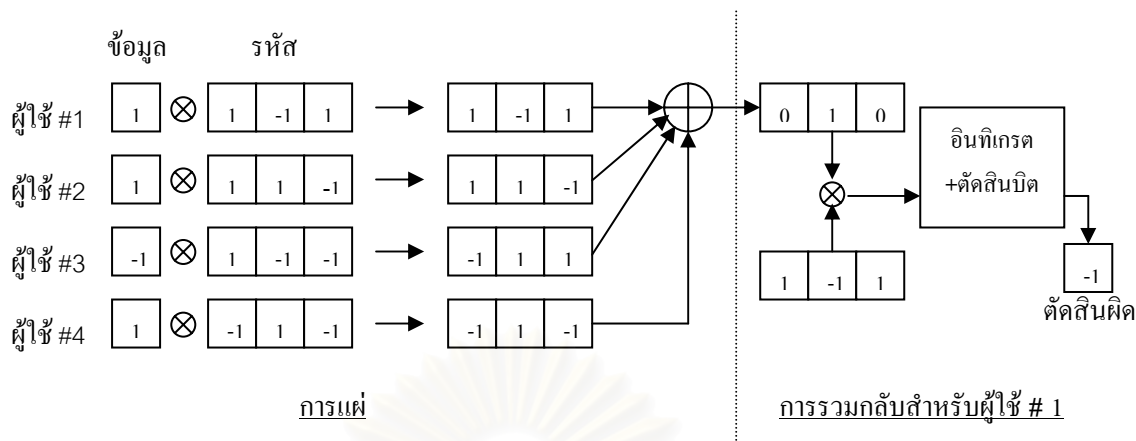
ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้รหัสแบบสุ่มซึ่งสร้างจากกระบวนการแบบสุ่ม โดยรหัสแบบสุ่มนี้มีคุณสมบัติในด้านการประวิงเวลาเช่นเดียวกับรหัสสัญญาณรบกวนสุ่มเทียม แต่คุณสมบัติด้านสหสัมพันธ์ข้ามจะไม่ดีนัก อย่างไรก็ตามรหัสแบบสุ่มมีข้อดีคือมีจำนวนรหัสในชุดที่มาก ซึ่งจะเหมาะกับระบบที่มีผู้ใช้มากขึ้นในอนาคต นอกจากนี้รหัสแบบสุ่มที่ใช้จะเป็นรหัสสั้นเท่านั้น เนื่องจากมีความเหมาะสมในการนำมาใช้กับระบบที่ใช้เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายได้

## 2.2 ปัจจัยที่ส่งผลเสียต่อสมรรถนะของระบบ

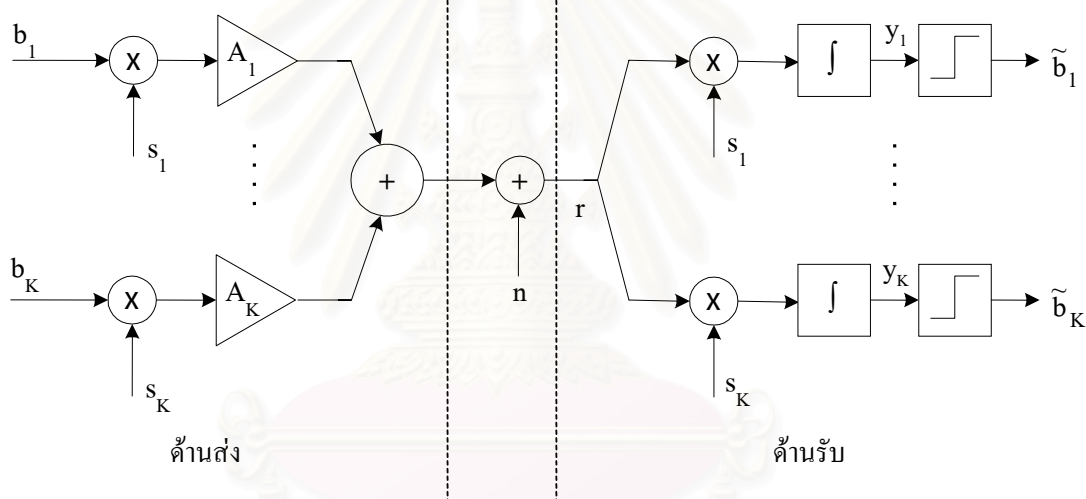
ปัจจัยที่ส่งผลเสียต่อสมรรถนะของระบบ DS-CDMA นอกเหนือไปจากสัญญาณรบกวนทั่วไปในช่องสัญญาณแล้ว สัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้รายอื่นซึ่งเกิดจากการที่รหัสแผ่ไม่สามารถแบ่งแยกผู้ใช้ได้อย่างสมบูรณ์เป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญที่จะทำให้เกิดความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลได้ง่าย โดยผลของสัญญาณแทรกสอดดังกล่าวจะยิ่งเพิ่มมากขึ้นเมื่อเกิดปรากฏการณ์ใกล้-ไกล นอกจากนี้ความไม่อุดมคติของช่องสัญญาณ เช่น การเกิดเฟดดิ้ง ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สามารถส่งผลกระทบรุนแรงต่อระบบได้

### 2.2.1 สัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้รายอื่น (Multiple Access Interference)

สัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้รายอื่นเป็นปัจจัยที่จำกัดความจุของระบบ DS-CDMA โดยเกิดจากการที่รหัสแผ่ไม่ตั้งฉากกันอย่างสมบูรณ์ ทำให้เมื่อผ่านการรวมกลับจะยังมีสัญญาณของผู้ใช้รายอื่นหลงเหลืออยู่ สัญญาณแทรกสอดเหล่านี้จะเพิ่มขึ้นตามจำนวนของผู้ใช้จนอาจส่งผลให้การตัดสินใจผิดพลาดเกิดขึ้นได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างการตัดสินบิตผิดพลาดจากผลของสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้รายอื่น



รูปที่ 2.6 แบบจำลองการรับส่งข้อมูลของระบบ DS-SS พื้นฐาน

ผลของสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้รายอื่นอาจแสดงได้ด้วยสมการ และจากแบบจำลองการรับส่งข้อมูลของระบบ DS-SS พื้นฐานที่แสดงในรูปที่ 2.6 สัญญาณที่รับได้ทางด้านรับ คือ

$$r(t) = \sum_{k=1}^K A_k b_k s_k(t) + n(t) \tag{2-1}$$

โดยสมมุติให้มีผู้ใช้ทั้งหมด K ราย และผู้ใช้รายที่ k ส่งข้อมูล  $b_k$  ด้วยขนาด  $A_k$  และมีรหัสแผ่เป็น  $s_k(t)$  ทั้งนี้  $n(t)$  เป็นสัญญาณรบกวนระหว่างที่สัญญาณเดินทางผ่านช่องสัญญาณ เมื่อทำการ

รวมกลับสัญญาณที่ได้รับได้ด้วยรหัสแผ่ของผู้ใช้ที่สนใจด้วยคาบิต  $T$  จะได้ข้อมูลของผู้ใช้รายที่  $k$  ก่อนที่จะนำมาตัดสินบิตเป็น

$$\left. \begin{aligned} y_k &= \int_{s_k}(t)r(t)dt = \int_{s_k}(t)\left(\sum_{k=1}^K A_k b_k s_k(t)\right)dt + \int_{s_k}(t)n(t)dt \\ &= A_k b_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^K A_j \delta_j + \tilde{n}_k \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

โดย  $\delta_j = \int_{s_k}(t)s_j(t)dt$  เป็นค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างรหัสแผ่ของผู้ใช้รายที่  $k$  และ  $j$

$\tilde{n}_k$  เป็นสัญญาณรบกวนที่ผ่านกระบวนการการแผ่กลับแล้ว

ถึงแม้ว่าค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ผู้ถูกออกแบบให้มีค่าต่ำ แต่เมื่อจำนวนผู้ใช้เพิ่ม

มากขึ้น จำนวนของพจน์  $\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^K A_j \delta_j$  ของสมการที่ (2-2) จะมีค่ามากขึ้น และจะส่งผลกระทบต่อ

การตัดสินบิตได้ ทั้งนี้สมการตัดสินบิต คือ

$$\hat{b}_k = \text{sgn}(y_k) \quad (2-3)$$

โดย  $\text{sgn}(\cdot)$  เป็นฟังก์ชันซิกนัม (signum function)

### 2.2.2 ปรากฏการณ์ใกล้-ไกล (Near-far effect)

ปรากฏการณ์ใกล้-ไกลเกิดขึ้นจากการที่ผู้ใช้เครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่แต่ละรายอยู่ห่างจากสถานีฐานด้วยระยะทางไม่เท่ากัน และด้วยการลดทอนกำลังสัญญาณของช่องสัญญาณที่มากขึ้นตามระยะทาง ทำให้กำลังของสัญญาณที่เดินทางถึงสถานีฐานของผู้ใช้แต่ละรายมีค่าไม่เท่ากัน โดยสัญญาณที่มาถึงสถานีฐานของผู้ใช้รายที่อยู่ห่างจากสถานีฐานจะมีกำลังน้อยกว่ากำลังสัญญาณของผู้ใช้ที่อยู่ใกล้สถานีฐานมากกว่า ทั้งนี้ปรากฏการณ์ใกล้-ไกลจะส่งผลเสียต่อผู้ใช้ที่อยู่ไกลสถานีฐานเนื่องจากกำลังของสัญญาณจะน้อยกว่า ทำให้ถูกรบกวนจากสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ใช้อื่นได้ง่าย ซึ่งปัญหานี้อาจแสดงได้จากสมการที่ (2-2) โดยสำหรับผู้ใช้ที่สนใจที่อยู่ห่างไกลจาก

สถานีฐาน กำลังในพจน์  $A_k b_k$  ของสมการจะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับกำลังของพจน์  $\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^K A_j \delta_j$  ซึ่ง

เป็นพจน์ที่เป็นสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้รายอื่นที่ไม่ต้องการ ดังนั้น โอกาสในการตัดสินบิตผิดพลาดจึงมีมากกว่าผู้ใช้รายที่อยู่ใกล้สถานีฐาน อย่างไรก็ตามปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ด้วยการใช้การควบคุมกำลังที่เข้มงวด

### 2.2.3 ข้อจำกัดของตัวขยายสัญญาณ [42-44]

โดยปกติ การรับส่งข้อมูลในระบบ CDMA จะมีการควบคุมกำลังของผู้ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่แต่ละรายไว้เพื่อไม่ให้สัญญาณของผู้ใช้บางรายสูงเกินไปจนส่งผลกระทบต่อผู้ใช้รายอื่น อีกทั้งในส่วนประมวลผลของโทรศัพท์เคลื่อนที่จะถูกออกแบบให้ใช้กำลังต่ำ ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงทำให้สัญญาณต้องผ่านตัวขยายสัญญาณเพื่อปรับกำลังสัญญาณให้เหมาะสมก่อนที่จะส่งออกสู่ช่องสัญญาณ

ตัวขยายสัญญาณทั่วไปจะมีลักษณะเชิงเส้นในช่วงกำลังต่ำ แต่จะเริ่มอ้อมตัวในช่วงกำลังสูงๆ ทำให้การขยายสัญญาณในช่วงกำลังสูงๆ จะได้การขยายที่มีการบิดเพี้ยนของสัญญาณ ซึ่งเรียกว่าความบิดเพี้ยนแบบไม่เชิงเส้น ถึงแม้ในระยะหลังจะมีการพัฒนาตัวขยายจนมีลักษณะที่เชิงเส้นเกือบทั้งช่วงใช้งานแล้วก็ตาม แต่ตัวขยายที่ดีมากก็จะมีราคาสูงมากตามไปด้วย

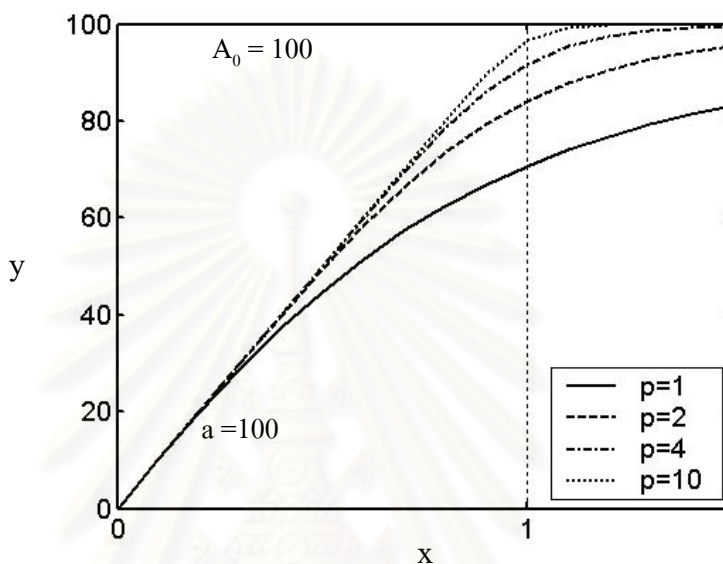
ลักษณะสมบัติทั่วไปของตัวขยาย อาจประมาณได้ด้วยสมการต่อไปนี้ [43,44]

$$y = \frac{a x}{\left[ 1 + \left( \frac{a x}{A_0} \right)^{2p} \right]^{1/(2p)}} \quad (2-4)$$

โดย  $x$  และ  $y$  คือค่ากำลังขาเข้า (input power) และกำลังขาออก (output power) ตามลำดับ  $a$  คือค่ากำลังขยายของตัวขยายสัญญาณ  $A_0$  คือค่ากำลังขาออกสูงสุดของตัวขยาย และ  $p$  เป็นค่าที่ใช้ควบคุมความเป็นเชิงเส้นของคุณลักษณะของตัวขยาย โดยค่า  $p$  จะเป็นจำนวนเต็มบวกเสมอ รูปที่ 2.7 จะแสดงตัวอย่างคุณลักษณะของตัวขยายเมื่อเปลี่ยนค่า  $p$  และให้ค่า  $A_0$  และ  $a$  เท่ากับ 100 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า  $p$  เพิ่มขึ้น ความไม่เป็นเชิงเส้นของคุณลักษณะจะลดลง



ปัญหาที่ตัวขยายสัญญาณนั้นจะมีมากในระบบหลายอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัส ทั้งนี้เนื่องจากสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงจะถูกตีผิดพลาดเป็นหลายสัญญาณย่อยที่ขนานกัน สัญญาณย่อยเหล่านี้จะถูกรวมเข้าด้วยกันก่อนที่จะเข้าตัวขยายสัญญาณ ซึ่งจะทำให้กำลังสัญญาณที่ตัวขยายมีค่าสูงจนเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณออกได้



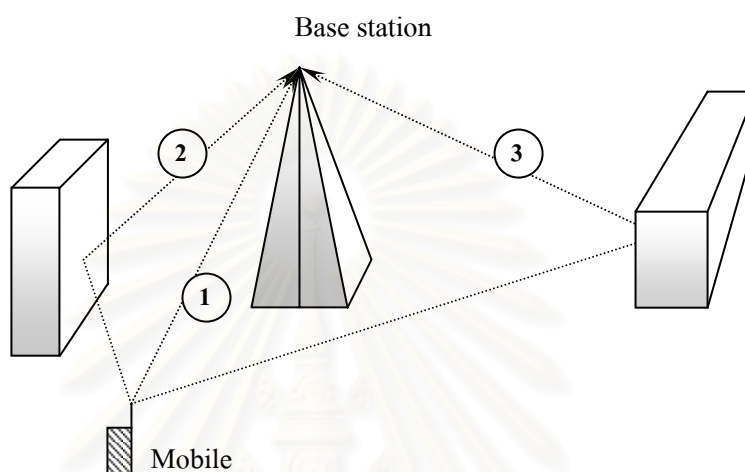
รูปที่ 2.7 ลักษณะสมบัติของตัวขยายสัญญาณเมื่อใช้ค่า  $p = 1, 2, 4$  และ  $10$

## 2.2.4 เฟดดิ้ง [49-51]

เฟดดิ้งเกิดจากความไม่เป็นอุดมคติของช่องสัญญาณ โดยส่งผลให้ขนาดและรูปคลื่นของสัญญาณผิดเพี้ยนไป ทั้งนี้สาเหตุของเฟดดิ้งอาจเกิดจากการที่มีสัญญาณมากกว่าหนึ่งวิถีเดินทางถึงตัวรับ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ในช่องสัญญาณทั่วไปที่มักมีสิ่งกีดขวางที่สามารถสะท้อนคลื่นให้เกิดเส้นทางสู่ตัวรับได้ เฟดดิ้งที่เกิดจากสาเหตุดังกล่าวจะเรียกว่า เฟดดิ้งหลายวิถี ตัวอย่างของเฟดดิ้งหลายวิถีที่มีสัญญาณเดินทางถึงเครื่องรับ 3 เส้นทาง แสดงดังรูปที่ 2.8 ในระบบ DS-CDMA เฟดดิ้งหลายวิถีอาจแก้ไขได้ด้วยการใช้เครื่องรับแบบ RAKE ที่ตัวรับ นอกจากสาเหตุของสิ่งกีดขวางที่ทำให้เกิดสัญญาณหลายวิถีแล้ว เฟดดิ้งอาจเกิดจากความเปลี่ยนแปลงของช่องสัญญาณ รวมไปถึงการเคลื่อนที่ของโทรศัพท์เคลื่อนที่ด้วยเช่นกัน

เฟดดิ้งที่เกิดขึ้นส่วนมากจะอนุมานให้มีการแจกแจงทางสถิติเป็นแบบเรย์ลี (rayleigh) หรือแบบไรซ์ (rice) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่องสัญญาณที่สนใจว่าสามารถยอมให้เกิดสัญญาณวิถีตรง (direct path) ได้หรือไม่ โดยถ้าเกิดสัญญาณวิถีตรง (เส้นทางหมายเลข 1 ในรูปที่ 2.8) การแจกแจง

จะเป็นแบบไรซ์ ในขณะที่เดียวกันถ้าไม่เกิดวิธีตรง การแจกแจงของเฟดดิ้งจะเป็นแบบเรย์ลี ทั้งนี้ วิทยานิพนธ์นี้จะสมมุติให้ช่องสัญญาณในระบบประกอบด้วยสิ่งกีดขวางมากมายในลักษณะเมือง ซึ่งโอกาสเกิดสัญญาณวิธีตรงจะมีน้อยมาก ด้วยเหตุนี้จึงอนุมานให้การแจกแจงของเฟดดิ้งเป็นแบบเรย์ลี



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างช่องสัญญาณที่เกิดเฟดดิ้งหลายวิธี

### 2.2.5 ความเป็นอะซิงโครนัส

โดยทั่วไป การส่งข้อมูลแบบดิจิทัลจะมีส่วนที่ทำหน้าที่ในการทำให้เกิดการรับรู้ระหว่างผู้ส่งและผู้รับเกี่ยวกับจุดเริ่มต้นของบิตข้อมูล (synchronization) อาทิเช่น ส่วน header ในการส่งสัญญาณผ่านสาย เป็นต้น สำหรับในระบบ CDMA หน้าทีดังกล่าวจะกระทำโดยส่วนที่เรียกว่า pilot channel ซึ่งในมาตรฐานของการสื่อสารเคลื่อนที่ยุคที่ 3 จะให้มีการส่ง pilot channel ทั้งการส่งข้อมูลขาขึ้นและขาลง (มาตรฐานของการสื่อสารเคลื่อนที่ยุคที่ 2 จะให้มีการส่ง pilot channel เฉพาะการส่งข้อมูลขาลง) ดังนั้นโดยปกติการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณในระบบ CDMA จะมีความเป็นซิงโครนัสอยู่ในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตามเนื่องจากการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณเคลื่อนที่ที่มีการเคลื่อนที่ของสถานีเคลื่อนที่ ซึ่งอาจเป็นผลให้เกิดความเป็นอะซิงโครนัสในช่วงสั้นๆ ได้ ความเป็นอะซิงโครนัสนี้จะส่งผลกระทบต่อระบบโดยเฉพาะระบบที่ใช้รหัสแรมป์ที่มีคุณสมบัติในสภาวะที่มีการประวิงเวลาไม่ดี

## 2.3 ระบบ DS-CDMA สามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัส

### 2.3.1 แบบจำลองระบบ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองระบบ DS-CDMA สามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสในการส่ง โดยจะพิจารณาการส่งสัญญาณขาขึ้นที่ผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN และละเอียดการลดทอนของขนาดสัญญาณขณะเดินทางผ่านช่องสัญญาณ (attenuation) บนสมมุติฐานที่ว่าที่ด้านรับ (สถานีฐาน) รหัสแผ่ของผู้ใช้ทุกราย

#### • ภาคส่ง

ที่ภาคส่งจะทำการคิมีลติเพลกซ์ข้อมูลของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงและกลางให้เป็นข้อมูลที่มีคาบปิดเท่ากับอัตราข้อมูลต่ำที่สุดขนานกันหลายสาย ในที่นี้จะให้ระบบรองรับอัตราสามอัตรา คือ  $R$  (อัตราต่ำ หรือ อัตราพื้นฐาน)  $M_M R$  (อัตรากลาง) และ  $M_H R$  (อัตราสูง) (สมมุติให้  $M_M$  และ  $M_H$  เป็นจำนวนเต็ม ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.9 ซึ่งแสดงแบบจำลองระบบที่มีค่า  $M_M = 2$  และ  $M_H = 4$ ) โดยมีผู้ใช้ทั้งหมด  $K$  ราย แบ่งเป็นผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ  $K_L$  ราย ผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง  $K_M$  ราย และผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง  $K_H$  ราย และส่งด้วยคาบปิดของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ  $T$  ทั้งนี้สัญญาณที่ปรากฏที่ภาครับจะสามารถแสดงด้วยสมการที่ (2-5)

$$r(t) = \sum_{k=1}^{K_L} A_{k,L} b_{k,L} s_{k,L}(t) + \sum_{k=1}^{K_M} \sum_{m=1}^{M_M} A_{k,M} b_{k,m} s_{k,m}(t) + \sum_{k=1}^{K_H} \sum_{m=1}^{M_H} A_{k,H} b_{k,m} s_{k,m}(t) + n(t) \quad (2-5)$$

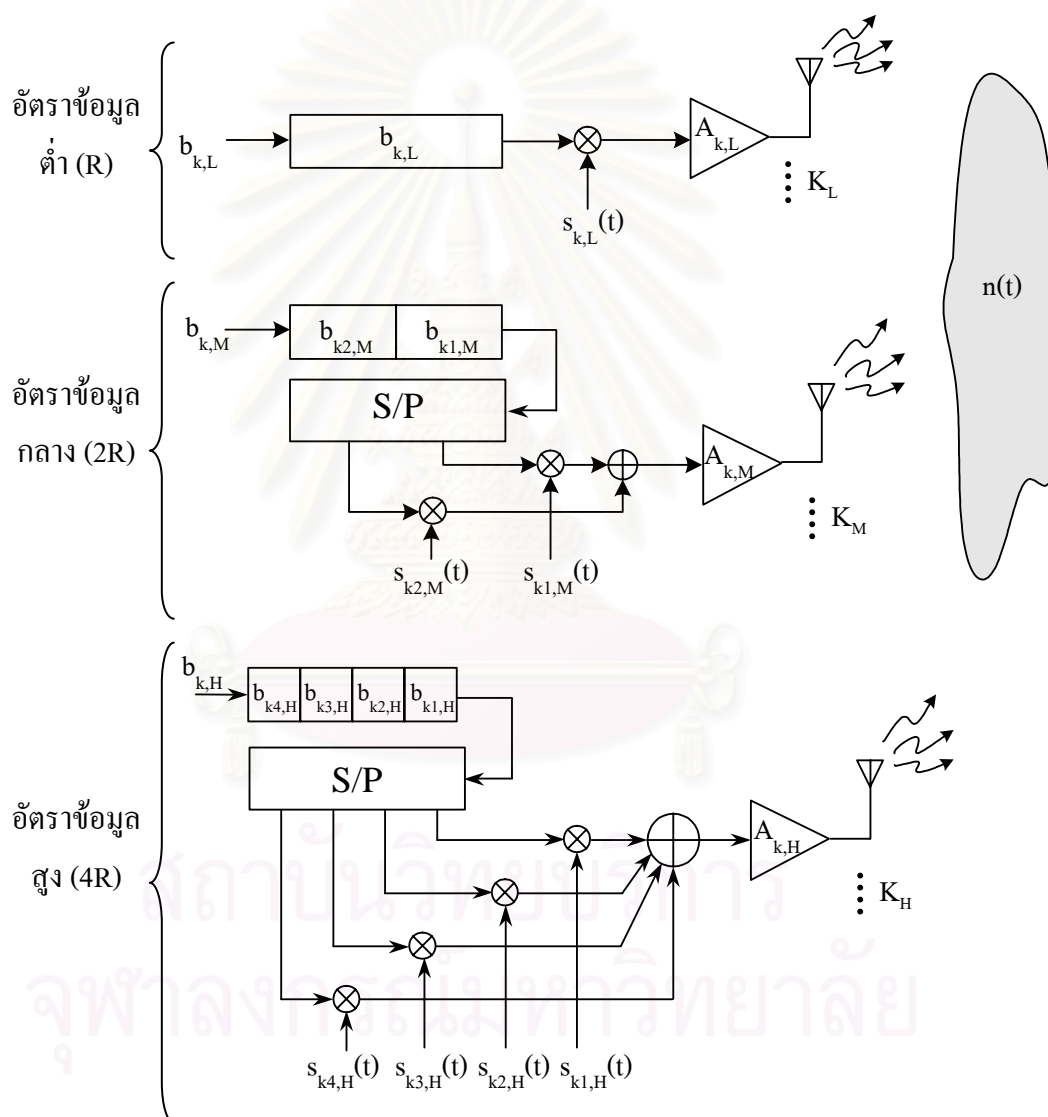
โดย  $b_{k,L}$   $A_{k,L}$  และ  $s_{k,L}(t)$  คือบิตข้อมูล ขนาดของสัญญาณที่รับได้ และรหัสแผ่ ของผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลต่ำรายที่  $k$  ตามลำดับ  $b_{k,m}$   $A_{k,M}$  และ  $s_{k,m}(t)$  คือบิตข้อมูลที่  $m$  ในชุดข้อมูล  $M_M$  บิต ขนาดสัญญาณที่รับได้ และรหัสแผ่สำหรับบิตดังกล่าวของผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลกลางรายที่  $k$  ตามลำดับ และ  $b_{k,m}$   $A_{k,H}$  และ  $s_{k,m}(t)$  คือบิตข้อมูลที่  $m$  ในชุดข้อมูล  $M_H$  บิต ขนาดสัญญาณที่รับได้ และรหัสแผ่สำหรับบิตดังกล่าวของผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลสูงรายที่  $k$  ตามลำดับ และ  $n(t)$  เป็นสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และค่าความแปรปรวนเป็น  $\sigma^2$

อนึ่ง ค่ารหัสแผ่ของผู้ใช้ทุกรายจะได้อมาจากการคูณกันบิตต่อบิตของรหัสตั้งฉากและรหัสสัญญาณรบกวนสุ่มเทียม โดยรหัสตั้งฉากจะแบ่งแยกบิตต่างๆ ในชุดบิตเดียวกัน และรหัสสัญญาณรบกวนสุ่มเทียมจะแบ่งแยกผู้ใช้ ทั้งนี้รหัสแผ่จะมีคาบเป็น  $T$  และจะถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานในช่วง  $T$  กล่าวคือ

$$\int_0^T [s_{k,L}]^2 dt = 1 \quad ; \quad k \in \{1, \dots, K_L\} \quad (2-6)$$

$$\int_0^T [s_{km,M}]^2 dt = 1 \quad ; \quad k \in \{1, \dots, K_M\}, \quad m \in \{1, \dots, M_M\} \quad (2-7)$$

$$\int_0^T [s_{km,H}]^2 dt = 1 \quad ; \quad k \in \{1, \dots, K_H\}, \quad m \in \{1, \dots, M_H\} \quad (2-8)$$



รูปที่ 2.9 แบบจำลองด้านส่งของระบบ DS-SS สามอัตรา (อัตรา R, 2R และ 4R) ที่ส่งด้วยแบบแผนหลายอัตรา

สำหรับตัวกำกับจะขออนุญาตให้ตัวกำกับตัวแรกแสดงถึงลำดับที่ของผู้ใช้สำหรับอัตราข้อมูลนั้น ตัวกำกับตัวที่สอง (ถ้ามี) ในกรณีแบบแผนหลายรหัสจะหมายถึงลำดับบิตข้อมูลในชุดบิตย่อย ส่วนตัวกำกับตัวสุดท้ายจะแสดงถึงอัตราข้อมูล เช่น  $s_{12,M}(t)$  จะหมายถึง รหัสแผ่สำหรับบิตที่ 2 ในชุดบิตของผู้ใช้รายที่ 1 ของอัตราข้อมูลกลาง เป็นต้น

- **ภาครับ**

ในที่นี้จะแสดงเครื่องรับแบบธรรมดา (เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์) สำหรับระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัส โดยรูปที่ 2.10 จะแสดงการรับข้อมูลในระบบที่มีค่า  $M_M$  และ  $M_H$  เป็น 2 และ 4 ตามลำดับ ทั้งนี้สมการทั่วไปของข้อมูลก่อนตัดสินใจบิตสำหรับผู้ใช้อัตราต่ำ อัตราข้อมูลกลาง และอัตราข้อมูลสูงจะเป็นดังสมการที่ (2-9), (2-10) และ (2-11) ตามลำดับ คือ

$$\left. \begin{aligned} y_{k,L} &= \int_0^T r(t) s_{k,L}(t) dt \\ &= A_{k,L} b_{k,L} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{K_L} A_{i,L} b_{i,L} \delta_{i,L}^{k,L} + \sum_{i=1}^{K_M} \sum_{j=1}^{M_M} A_{i,M} b_{ij,M} \delta_{ij,M}^{k,L} + \sum_{i=1}^{K_H} \sum_{j=1}^{M_H} A_{i,H} b_{ij,H} \delta_{ij,H}^{k,L} + \tilde{n}_{k,L} \end{aligned} \right\} (2-9)$$

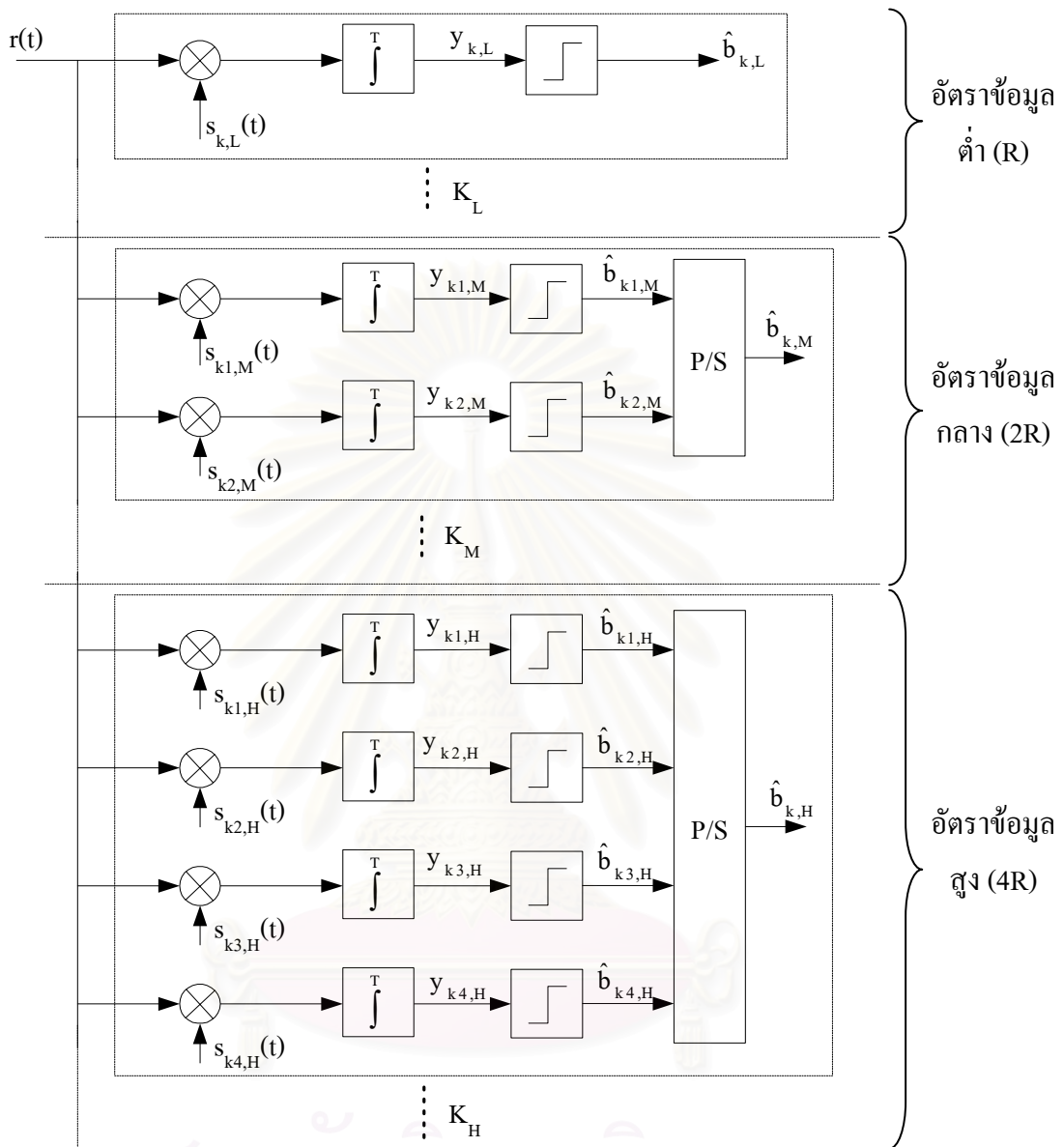
$$\left. \begin{aligned} y_{km,M} &= \int_0^T r(t) s_{km,M}(t) dt \\ &= A_{k,M} b_{km,M} + \sum_{i=1}^{K_L} A_{i,L} b_{i,L} \delta_{i,L}^{km,M} + \sum_{\substack{i=1 \\ (i,j) \neq (k,m)}}^{K_M} \sum_{j=1}^{M_M} A_{i,M} b_{ij,M} \delta_{ij,M}^{km,M} + \sum_{i=1}^{K_H} \sum_{j=1}^{M_H} A_{i,H} b_{ij,H} \delta_{ij,H}^{km,M} + \tilde{n}_{km,M} \end{aligned} \right\} (2-10)$$

$$\left. \begin{aligned} y_{km,H} &= \int_0^T r(t) s_{km,H}(t) dt \\ &= A_{k,H} b_{km,H} + \sum_{i=1}^{K_L} A_{i,L} b_{i,L} \delta_{i,L}^{km,H} + \sum_{i=1}^{K_M} \sum_{j=1}^{M_M} A_{i,M} b_{ij,M} \delta_{ij,M}^{km,H} + \sum_{\substack{i=1 \\ (i,j) \neq (k,m)}}^{K_H} \sum_{j=1}^{M_H} A_{i,H} b_{ij,H} \delta_{ij,H}^{km,H} + \tilde{n}_{km,H} \end{aligned} \right\} (2-11)$$

โดย  $\delta_b^a = \int_0^T s_a s_b dt$  คือค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างรหัส  $s_a$  และ  $s_b$  ใดๆ

$\tilde{n}_a$  คือสัญญาณรบกวนที่ถูกรวมกลับด้วยรหัส  $s_a$  แล้ว

[a และ b แทนตัวกำกับผู้ใช้ ลำดับบิต และอัตราข้อมูลใดๆ]



รูปที่ 2.10 แบบจำลองด้านรับของระบบ DS-SS สามอัตรา (อัตรา R, 2R และ 4R)

ที่ส่งด้วยแบบแผนหลายอัตรา

ข้อมูลที่ผ่านการแมตซ์ดังสมการที่ (2-9) (2-10) และ (2-11) แล้ว จะถูกนำมาตัดสินบิตโดยใช้ฟังก์ชันซิกนัมดังสมการที่ (2-3) หรือนำมาผ่านกระบวนการบางอย่างของเครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายเพื่อเพิ่มความเชื่อถือได้ของข้อมูลก่อนที่จะนำมาตัดสินบิตด้วยฟังก์ชันซิกนัม จากนั้นบิตข้อมูลของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางและสูงแต่ละรายจะถูกมัลติเพลกซ์ให้มีอัตราข้อมูลตามจริงของผู้ใช้รายนั้นๆ



เมื่อพิจารณาที่ภาคส่งดังรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าที่ผู้ใช้อัตราสูงกว่าอัตราพื้นฐาน สัญญาณที่ผ่านตัวขยายสัญญาณจะประกอบด้วยสัญญาณย่อยที่ผ่านการแผ่แล้วหลายสัญญาณรวมกัน ทำให้ขนาดสัญญาณที่ตัวขยายมีค่าสูงตามอัตราข้อมูลที่เพิ่มขึ้น ด้วยเหตุนี้ตัวขยายที่ใช้จึงต้องมีช่วงกำลังใช้งาน  $(0 - A_0$  ในรูปที่ 2.7) สูงขึ้นด้วยอัตราส่วนกำลังสองของอัตราข้อมูลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งถือเป็นปัญหาสำคัญเพราะตัวขยายสัญญาณในปัจจุบันยังมีข้อจำกัดอยู่มาก อีกทั้งตัวขยายที่มีคุณสมบัติด้านกำลังที่ดีจะมีราคาสูงทำให้ไม่เหมาะในการนำมาใช้ในเชิงพาณิชย์ ด้วยเหตุนี้จึงได้มีผู้เสนอแบบแผนหลายอัตราที่ขนาดของสัญญาณที่ตัวขยายไม่เปลี่ยนไปตามอัตราข้อมูล เช่น แบบแผนไบออร์ทอกอนอล และแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัส เป็นต้น

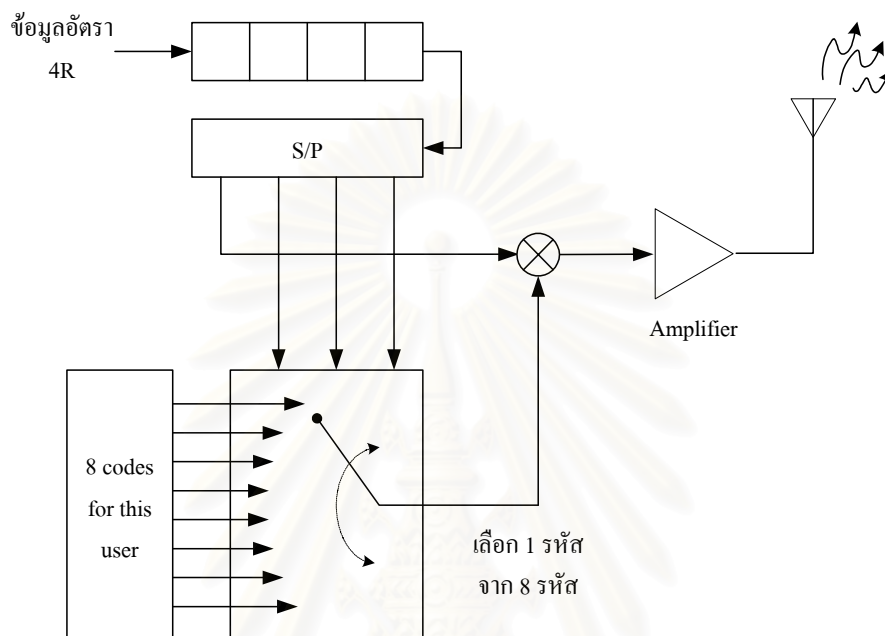
#### 2.4 แบบแผนไบออร์ทอกอนอล (Biorthogonal scheme) [45,46]

สืบเนื่องจากปัญหาที่ตัวขยายสัญญาณในผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลสูงๆ ของระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสดังที่ได้กล่าวไปแล้ว แบบแผนไบออร์ทอกอนอลจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการส่งสัญญาณในระบบหลายอัตรา โดยสำหรับข้อมูลทุกอัตราจะมีเพียงหนึ่งสัญญาณย่อยเท่านั้นที่ถูกแผ่ด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีคุณสมบัติเดียวกันในผู้ใช้ทุกรายโดยไม่ขึ้นกับอัตราข้อมูล

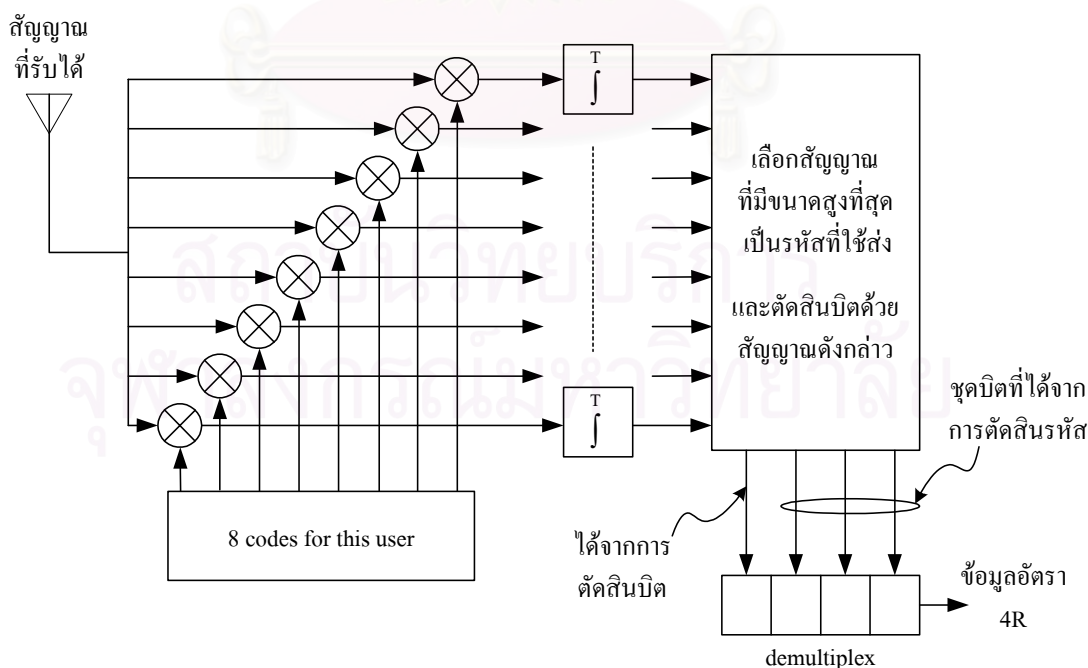
การส่งด้วยแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแสดงได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.11 โดยสมมติให้อัตราข้อมูลมีค่ามากกว่าอัตราข้อมูลพื้นฐานอยู่ 4 เท่า (อัตราเท่ากับ  $4R$  หรือ  $M = 4$ ) ในการส่งจะทำการแบ่งข้อมูลอัตราสูงออกเป็นชุด ชุดละ 4 บิต จากนั้นจะนำข้อมูล 3 บิตแรก ( $M-1$  บิตแรก) มาเลือกรหัสจากชุดรหัส 8 รหัส ( $2^{M-1}$  รหัส) ซึ่งโดยปกติรหัสดังกล่าวจะเกิดจากผลคูณระหว่างรหัสดังกล่าว 8 รหัสกับลำดับสัญญาณรบกวนสุ่มเทียมสำหรับผู้ใช้รายนั้น จากนั้นจะนำรหัสที่เลือกได้มาแผ่บิตข้อมูลอีก 1 บิตที่เหลือ สำหรับการเลือกรหัสที่นำมาแผ่นั้นจะใช้เลขฐานสองของบิตข้อมูลมาแปลงเป็นเลขรหัสฐานสิบ ยกตัวอย่างเช่น เมื่อชุดข้อมูลที่ส่งเป็น 1011 การส่งจะนำข้อมูลสามบิตแรก (011) มาเลือกรหัส ซึ่งสมมติให้การเลือกรหัสใช้ค่าฐานสิบของสามบิตดังกล่าว ( $011_2 = 3_{10}$ ) ดังนั้น ในที่นี้จึงเลือกรหัสตัวที่ 3 มาแผ่ข้อมูลอีก 1 บิตที่เหลือ (1) นั่นเอง

สำหรับส่วนของภาครับนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งสมมติให้อัตราข้อมูลมีค่ามากกว่าอัตราข้อมูลต่ำสุดอยู่ 4 เท่าเช่นเดียวกัน โดยภาครับจะทำการแมตช์ด้วยรหัสทั้งหมดในชุด (ในที่นี้ได้แก่รหัส 8 รหัสสำหรับผู้ใช้รายนั้นๆ) จากนั้นพิจารณาว่ารหัสที่แมตช์ได้ดีที่สุดหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือหาสัญญาณที่มีขนาดใหญ่ที่สุด รหัสที่สอดคล้องกับสัญญาณดังกล่าวจะทำให้ภาครับรู้บิตข้อมูล

ที่ใช้เลือกรหัสที่ใช้ในการส่ง (ในที่นี้คือสามบิตแรก) และนำสัญญาณที่มีขนาดใหญ่ที่สุดดังกล่าวไปตัดสินบิตเพื่อให้ได้บิตข้อมูล 1 บิตที่เหลือ สุดท้ายบิตข้อมูลทั้งหมดในชุด (4 บิต) จะถูกดีมัลติเพลกซ์กลับเป็นข้อมูลอัตรา 4 เท่าของอัตราพื้นฐาน



รูปที่ 2.11 ลักษณะภาคส่งของระบบที่ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอล โดยใช้อัตราข้อมูล 4R



รูปที่ 2.12 ลักษณะภาครับของระบบที่ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอล โดยใช้อัตราข้อมูล 4R

สัญญาณที่ส่งด้วยแบบแผนนี้จะปราศจากการรวมสัญญาณย่อย ซึ่งจะลดปัญหาที่ตัวขยายลงไปได้มาก ดังนั้นถึงแม้ว่าตัวขยายที่ใช้มีคุณสมบัติไม่ดีนัก ก็สามารถส่งได้เต็มกำลังมากกว่าในกรณีที่ใช้แบบแผนหลายรหัส อย่างไรก็ตาม การใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลมีข้อเสียที่สำคัญคือจะไม่ทนทานต่อสัญญาณรบกวน เนื่องจากสัญญาณรบกวนในปริมาณไม่มากอาจทำให้การตรวจหารหัสที่ใช้ในการส่งเกิดความผิดพลาดได้

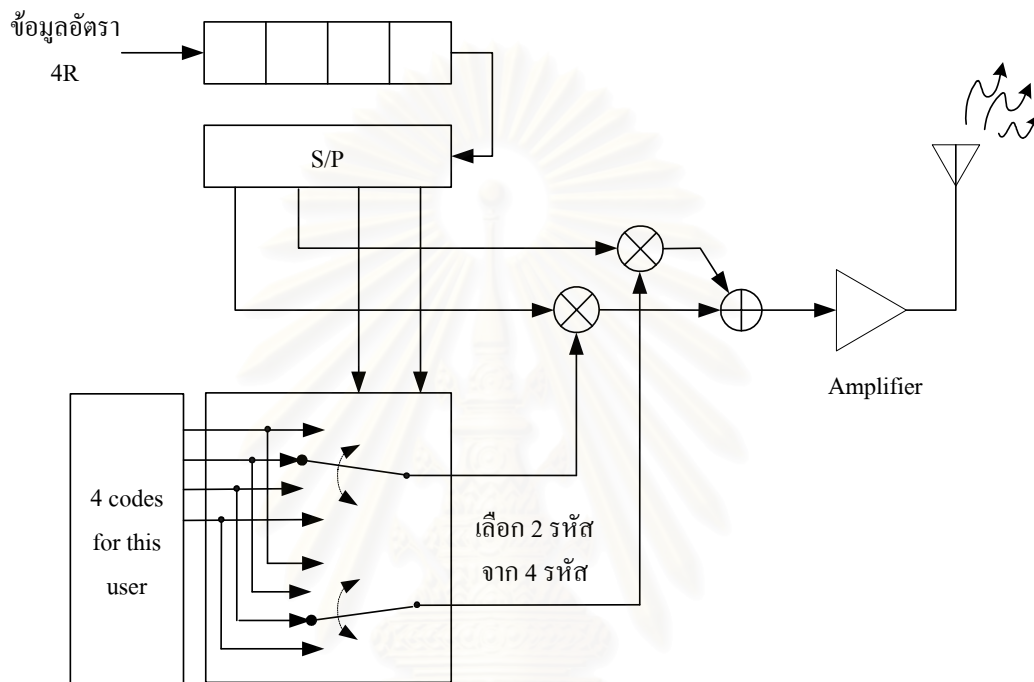
## 2.5 แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัส (Biorthogonal multicode scheme) [45,46]

สืบเนื่องมาจากข้อเสียในด้านความทนทานต่อสัญญาณรบกวนของการใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จึงได้มีผู้นำแบบแผนไบออร์ทอกอนอลและแบบแผนหลายรหัสมาผสม (hybrid) กัน และเรียกว่าแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัส

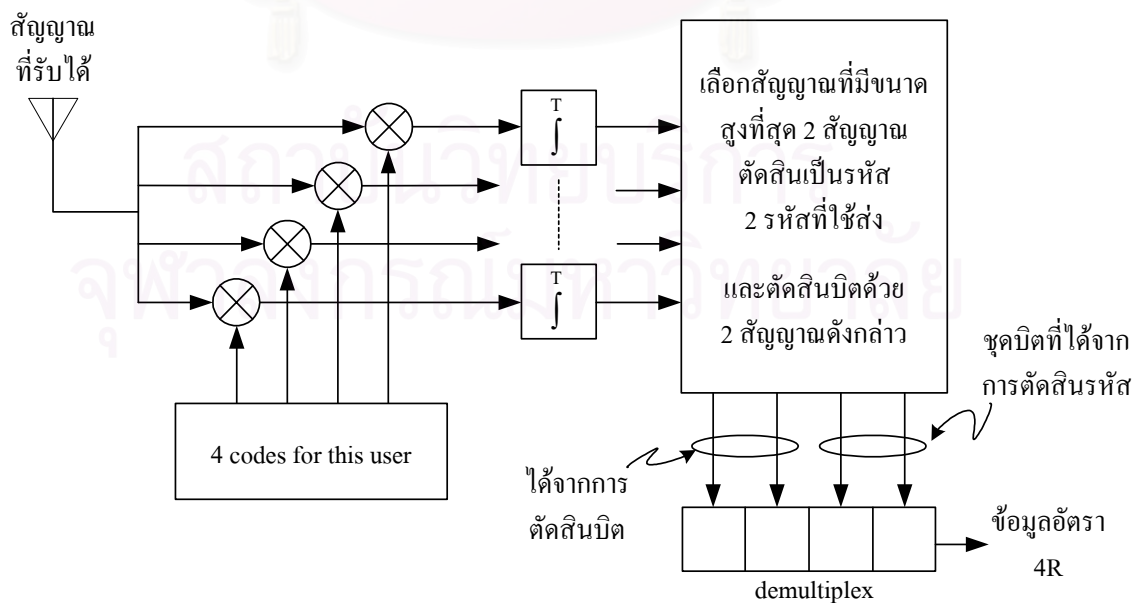
การส่งด้วยแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสแสดงได้ดังตัวอย่างในรูปที่ 2.13 โดยสมมติให้อัตราข้อมูลมีค่ามากกว่าอัตราข้อมูลพื้นฐานอยู่ 4 เท่า (อัตราเท่ากับ  $4R$  หรือ  $M = 4$ ) ในการส่งจะต่างจากแบบแผนไบออร์ทอกอนอลโดยแทนที่จะใช้ข้อมูล  $M-1$  บิตแรกของชุดบิต  $M$  บิตมาเลือกรหัสจากชุดรหัส  $8$  รหัส ( $2^{M-1}$  รหัส) ในแบบแผนนี้จะใช้ข้อมูลจำนวนระหว่าง  $1$  ถึง  $M-1$  บิตแรกมาใช้เลือกรหัส ซึ่งจำนวนรหัสในชุดอาจน้อยกว่า  $2^{M-1}$  รหัส และนำรหัสที่เลือกได้ไปแผ่ข้อมูลที่เหลือ เช่นในรูปที่ 2.13 ( $M = 4$ ) จะใช้ข้อมูล 2 บิตแรกของชุดข้อมูล 4 บิตมาเลือกรหัสจากชุดรหัสที่มี 4 รหัส สำหรับวิธีการเลือกจะเลือกจากชุดของสองรหัสใดๆ (ชุดของ  $q$  รหัส โดย  $q$  คือจำนวนสัญญาณย่อยที่ต้องแผ่ด้วยรหัสในผู้ใช้รายนั้น) ที่เป็นไปได้ในชุดรหัส 4 รหัส เช่น สมมติให้การกำหนดบิตที่เลือกรหัสเป็นดังนี้คือ เมื่อข้อมูลที่เลือกใช้เป็น 00 จะเลือกรหัสที่ 1 และ 2 เมื่อข้อมูลที่เลือกใช้เป็น 01 จะเลือกรหัสที่ 2 และ 3 เมื่อข้อมูลที่เลือกใช้เป็น 10 จะเลือกรหัสที่ 3 และ 4 และ เมื่อข้อมูลที่เลือกใช้เป็น 11 จะเลือกรหัสที่ 4 และ 1 ดังนั้นเมื่อชุดข้อมูล 4 บิตคือ 1001 จะใช้ข้อมูลสองบิตแรก (01) มาเลือกรหัส ได้เป็นรหัสที่ 2 และ 3 มาแผ่ข้อมูลบิตที่สาม (0) และสี่ (1) เป็นต้น หลังจากขั้นตอนการแผ่ จะนำสัญญาณที่แผ่แล้วมาบวกกันดังเช่นในแบบแผนหลายรหัสแล้วจึงส่งออกสู่ช่องสัญญาณ

สำหรับส่วนของภาครับนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งสมมติให้อัตราข้อมูลมีค่ามากกว่าอัตราข้อมูลที่ต่ำสุดอยู่ 4 เท่าเช่นเดียวกัน โดยภาครับจะทำการแมตช์ด้วยรหัสทั้งหมดในชุด (ในที่นี้ได้แก่รหัส 4 รหัสสำหรับผู้ใช้รายนั้นๆ) จากนั้นพิจารณาชุดสองรหัสที่แมตช์ได้ดีที่สุดหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือหาสองสัญญาณที่มีขนาดใหญ่ที่สุดที่สอดคล้องกับชุดสองรหัสที่มีอยู่ สองรหัสที่เลือก

ได้จากขั้นตอนดังกล่าวจะทำให้ภาครับรู้บิตข้อมูลที่ใช้เลือกรหัสที่ใช้ในการส่ง (ในที่นี้คือสองบิตแรก) และนำสองสัญญาณที่ใช้ตรวจเลือกรหัสดังกล่าวไปตัดสินบิตเพื่อให้ได้บิตข้อมูลสองบิตที่เหลือ สุดท้ายบิตข้อมูลทั้งหมดในชุด (4 บิต) จะถูกมีมัลติเพลกซ์กลับเป็นข้อมูลอัตรา 4 เท่าของอัตราพื้นฐาน



รูปที่ 2.13 ลักษณะภาคส่งของระบบที่ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส โดยใช้อัตราข้อมูล 4R



รูปที่ 2.14 ลักษณะภาครับของระบบที่ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส โดยใช้อัตราข้อมูล 4R

จำนวนรหัสที่จำเป็นสำหรับผู้ใช้รายหนึ่งๆ จะมีความสัมพันธ์กับอัตราข้อมูลของผู้ใช้รายนั้น รวมไปถึงจำนวนสัญญาณย่อยที่ถูกแผ่ โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถเขียนได้ด้วยสมการดังนี้ [45,46]

$$M = \left\lceil \log_2 \left( \frac{N}{q} \right) \right\rceil + q \quad (2-12)$$

โดย  $M$  คืออัตราข้อมูลที่สามารถส่งได้  $N$  คือจำนวนรหัสในชุดรหัสของผู้ใช้รายดังกล่าว  $q$  คือ จำนวนสัญญาณย่อยที่ถูกแผ่ และ  $\lfloor x \rfloor$  บ่งบอกถึงตัวดำเนินการให้เป็นจำนวนเต็มที่สูงที่สุดที่มีค่าไม่เกิน  $x$

จากสมการที่ (2-12) สามารถบอกจำนวนรหัสที่จำเป็นสำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่างๆ เมื่อ  $q = 2$  เทียบกับการส่งด้วยแบบแผนหลายรหัสและแบบแผนไบนารีทอคอนอลได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 จำนวนรหัสที่จำเป็นสำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่างๆ [45,46]

อัตราข้อมูล	จำนวนรหัสที่ใช้ (N)		
	แบบแผนหลายรหัส	แบบแผนไบนารีทอคอนอล	แบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส ( $q = 2$ )
R	1	1	1
2R	2	$2^{(2-1)} = 2^1 = 2$	2
3R	3	$2^{(3-1)} = 2^2 = 4$	3
4R	4	$2^{(4-1)} = 2^3 = 8$	4
6R	6	$2^{(6-1)} = 2^5 = 32$	7
8R	8	$2^{(8-1)} = 2^7 = 128$	12

เมื่อเปรียบเทียบในแง่ของค่ากำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณเฉลี่ย (PAV) จะได้ดังตารางที่ 2.2 โดยค่า PAV จะหาได้จาก

$$PAV = \log_{10}(q) \quad (2-13)$$

ตารางที่ 2.2 ให้ค่า  $q$  สำหรับแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสเท่ากับ 2 จากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการส่งด้วยแบบแผนหลายรหัสมีค่า PAV ที่เพิ่มขึ้นตามอัตราข้อมูลที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้ตัวขยายสัญญาณต้องมีความสามารถในการรองรับช่วงกำลังใช้งานที่กว้างมากดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในขณะที่แบบแผนไบออร์ทอกอนอลและแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสนั้นปราศจากปัญหานี้ โดยสัญญาณที่ส่งด้วยแบบแผนไบออร์ทอกอนอลจะปราศจากการรวมสัญญาณย่อย ในขณะที่แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสนั้นสามารถกำหนดจำนวนสัญญาณย่อยที่จะถูกส่งรวมกันในผู้รับรายหนึ่งๆ ได้

ตารางที่ 2.2 ค่ากำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณเฉลี่ยสำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่างๆ [45,46]

อัตราข้อมูล	ค่ากำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณเฉลี่ย (PAV)		
	แบบแผนหลายรหัส	แบบแผนไบออร์ทอกอนอล	แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัส ( $q = 2$ )
R	0	0	0
2R	3	0	3
3R	4.8	0	3
4R	6	0	3
6R	7.8	0	3
8R	9	0	3

กล่าวโดยสรุป การส่งด้วยแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสจะมีความทนทานต่อสัญญาณรบกวนปานกลาง (ดีกว่าแบบแผนไบออร์ทอกอนอล แต่จะด้อยกว่าในแบบแผนหลายรหัส) และจะปราศจากปัญหาที่ตัวขยายดังเช่นในกรณีที่ใช้แบบแผนหลายรหัส

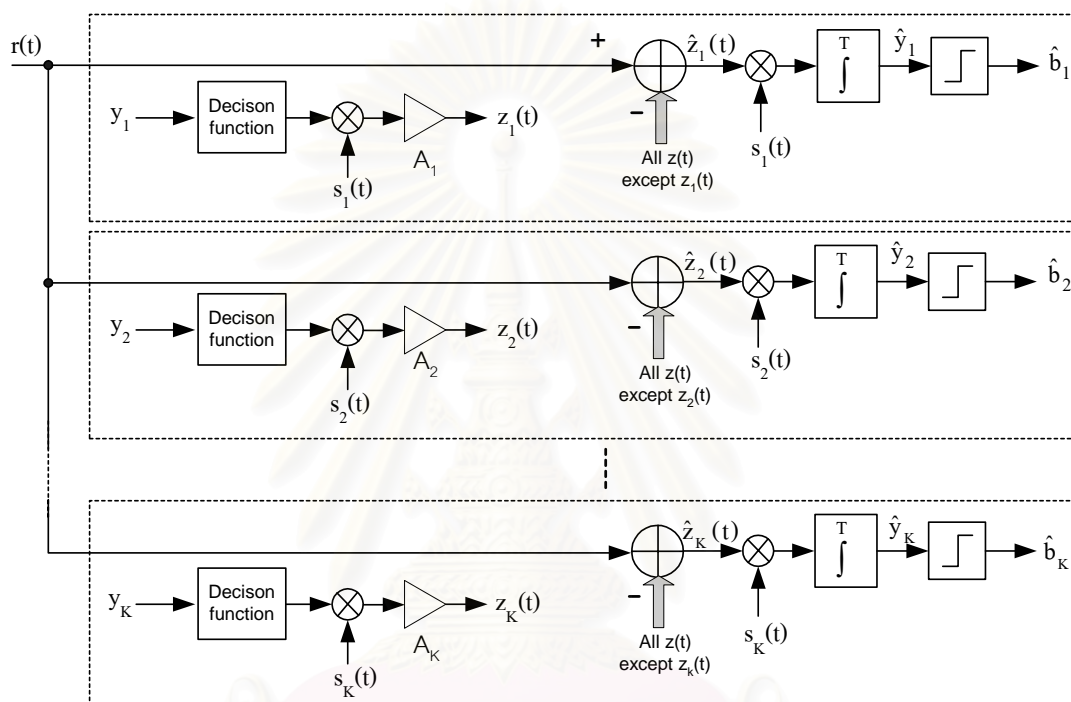
## 2.6 เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอด

เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดเป็นเครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายชนิดไม่เชิงเส้นที่สามารถลดสัญญาณแทรกสอดจากผู้รับอื่นได้ในระดับหนึ่ง เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดโดยปกติแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน (PIC) และเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างต่อเนื่อง (SIC) ในที่นี้จะพิจารณาเครื่องรับ



แบบหากล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานเป็นหลัก โดยตั้งสมมุติฐานบนระบบที่มีการควบคุมกำลังที่ดี

### 2.6.1 เครื่องรับแบบหากล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานสำหรับระบบอัตราเดียว



รูปที่ 2.15 เครื่องรับแบบหากล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในระบบอัตราเดียว

เครื่องรับแบบหากล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานสำหรับระบบอัตราเดียวที่มีผู้ใช้  $K$  รายแสดงดังรูปที่ 2.15 โดยจะนำสัญญาณที่ผ่านเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้แต่ละราย ( $y_k$ ) มาผ่านฟังก์ชันการตัดสินใจแล้วจะทำการแผ่ด้วยรหัสสำหรับผู้ใช้รายนั้นอีกครั้ง จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ทำการแผ่แล้ว ( $z_k$ ) ของผู้ใช้รายอื่นมาหักล้างกับสัญญาณที่รับได้ ( $r(t)$ ) เป็นการขจัดค่าสัญญาณแทรกสอดให้กับผู้ใช้รายที่สนใจ ทั้งนี้การหากล้างสัญญาณแทรกสอดจะทำพร้อมกันในผู้ใช้ทุกๆ ราย หลังจากทำการหากล้างสัญญาณแทรกสอดแล้วจะทำการรวมกลับและตัดสินใจบิตในที่สุด

## 2.6.2 เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานสำหรับระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัส

แบบจำลองของเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานสำหรับระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้แสดงดังรูปที่ 2.16 หลักการทั่วไปจะเหมือนกับเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานที่ใช้ในระบบอัตราเดียว ทั้งนี้ให้พิจารณาสัญญาณย่อยของผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลมากกว่าอัตราข้อมูลพื้นฐาน ( $R$ ) ให้เป็นผู้ใช้รายใหม่ โดยการหักล้างสัญญาณแทรกสอดสำหรับสัญญาณย่อยเหล่านี้จะต้องหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่มาจากทุกๆ สัญญาณย่อยที่ไม่ใช่สัญญาณย่อยในผู้ใช้รายเดียวกัน (ในผู้ใช้รายเดียวกัน รหัสที่ใช้แบ่งสัญญาณย่อยจะเป็นรหัสตั้งจากซึ่งมีค่าสหสัมพันธ์ข้ามเป็นศูนย์)

สัญญาณที่ผ่านเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ ( $y$ ) จะผ่านฟังก์ชันการตัดสินใจ ซึ่งในที่นี้จะใช้ฟังก์ชันการตัดสินใจแบบซิกนัม (เป็นแบบ hard-decision) หลังจากนั้นจะทำการแผ่อีกครั้ง สัญญาณที่ทำการแผ่แล้วจะแสดงดังนี้

$$z_{k,L}(t) = A_{k,L} \operatorname{sgn}(y_{k,L}) s_{k,L}(t) \quad (2-14)$$

$$z_{km,M}(t) = A_{k,M} \operatorname{sgn}(y_{km,M}) s_{km,M}(t) \quad (2-15)$$

$$z_{km,H}(t) = A_{k,H} \operatorname{sgn}(y_{km,H}) s_{km,H}(t) \quad (2-16)$$

โดย  $y_{k,L}$ ,  $y_{km,M}$  และ  $y_{km,H}$  คือสัญญาณหลังผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์ดังสมการที่ (2-9) (2-10) และ (2-11) ตามลำดับ และ  $s_{k,L}(t)$ ,  $s_{km,M}(t)$  และ  $s_{km,H}(t)$  คือรหัสที่ใช้ในการแผ่สำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ กลาง และสูงตามลำดับดังเช่นในภาคส่ง

ในขั้นตอนหักล้างสัญญาณแทรกสอดจากสัญญาณที่รับได้ ( $r(t)$ ) จะได้สัญญาณที่ผ่านการหักล้างสัญญาณแทรกสอดเป็น

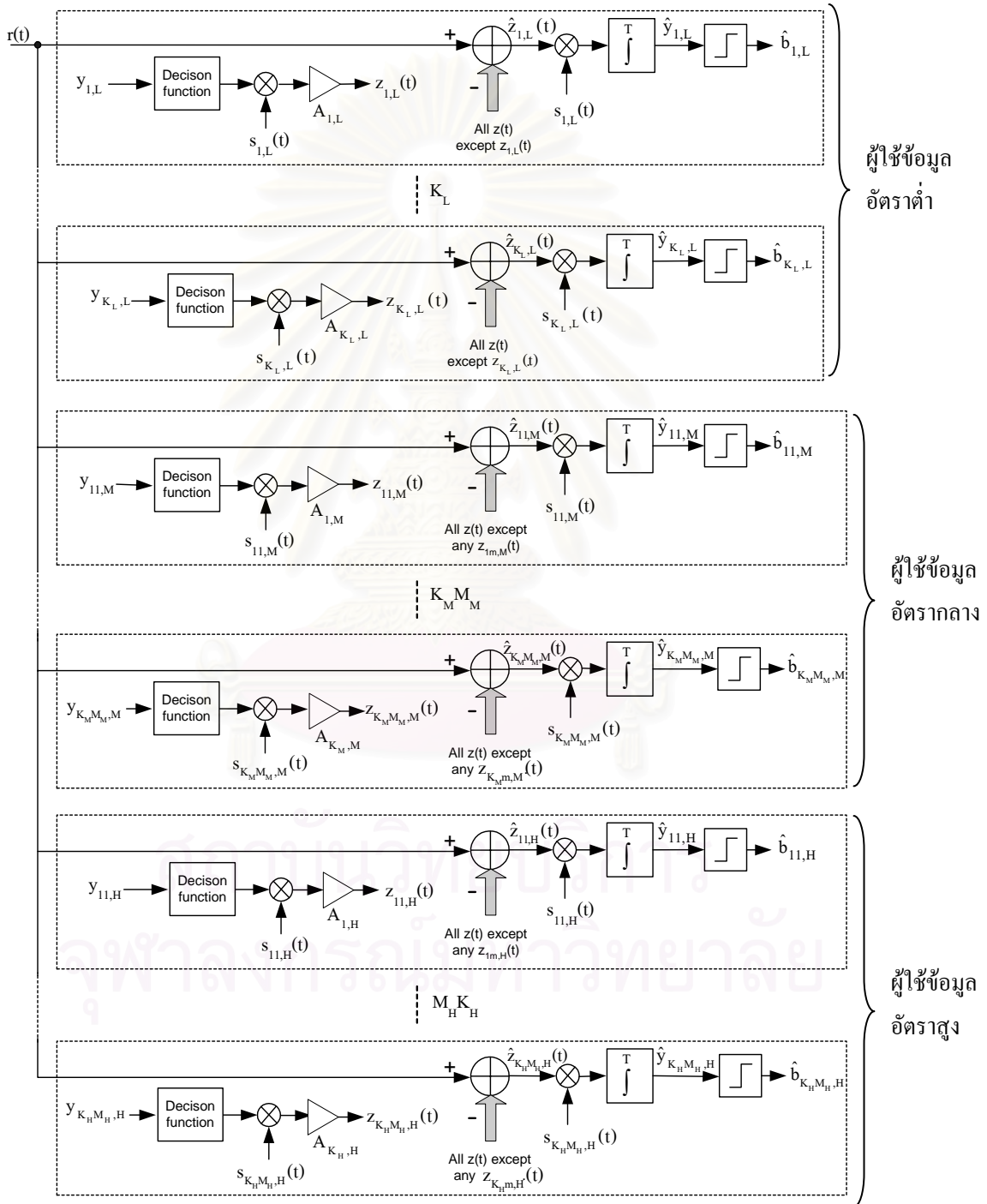
$$\hat{z}_{k,L}(t) = r(t) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{K_L} z_{i,L}(t) - \sum_{i=1}^{K_M} \sum_{j=1}^{M_M} z_{ij,M}(t) - \sum_{i=1}^{K_H} \sum_{j=1}^{M_H} z_{ij,H}(t) \quad (2-17)$$

$$\hat{z}_{km,M}(t) = r(t) - \sum_{i=1}^{K_L} z_{i,L}(t) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{K_M} \sum_{j=1}^{M_M} z_{ij,M}(t) - \sum_{i=1}^{K_H} \sum_{j=1}^{M_H} z_{ij,H}(t) \quad (2-18)$$

$$\hat{z}_{km,H}(t) = r(t) - \sum_{i=1}^{K_L} z_{i,L}(t) - \sum_{i=1}^{K_M} \sum_{j=1}^{M_M} z_{ij,M}(t) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{K_H} \sum_{j=1}^{M_H} z_{ij,H}(t) \quad (2-19)$$

เมื่อ

$$r(t) = \sum_{k=1}^{K_L} A_{k,L} b_{k,L} s_{k,L}(t) + \sum_{k=1}^{K_M} \sum_{m=1}^{M_M} A_{k,M} b_{k,m} s_{k,m}(t) + \sum_{k=1}^{K_H} \sum_{m=1}^{M_H} A_{k,H} b_{k,m} s_{k,m}(t) + n(t) \quad (2-5)$$



รูปที่ 2.16 เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัส

จากสมการที่ (2-5) (2-14)-(2-16) และ (2-17)-(2-19) จะได้ว่าเมื่อ  $\text{sgn}(y_{k,L})$   $\text{sgn}(y_{km,M})$  และ  $\text{sgn}(y_{km,H})$  ใดๆ มีค่าเท่ากับ  $b_{k,L}$   $b_{km,M}$  และ  $b_{km,H}$  ใดๆ ตามลำดับแล้ว จะทำให้สัญญาณของผู้ใช้รายต่างๆ หลังการหักล้างสัญญาณแทรกสอด ปราศจากสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อื่น ดังนั้นในกรณีดังกล่าว จะได้

$$\hat{y}_{k,L} = \int_0^T \hat{z}_{k,L}(t) s_{k,L}(t) dt = A_{k,L} b_{k,L} + \tilde{n}_{k,L} \quad (2-20)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}_{km,M} &= \int_0^T \hat{z}_{km,M}(t) s_{km,M}(t) dt \\ &= A_{k,M} b_{km,M} + A_{k,M} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^{M_M} b_{kj,M} \delta_{kj,M}^{km,M} + \tilde{n}_{km,M} = A_{k,M} b_{km,M} + \tilde{n}_{km,M} \end{aligned} \quad (2-21)$$

$$\begin{aligned} \hat{y}_{km,H} &= \int_0^T \hat{z}_{km,H}(t) s_{km,H}(t) dt \\ &= A_{k,H} b_{km,H} + A_{k,H} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^{M_H} b_{kj,H} \delta_{kj,H}^{km,H} + \tilde{n}_{km,H} = A_{k,H} b_{km,H} + \tilde{n}_{km,H} \end{aligned} \quad (2-22)$$

โดย  $\delta_a^b$  เป็นค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างรหัส  $s_a(t)$  และ  $s_b(t)$  ซึ่ง  $\delta_{kj,M}^{km,M}$  และ  $\delta_{kj,H}^{km,H}$  มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อ  $j$  ไม่เท่ากับ  $m$  อันเนื่องมาจากความตั้งฉากของรหัสภายในผู้ใช้รายเดียวกัน และ  $\tilde{n}_{k,L}$   $\tilde{n}_{km,M}$  และ  $\tilde{n}_{km,H}$  เป็นสัญญาณรบกวนที่ผ่านเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์แล้ว

จากสมการที่ (2-20) - (2-22) เมื่อนำไปตัดสินบิตจะได้บิตข้อมูลที่ต้องการตามข้อมูลที่ส่งมา อย่างไรก็ตาม ถ้าหากการตัดสินบิตในขั้นแรกผิดพลาด การหักล้างในสมการที่ (2-17) - (2-19) จะไม่สมบูรณ์ และอาจทำให้สัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นได้

## 2.7 วิธีวัดสมรรถนะ

### 2.7.1 อัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER)

อัตราความผิดพลาดบิต หรือความน่าจะเป็นของความผิดพลาดบิต (Bit error probability) เป็นค่าที่มักใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ บนตัวแปรที่เปลี่ยนค่าบางอย่าง เช่น ค่า

อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน หรือจำนวนผู้ใช้ในระบบ เป็นต้น ค่าอัตราความผิดพลาดบิตนี้สามารถหาได้โดยหาจำนวนบิตที่ตัดสินผิดพลาดต่อจำนวนบิตทั้งหมดที่ส่ง

### 2.7.2 อัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal-to-Noise Ratio : SNR)

ค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้รายที่  $k$  นิยามโดย

$$\text{SNR}_k = 10 \log \left( \frac{A_k^2}{\sigma^2} \right) \text{ dB} \quad (2-23)$$

เมื่อ  $A_k$  คือ ขนาดสัญญาณของผู้ใช้รายที่  $k$  โดย  $A_k^2$  จะเป็นกำลังของบิตข้อมูลของผู้ใช้รายที่  $k$  และ  $\sigma^2$  คือความแปรปรวนของสัญญาณรบกวน

### 2.7.3 ความต้านทานต่อปรากฏการณ์ใกล้-ไกล (Near-far Resistance)

ในระบบที่ใช้เครื่องรับแบบไม่เชิงเส้น การหาความทนทานต่อปรากฏการณ์ใกล้-ไกลในรูปของสมการจะมีความยุ่งยากมาก ดังนั้นปกติแล้วจะแสดงอยู่ในรูปกราฟของอัตราความผิดพลาดบิต โดยจะใช้ค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้รายอื่นที่มารบกวนเป็นค่าตัวแปรที่เปลี่ยนค่า แล้วทำการหาอัตราความผิดพลาดบิตของผู้ใช้รายที่สนใจ โดยเครื่องรับที่ทนทานต่อปรากฏการณ์ใกล้-ไกล จะให้อัตราความผิดพลาดบิตที่ลดลงไม่มากเมื่อค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่มารบกวนมีค่าเพิ่มขึ้น

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### ระบบและเครื่องรับที่นำเสนอ

ในบทที่แล้วได้กล่าวถึงระบบ DS-CDMA สามอัตราซึ่งได้รับการคาดหมายว่าจะเป็นระบบที่สามารถรองรับการบริการในระบบไร้สายยุคที่ 3 โดยแบบแผนที่ใช้รองรับข้อมูลสามอัตราที่สนใจในที่นี้คือแบบแผนหลายรหัสซึ่งมีคุณสมบัติในด้านสมรรถนะที่ดี อย่างไรก็ตามเมื่อใช้แบบแผนหลายรหัส ผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลสูงจะต้องใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีค่ากำลังสูงที่สุดที่สูงมาก ดังนั้นเพื่อลดปัญหาที่ตัวขยายสัญญาณ จึงมีผู้เสนอแบบแผนไบนารีทอคอนอลและแบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัสขึ้นเพื่อใช้แทนแบบแผนหลายรหัส อย่างไรก็ตามระบบที่ใช้แบบแผนเหล่านี้มีข้อเสียที่สำคัญคือความต้านทานต่อสัญญาณรบกวนจะน้อยกว่าระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัส

วิทยานิพนธ์นี้จะนำข้อดีของแบบแผนไบนารีทอคอนอลและแบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัสมาลดค่ากำลังสูงที่สุดที่จำเป็นของตัวขยายสัญญาณสำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง โดยสำหรับระบบสามอัตรา ผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางและต่ำจะยังคงใช้แบบแผนหลายรหัส ส่วนผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงจะใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอล หรือแบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัสเป็นแบบแผนในการส่งสัญญาณ นอกจากนี้จะใช้เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายมาใช้ลดสัญญาณแทรกสอดในระบบ โดยเฉพาะสำหรับผู้ใช้ที่ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัสที่มีความต้านทานต่อสัญญาณรบกวนน้อยกว่า

ในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกจะกล่าวถึงระบบ DS-CDMA สามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสร่วมกับแบบแผนไบนารีทอคอนอลในรูปแบบที่เสนอ ส่วนที่สองจะกล่าวถึงระบบ DS-CDMA สามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสร่วมกับแบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัสในรูปแบบที่เสนอ และส่วนสุดท้ายจะกล่าวถึงเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดเป็นกลุ่มที่ใช้กับระบบที่เสนอในสองส่วนแรก

#### 3.1 ระบบ DS-CDMA สามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสร่วมกับแบบแผนไบนารีทอคอนอล

จากแนวคิดหลักที่ต้องการลดกำลังสูงที่สุดของตัวขยายสัญญาณที่ใช้สำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงในระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัส วิทยานิพนธ์นี้จึงได้เสนอการนำแบบแผนไบนารีทอคอนอลมาใช้แทนเฉพาะในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง โดยข้อดีอีกข้อหนึ่งที่ได้จากการใช้แบบแผนไบนารีทอ



คอนอล คือ การรบกวนจากสัญญาณของผู้ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลจะต่ำมากเมื่อเทียบกับในกรณีที่ใช้แบบแผนหลายรหัส ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่แบบแผนไบออร์ทอกอนอลจะส่งเพียงหนึ่งสัญญาณย่อยต่อผู้ใช้นั้นราย ทำให้สัญญาณรวมที่เกิดจากการรวมสัญญาณย่อยในผู้ใช้นั้นๆ มีกำลังที่ต่ำกว่ามาก เป็นผลให้ส่งผลกระทบผู้ใช้นั้นน้อยกว่าในกรณีแบบแผนหลายรหัสที่สัญญาณในผู้ใช้อัตราสูงเกิดจากการรวมสัญญาณย่อยเป็นจำนวนมากนั่นเอง

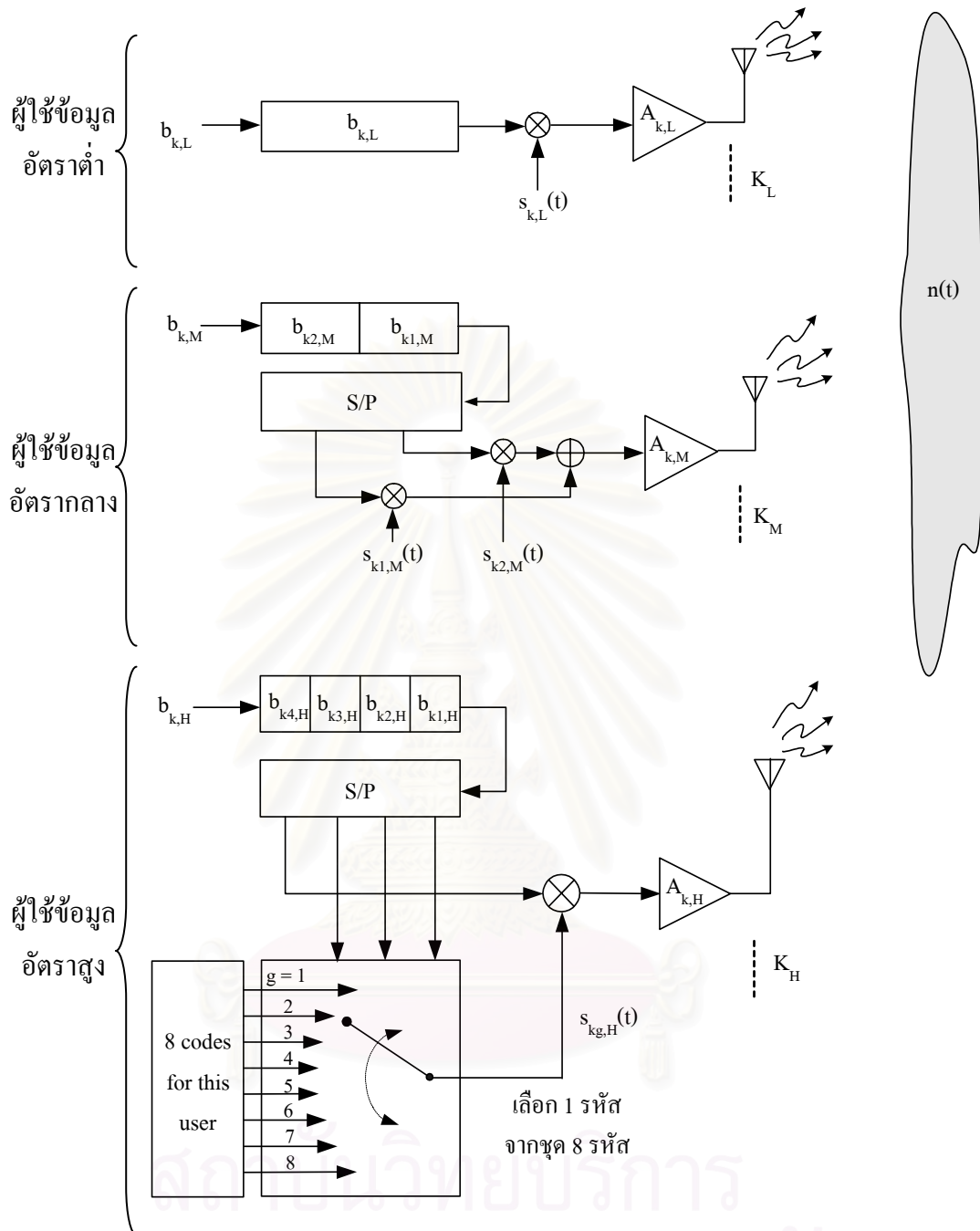
### 3.1.1 แบบจำลองระบบภาคส่ง

แบบจำลองภาคส่งของระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสในผู้ใช้อัตรากลางและต่ำ และใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลในผู้ใช้อัตราสูง แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยในที่นี้จะใช้อัตราข้อมูลต่ำเป็นอัตราพื้นฐาน (R) อัตราข้อมูลกลางที่มากกว่าอัตราข้อมูลพื้นฐานสองเท่า (2R) และอัตราข้อมูลสูงที่มากกว่าอัตราข้อมูลพื้นฐานสี่เท่า (4R) [30,32] หรือ  $M_M$  และ  $M_H$  เป็นสองและสี่ ตามลำดับ และให้คาบิตสำหรับผู้ใช้อัตราพื้นฐานเป็น T

กำหนดให้ผู้ใช้นั้นในระบบจำนวน K ราย ประกอบด้วยผู้ใช้อัตราต่ำ  $K_L$  ราย ผู้ใช้อัตรากลาง  $K_M$  ราย และผู้ใช้อัตราสูง  $K_H$  ราย เมื่อสัญญาณรบกวนในช่องสัญญาณเป็น  $n(t)$  จะได้สัญญาณที่ภาครับรับได้เป็น

$$r(t) = \sum_{k=1}^{K_L} A_{k,L} b_{k,L} s_{k,L}(t) + \sum_{k=1}^{K_M} \sum_{m=1}^{M_M} A_{k,M} b_{km,M} s_{km,M}(t) + \sum_{k=1}^{K_H} A_{k,H} b_{kM_H,H} s_{kg,H}(t) + n(t) \quad (3-1)$$

โดย  $A_{k,L}$   $A_{k,M}$  และ  $A_{k,H}$  คือขนาดสัญญาณของผู้ใช้รายที่ k ของผู้ใช้อัตราต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ  $b_{k,L}$  และ  $b_{km,M}$  คือบิตข้อมูลของผู้ใช้รายที่ k ของผู้ใช้อัตราต่ำ และบิตข้อมูลที่ m ในชุดข้อมูล  $M_M$  บิต ของผู้ใช้รายที่ k ของผู้ใช้อัตรากลาง ตามลำดับ  $s_{k,L}(t)$  และ  $s_{km,M}(t)$  คือรหัสแผ่ของผู้ใช้รายที่ k ของผู้ใช้อัตราต่ำ และรหัสแผ่สำหรับบิตข้อมูลที่ m ในชุดบิตข้อมูล  $M_M$  บิตของผู้ใช้รายที่ k ของผู้ใช้อัตรากลาง ตามลำดับ  $b_{kM_H,H}$  คือบิตข้อมูลที่  $M_H$  ในชุดบิต  $M_H$  บิต ของผู้ใช้รายที่ k ของผู้ใช้อัตราสูง และ  $s_{kg,H}(t)$  คือรหัสแผ่ตัวที่ g ของผู้ใช้รายที่ k ของผู้ใช้อัตราสูง ซึ่งค่า g นี้สามารถหาได้จากการแปลงบิตข้อมูล  $[b_{k[M_H-1],H}, \dots, b_{k,1,H}]$  เป็นเลขฐานสิบ



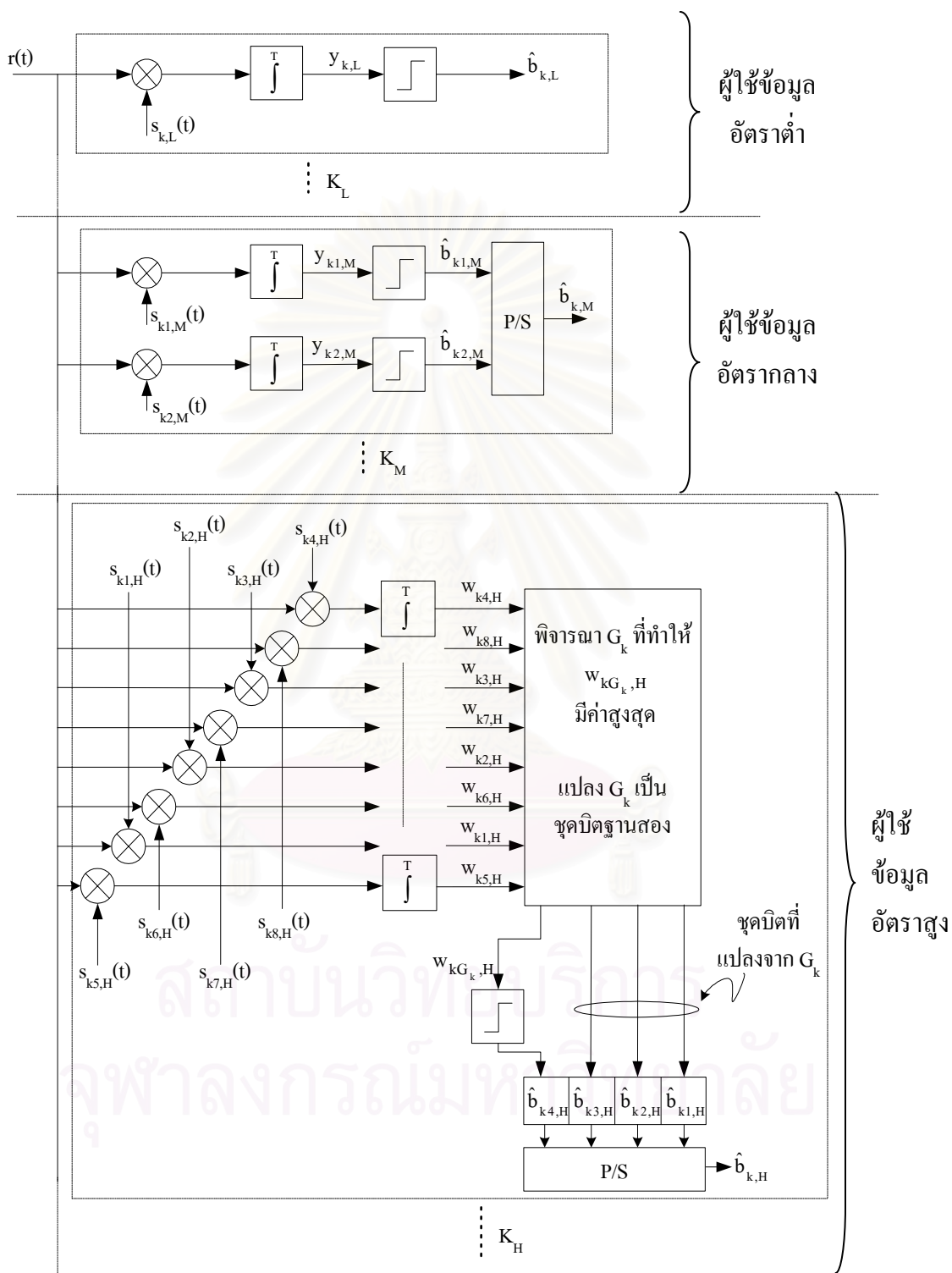
รูปที่ 3.1 แบบจำลองภาคส่งของระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง (2R) และต่ำ (R) และใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอลในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (4R)

สำหรับรหัสใดๆ ในที่นี้

$$\int s_a(t) dt = 1 \tag{3-2}$$

โดย a เป็นตัวกำกับใดๆ ในที่นี้

3.1.2 แบบจำลองระบบภาครับ



รูปที่ 3.2 แบบจำลองภาครับของระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสในผู้ใช้อัตรากลาง (2R) และต่ำ (R) และใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอลในผู้ใช้อัตราสูง (4R)

แบบจำลองการรับของระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางและต่ำ และใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง แสดงดังรูปที่ 3.2

สัญญาณที่ผ่านการรวมกลับแล้วของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลาง ซึ่งใช้แบบแผนหลายรหัสในการส่ง แสดงได้ดังสมการที่ (3-3) และ (3-4) ตามลำดับ ส่วนสัญญาณดังกล่าวของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ซึ่งใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแสดงดังสมการที่ (3-5)

$$\left. \begin{aligned} y_{k,L} &= \int_0^T r(t) s_{k,L}(t) dt \\ &= A_{k,L} b_{k,L} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{K_L} A_{i,L} b_{i,L} \delta_{i,L}^{k,L} + \sum_{i=1}^{K_M} \sum_{j=1}^{M_M} A_{i,M} b_{ij,M} \delta_{ij,M}^{k,L} + \sum_{i=1}^{K_H} A_{i,H} b_{iM_H,H} \delta_{ig,H}^{k,L} + \tilde{n}_{k,L} \end{aligned} \right\} (3-3)$$

$$\left. \begin{aligned} y_{km,M} &= \int_0^T r(t) s_{km,M}(t) dt \\ &= A_{k,M} b_{km,M} + \sum_{i=1}^{K_L} A_{i,L} b_{i,L} \delta_{i,L}^{km,M} + \sum_{\substack{i=1 \\ (i,j) \neq (k,m)}}^{K_M} \sum_{j=1}^{M_M} A_{i,M} b_{ij,M} \delta_{ij,M}^{km,M} + \sum_{i=1}^{K_H} A_{i,H} b_{iM_H,H} \delta_{ig,H}^{km,M} + \tilde{n}_{km,M} \end{aligned} \right\} (3-4)$$

$$\left. \begin{aligned} w_{kg',H} &= \int_0^T r(t) s_{kg',H}(t) dt \\ &= A_{k,H} b_{kM_H,H} \delta_{kg,H}^{kg,H} + \sum_{i=1}^{K_L} A_{i,L} b_{i,L} \delta_{i,L}^{kg,H} + \sum_{i=1}^{K_M} \sum_{j=1}^{M_M} A_{i,M} b_{ij,M} \delta_{ij,M}^{kg,H} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{K_H} A_{i,H} b_{iM_H,H} \delta_{ig,H}^{kg,H} + \tilde{n}_{kg,H} \end{aligned} \right\} (3-5)$$

โดย  $\delta_a^b$  คือ ค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างรหัสที่มีตัวกำกับเป็น a และ b

$\tilde{n}_a$  คือสัญญาณรบกวนที่ผ่านการรวมกลับด้วยรหัสที่มีตัวกำกับเป็น a

สำหรับหมายเลขชุดรหัส  $G_k$  ของผู้ใช้รายที่ k สามารถหาได้จาก

$$w_{kG_k,H} = \max_{g'} (w_{kg',H}) \quad (3-6)$$

เมื่อการตัดสินใจรหัสจากสมการที่ (3-6) ตัดสินรหัสได้ถูกต้องจะได้สัญญาณก่อนนำไปตัดสินใจบิตของผู้ใช้ที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลรายที่ k เป็น

$$\left. \begin{aligned} w_{kG_k,H} &= A_{k,H} b_{kM_H,H} + \sum_{i=1}^{K_L} A_{i,L} b_{i,L} \delta_{i,L}^{kG_k,H} \\ &+ \sum_{i=1}^{K_M} \sum_{j=1}^{M_M} A_{i,M} b_{ij,M} \delta_{ij,M}^{kG_k,H} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{K_H} A_{i,H} b_{iM_H,H} \delta_{ig,H}^{kG_k,H} + \tilde{n}_{kG_k,H} \end{aligned} \right\} (3-7)$$

ทั้งนี้สำหรับบิตข้อมูล  $[b_{k[M_H-1],H}, \dots, b_{k1,H}]$  ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงหาได้ดังนี้

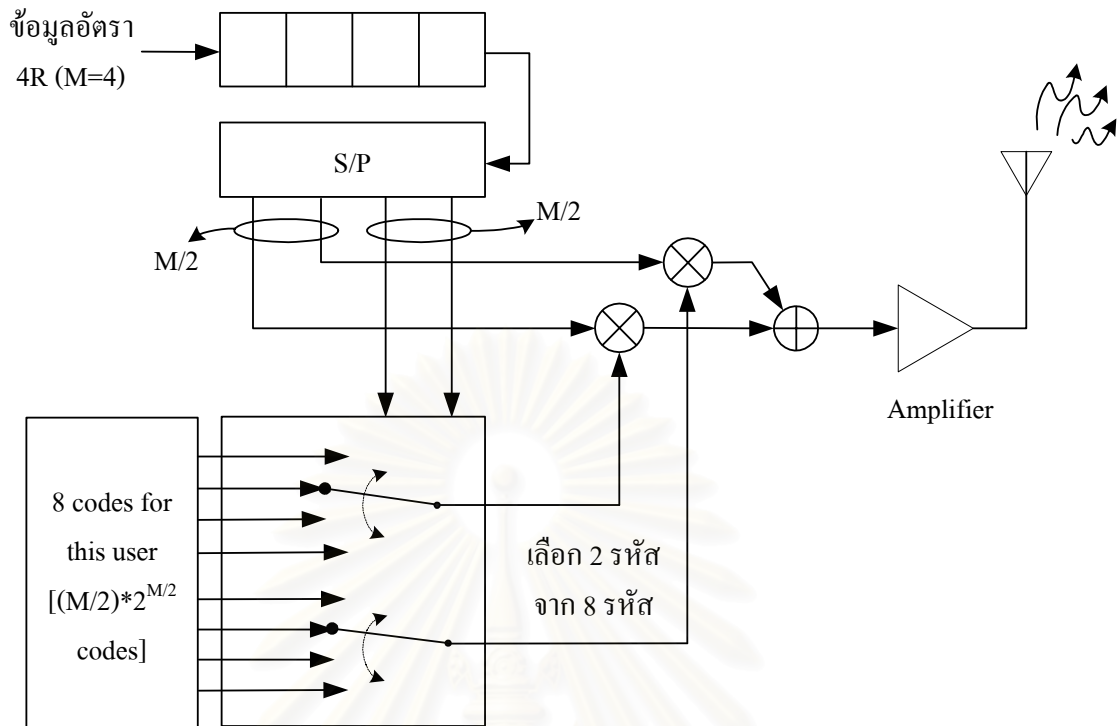
$$[b_{k[M_H-1],H}, \dots, b_{k1,H}] = \text{bin}(G_k) \quad (3-8)$$

โดย  $\text{bin}(\cdot)$  คือการแปลงจากเลขฐานสิบเป็นเลขฐานสอง

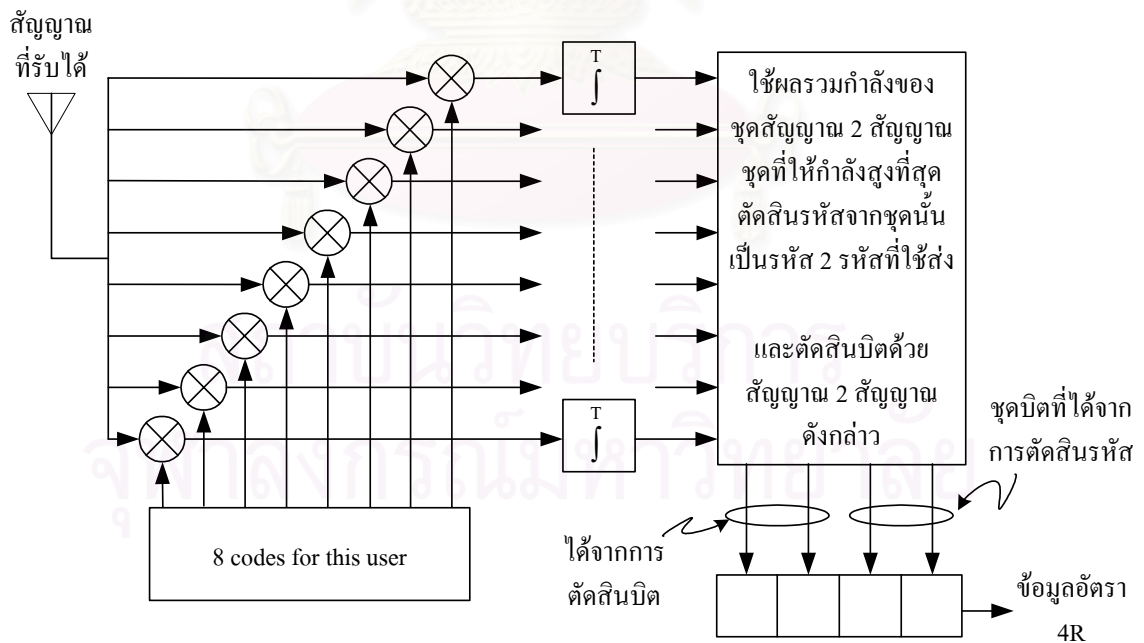
### 3.2 ระบบ DS-CDMA สามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสร่วมด้วยแบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส

เพื่อเพิ่มความต้านทานต่อสัญญาณรบกวนในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงเสนอระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสร่วมด้วยแบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงควบคู่ไปกับระบบที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.1 โดยการส่งด้วยแบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัสที่ใช้ในระบบสามอัตราจะเป็นดังรูปที่ 3.3

แบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัสที่ใช้ในที่นี้จะส่งสัญญาณที่ประกอบด้วยการรวมสัญญาณย่อยจำนวนครึ่งหนึ่งของอัตราข้อมูลสูง ( $q = M/2$  เมื่อ  $M$  เป็นอัตราข้อมูลสูง และเป็นจำนวนคู่) เช่น สำหรับข้อมูล  $4R$  เมื่อ  $R$  เป็นอัตราข้อมูลพื้นฐาน จะทำการแผ่สัญญาณเพียง 2 สัญญาณย่อย ( $q = 4/2$ ) นอกจากนี้จะใช้รหัสแผ่ทั้งหมดเป็นจำนวน  $(M/2)2^{M/2}$  รหัส โดยจะเป็นรหัสแผ่สำหรับแผ่สัญญาณย่อย  $M/2$  สัญญาณย่อย สัญญาณย่อยละ  $2^{M/2}$  รหัส สำหรับในขั้นตอนเลือกรหัสแผ่จะใช้บิตข้อมูล  $M/2$  บิตแรก (เลขฐานสอง) มาเลือกรหัสใดรหัสหนึ่งในจำนวน  $2^{M/2}$  รหัส สำหรับแต่ละสัญญาณย่อย (เลขฐานสิบ) โดยการแปลงเลขฐานสองเป็นเลขฐานสิบ จากนั้นจึงนำรหัสที่ได้สำหรับแต่ละสัญญาณย่อยมาแผ่ให้กับบิตที่เหลือ ก่อนนำสัญญาณย่อยที่ถูกแผ่แล้วมารวมแบบบิตต่อบิต เช่น ถ้าชุดบิต 4 บิต ( $M$ ) เป็น 1001 จะนำสองบิต ( $M/2$ ) แรกนั่นคือ 01 มาเลือกรหัสแผ่ได้เป็นรหัสที่ 2 (เลขฐานสิบของ 01) จะนำรหัสที่สองสำหรับสัญญาณย่อยแต่ละสัญญาณมาแผ่สองบิตที่เหลือ เป็นต้น อันที่จริงเราต้องการรหัสเพียง 4 รหัสในกรณีที่มี  $M$  เท่ากับ 4 (ดังตารางที่ 2.1) แต่ในที่นี้ไม่ต้องการให้มีรหัสซ้ำกันเมื่อใช้บิตข้อมูลที่ใช้เลือกต่างกัน ซึ่งจะทำให้เกิดความเสี่ยงที่สูงต่อความผิดพลาดในการพิจารณารหัสที่ใช้เลือกในภาครับ



รูปที่ 3.3 แบบจำลองภาคส่งของผู้ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส  
ที่ใช้ในระบบที่เสนอ (ข้อมูลอัตรา 4R)



รูปที่ 3.4 แบบจำลองภาครับของผู้ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส  
ที่ใช้ในระบบที่เสนอ (ข้อมูลอัตรา 4R)



ที่ภาครับจะมีลักษณะดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 สำหรับการตรวจหารหัสที่ใช้ในการส่งจะใช้ผลรวมกำลังของชุดสัญญาณย่อยที่ผ่านการรวมกลับแล้ว โดยจะเลือกชุดที่ให้ผลรวมกำลังสูงที่สุดเป็นชุดรหัสที่ใช้ในการส่ง และจะทำการถอดชุดรหัสออกเป็นชุดบิตที่ส่งมา (ในที่นี้คือการแปลงจากเลขฐานสิบเป็นเลขฐานสอง) พร้อมกับการตัดสินใจบิตจากสัญญาณที่ให้กำลังสูงที่สุดดังกล่าว ภาครับของผู้ใช้ข้อมูลอัตรา 4R ที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสที่ใช้ในที่นี้แสดงดังรูปที่ 3.4

### 3.2.1 แบบจำลองระบบภาคส่ง

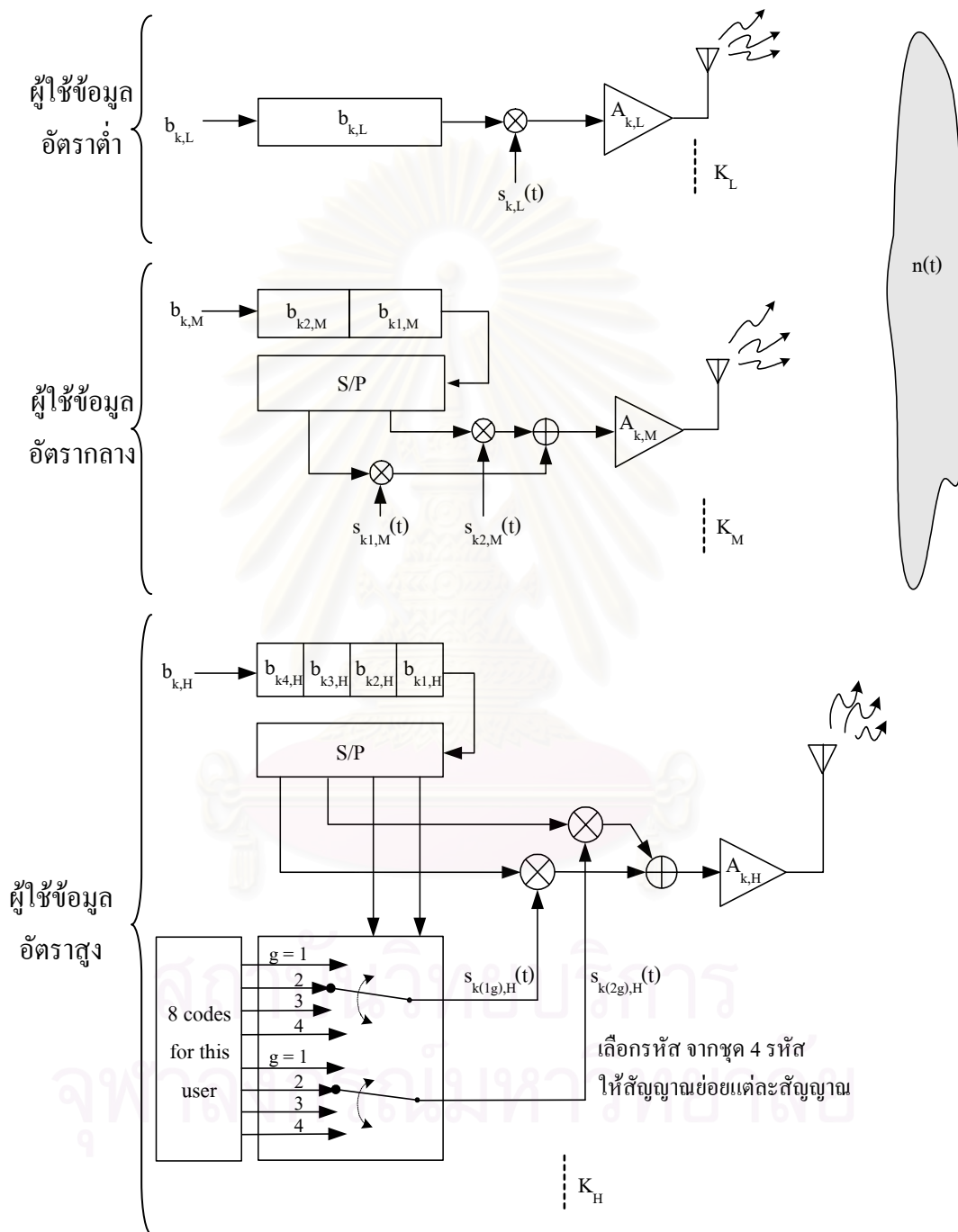
แบบจำลองภาคส่งของระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางและต่ำ และใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง แสดงดังรูปที่ 3.5 โดยอัตราข้อมูลประกอบด้วยอัตราข้อมูลต่ำ (R) อัตราข้อมูลกลางที่มากกว่าอัตราข้อมูลพื้นฐานสองเท่า (2R) และอัตราข้อมูลสูงที่มากกว่าอัตราข้อมูลพื้นฐานสี่เท่า (4R) หรือ  $M_M$  และ  $M_H$  เป็นสองและสี่ ตามลำดับ นอกจากนี้จะให้สัญญาณผู้ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสสายหนึ่งประกอบด้วยสัญญาณย่อย 2 สัญญาณย่อย ( $q = 2$ ) และให้คาบบิตสำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำเป็น T

กำหนดให้มีผู้ใช้ทั้งหมดในระบบ K ราย แบ่งเป็นผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ  $K_L$  ราย ผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง  $K_M$  ราย ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง  $K_H$  ราย จะได้ข้อมูลที่ถูส่งเมื่อรวมกับสัญญาณรบกวน  $n(t)$  ในช่องสัญญาณแล้ว เป็น

$$r(t) = \left. \begin{aligned} & \sum_{k=1}^{K_L} A_{k,L} b_{k,L} s_{k,L}(t) + \sum_{k=1}^{K_M} \sum_{m=1}^{M_M} A_{k,M} b_{km,M} s_{km,M}(t) \\ & + \sum_{k=1}^{K_H} \sum_{f=1}^q A_{k,H} b_{k[f+M_H/2],H} s_{k(fg),H}(t) + n(t) \end{aligned} \right\} \quad (3-9)$$

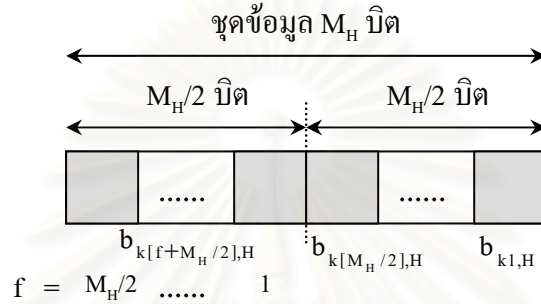
โดย  $A_{k,L}$   $A_{k,M}$  และ  $A_{k,H}$  คือขนาดสัญญาณของผู้ใช้รายที่ k ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ  $b_{k,L}$  และ  $b_{km,M}$  คือบิตข้อมูลของผู้ใช้รายที่ k ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ และบิตข้อมูลที่ m ในชุดข้อมูล  $M_M$  บิต ของผู้ใช้รายที่ k ของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง ตามลำดับ  $s_{k,L}(t)$  และ  $s_{km,M}(t)$  คือรหัสแผ่ของผู้ใช้รายที่ k ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ และรหัสแผ่สำหรับบิตข้อมูลที่ m ในชุดบิตข้อมูล  $M_M$  บิตของผู้ใช้รายที่ k ของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง ตามลำดับ  $b_{k[f+M_H/2],H}$  คือบิตข้อมูลที่  $[f+M_H/2]$  ในชุดบิต  $M_H$  บิต ของผู้ใช้รายที่ k ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง และ  $s_{k(fg),H}(t)$  คือรหัสแผ่กลุ่มที่ g สำหรับบิตข้อมูล (สัญญาณย่อย) ที่ f เมื่อนับเฉพาะบิตสำหรับแผ่  $M_H/2$  บิต (นั่นคือบิตข้อมูลที่

$[f+M_H/2]$  ในชุดบิต  $M_H$  บิต) ของผู้ใช้รายที่  $k$  ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง โดยรหัสทั้งหมดในที่นี้มีสมบัติสอดคล้องกับสมการที่ (3-2)



รูปที่ 3.5 แบบจำลองภาคส่งของระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง (2R) และต่ำ (R) และใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (4R)

สำหรับวิธีการเลือกรหัสแผ่นในผู้ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัส ในที่นี้จะนำชุดบิตข้อมูล  $[b_{k[M_H/2],H}, \dots, b_{k1,H}]$  ซึ่งเป็นเลขฐานสองมาเลือกกลุ่มของรหัสซึ่งเป็นเลขฐานสิบ (g) โดยเมื่อได้กลุ่มของรหัสเป็นกลุ่มที่ g แล้วจะนำรหัสหมายเลข g สำหรับสัญญาณย่อยแต่ละสัญญาณ (f) มาแผ่ให้กับบิตข้อมูลที่  $b_{k[f+M_H/2],H}$  ในชุดบิต  $M_H$  บิตจนครบทุก  $M_H/2$  บิตสำหรับแผ่รูปที่ 3.6 แสดงชุดบิตข้อมูลของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงรายหนึ่ง



รูปที่ 3.6 ชุดบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงของแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสที่ใช้

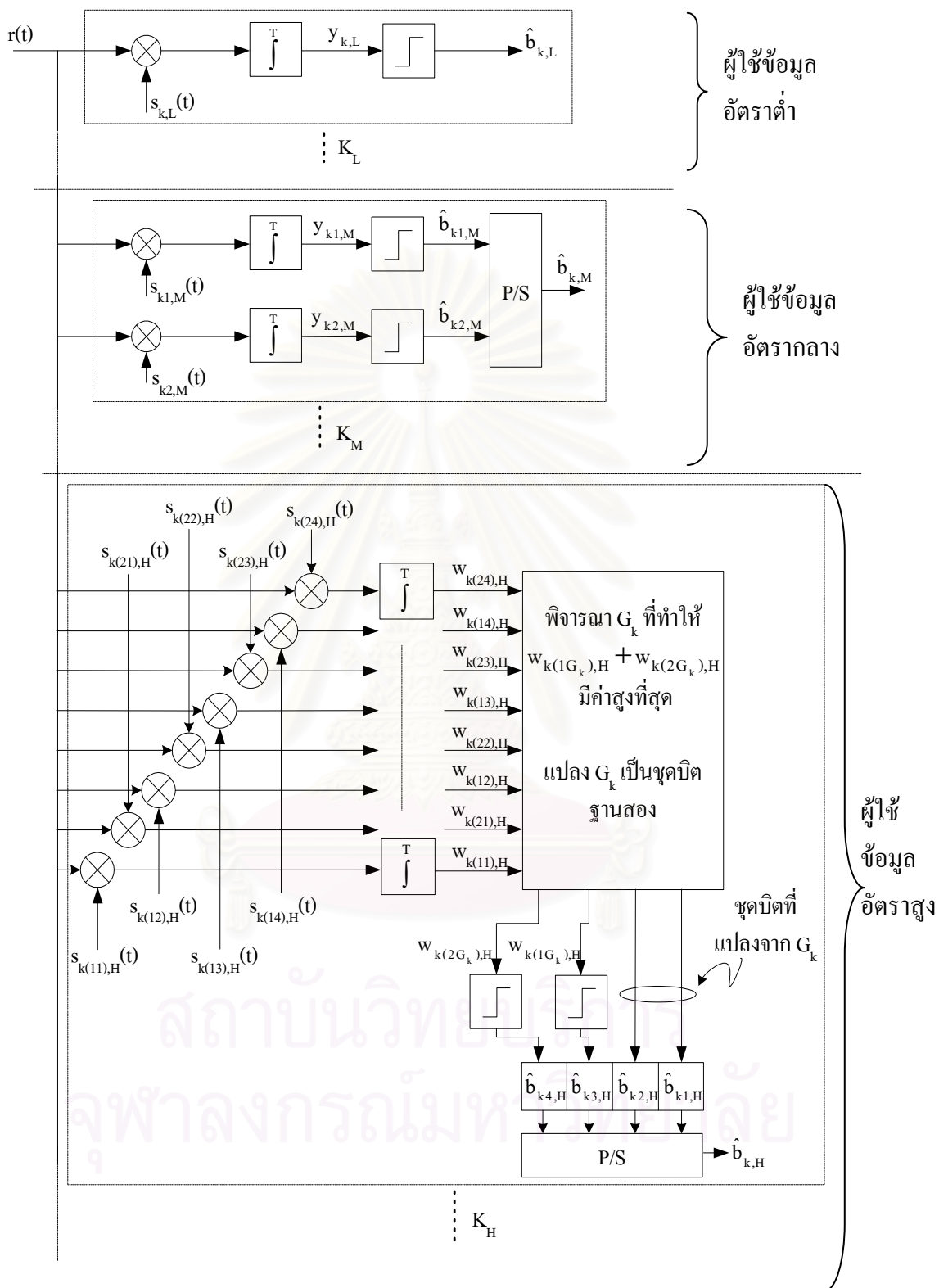
### 3.2.2 แบบจำลองระบบภาครับ

แบบจำลองภาครับของระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางและต่ำ และใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง แสดงดังรูปที่ 3.7

สัญญาณที่ผ่านการรวมกลับแล้วของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลาง ซึ่งใช้แบบแผนหลายรหัสในการส่ง แสดงได้ดังสมการที่ (3-10) และ (3-11) ตามลำดับ ส่วนสัญญาณดังกล่าวของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ซึ่งใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสแสดงดังสมการที่ (3-12)

$$\begin{aligned}
 y_{k,L} &= \int_0^T r(t) s_{k,L}(t) dt \\
 &= A_{k,L} b_{k,L} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{K_L} A_{i,L} b_{i,L} \delta_{i,L}^{k,L} + \sum_{i=j}^{K_M M_M} A_{i,M} b_{i,M} \delta_{i,M}^{k,L} + \sum_{i=j}^{K_H q} A_{i,H} b_{i[j+M_H/2],H} \delta_{i(j)H}^{k,L} + \tilde{n}_{k,L}
 \end{aligned} \quad (3-10)$$

$$\begin{aligned}
 y_{km,M} &= \int_0^T r(t) s_{km,M}(t) dt \\
 &= A_{k,M} b_{km,M} + \sum_{i=1}^{K_L} A_{i,L} b_{i,L} \delta_{i,L}^{kmM} + \sum_{\substack{i=j \\ (i,j) \neq (k,m)}}^{K_M M_M} A_{i,M} b_{i,M} \delta_{i,M}^{kmM} + \sum_{i=j}^{K_H q} A_{i,H} b_{i[j+M_H/2],H} \delta_{i(j)H}^{kmM} + \tilde{n}_{kmM}
 \end{aligned} \quad (3-11)$$



รูปที่ 3.7 แบบจำลองภาครับของระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง (2R) และต่ำ (R) และใช้แบบแผนไพออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (4R)

$$\begin{aligned}
w_{k(fg'),H} &= \int_0^T r(t) s_{k(fg'),H}(t) dt \\
&= A_{k,H} b_{k[f+M_H/2],H} \delta_{k(fg'),H}^{k(fg'),H} + \sum_{i=1}^{K_L} A_{i,L} b_{i,L} \delta_{i,L}^{k(fg'),H} + \sum_{i=1}^{K_M} \sum_{j=1}^{M_M} A_{i,M} b_{ij,M} \delta_{ij,M}^{k(fg'),H} \\
&\quad + \sum_{\substack{i=1 \\ (i,j) \neq (k,f)}}^{K_H} \sum_{j=1}^q A_{i,H} b_{i[j+M_H/2],H} \delta_{i(jg'),H}^{k(fg'),H} + \tilde{n}_{k(fg'),H}
\end{aligned} \tag{3-12}$$

โดย  $\delta_a^b$  คือ ค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างรหัสที่มีตัวกำกับเป็น a และ b

$\tilde{n}_a$  คือสัญญาณรบกวนที่ผ่านการรวมกลับด้วยรหัสที่มีตัวกำกับเป็น a

สำหรับหมายเลขชุดรหัส  $G_k$  ของผู้ใช้รายที่ k สามารถหาได้จาก

$$\sum_{f=1}^q w_{k(fG_k),H} = \max_{g'} \left( \sum_{f=1}^q w_{k(fg'),H} \right) \tag{3-13}$$

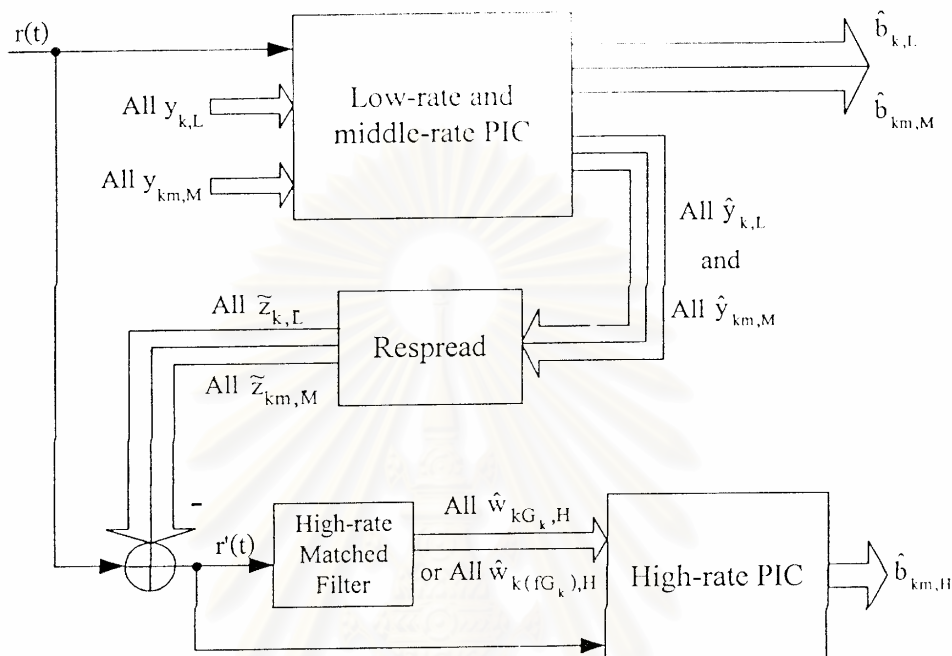
ถ้าการตัดสินใจรหัสที่ใช้ในการส่งถูกต้อง จะได้สัญญาณก่อนนำไปตัดสินใจของรหัสที่ใช้แบบแผนไบนารีทอร์คอนอลแบบหลายรหัสรายที่ k สำหรับบิตย่อย f เป็นดังนี้

$$\begin{aligned}
w_{k(fG_k),H} &= A_{k,H} b_{k[f+M_H/2],H} \delta_{i,L}^{k(fG_k),H} + \sum_{i=1}^{K_L} A_{i,L} b_{i,L} \delta_{i,L}^{k(fG_k),H} + \sum_{i=1}^{K_M} \sum_{j=1}^{M_M} A_{i,M} b_{ij,M} \delta_{ij,M}^{k(fG_k),H} \\
&\quad + \sum_{\substack{i=1 \\ (i,j) \neq (k,f)}}^{K_H} \sum_{j=1}^q A_{i,H} b_{i[j+M_H/2],H} \delta_{i(jg'),H}^{k(fG_k),H} + \tilde{n}_{k(fG_k),H}
\end{aligned} \tag{3-14}$$

ทั้งนี้สำหรับบิตข้อมูล  $[b_{k[M_H/2],H}, \dots, b_{k1,H}]$  ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงหาได้ดังนี้

$$[b_{k[M_H/2],H}, \dots, b_{k1,H}] = \text{bin}(G_k) \tag{3-15}$$

### 3.3 เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานเป็นกลุ่มที่มีการป้อนกลับเพื่อมุ่งหักล้างสัญญาณแทรกสอดให้กับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง

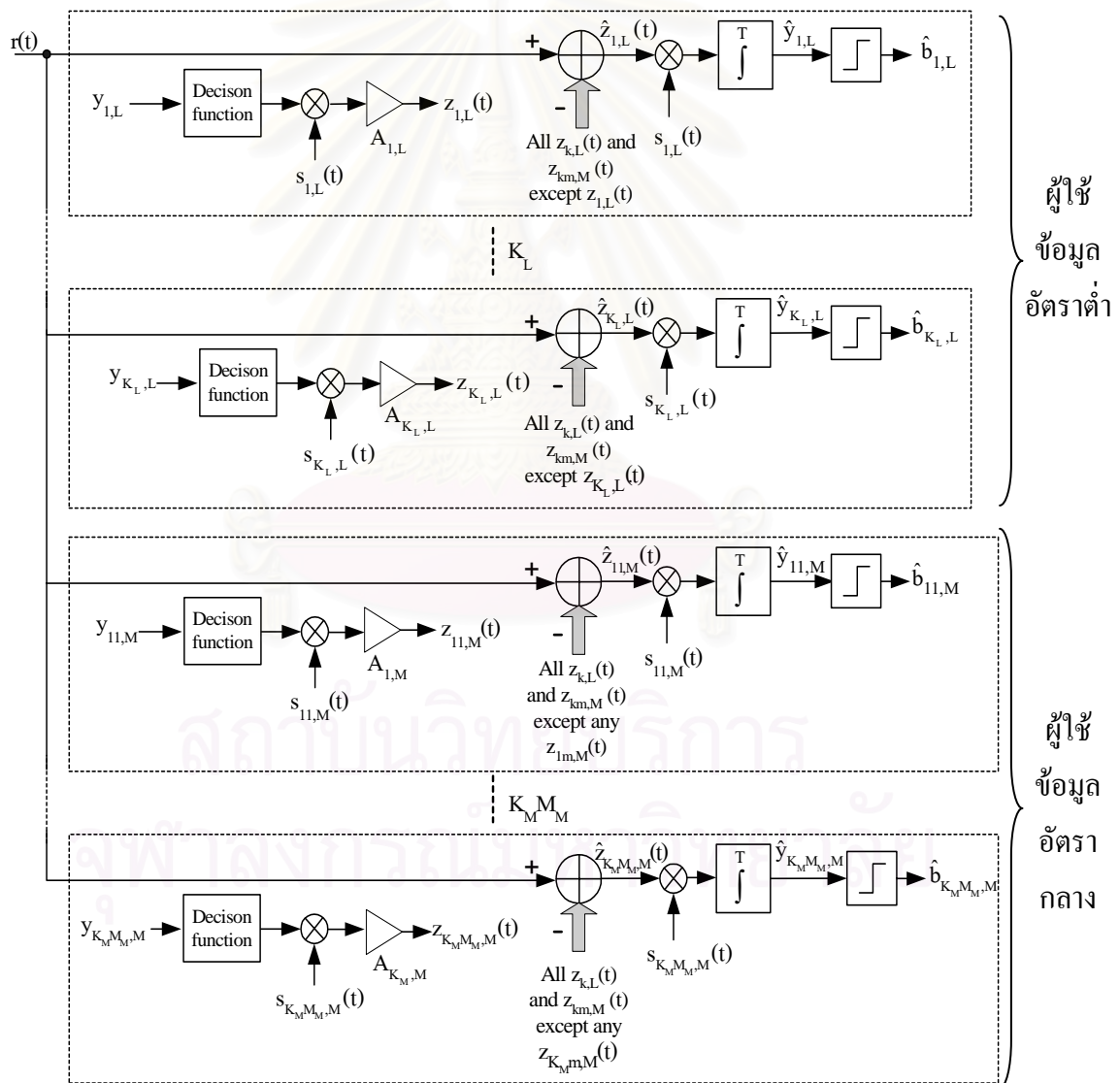


รูปที่ 3.8 แผนภูมิบล็อกของเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณรบกวนเป็นกลุ่มที่มีการป้อนกลับเพื่อมุ่งหักล้างสัญญาณแทรกสอดให้กับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง

ระบบสามอัตราที่ใช้แบบแผนหลายอัตราที่มีรูปแบบดังในหัวข้อที่ 3.1 และ 3.2 จะมีสมบัติเฉพาะในด้านสัญญาณแทรกสอด กล่าวคือสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงจะมีค่าต่ำเนื่องจากการใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอลหรือไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัสซึ่งสัญญาณเกิดจากการรวมสัญญาณย่อยที่น้อยกว่าในกรณีของแบบแผนหลายรหัส ในขณะที่ความต้านทานต่อสัญญาณรบกวน (รวมไปถึงสัญญาณแทรกสอด) ของสัญญาณผู้ใช้ที่ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอลหรือไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัสจะต่ำกว่าในกรณีของแบบแผนหลายรหัสด้วยสมบัติด้านการกำเนิดสัญญาณแทรกสอดและความต้านทานต่อสัญญาณแทรกสอดดังกล่าว วิทยานิพนธ์นี้จึงเสนอให้ใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่มุ่งเน้นการหักล้างสัญญาณแทรกสอดให้กับสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ในขณะที่อาจมีการละเลยสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงได้บ้าง



เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่ใช้ มีลักษณะดังรูปที่ 3.8 โดยจะมีขั้นตอนคือ หลังจากที่ผ่านมาเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์แล้วจะนำสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางและต่ำที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์มาผ่านเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณรบกวนอย่างขนานเพื่อหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ใ้รายอื่นที่มีอัตราข้อมูลกลางและต่ำ โดยสามารถละเลยสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง จากนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้มาตัดสินบิต รวมทั้งนำไปใช้ในการหักล้างสัญญาณแทรกสอดให้กับสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงต่อไป การหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางและต่ำ แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 การหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางและต่ำ

สำหรับสมการของตัวแปรในรูปที่ 3.9 แสดงดังนี้

$$z_{k,L}(t) = A_{k,L} \operatorname{sgn}(y_{k,L}) s_{k,L}(t) \quad (3-16)$$

$$z_{km,M}(t) = A_{k,M} \operatorname{sgn}(y_{km,M}) s_{km,M}(t) \quad (3-17)$$

โดย  $y_{k,L}$  และ  $y_{km,M}$  คือสัญญาณหลังผ่านแมตริกซ์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางตามลำดับ ดังสมการที่ (3-3) และ (3-4) สำหรับกรณีระบบในหัวข้อที่ 3.1 และดังสมการที่ (3-10) และ (3-11) สำหรับกรณีระบบในหัวข้อที่ 3.2 ส่วน  $s_{k,L}(t)$  และ  $s_{km,M}(t)$  คือรหัสที่ใช้ในการแผ่สำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลาง ตามลำดับ ในกรณีนี้จะใช้ฟังก์ชันซิกนัม (signum function) เป็นฟังก์ชันในการตัดสินใจ (decision function) ที่ใช้ในกระบวนการแผ่กลับ โดยจะใช้สัญลักษณ์เป็น  $\operatorname{sgn}(\cdot)$

เมื่อหักล้างสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อื่นที่มีอัตราข้อมูลต่ำและกลางแล้ว จะได้สัญญาณที่ผ่านการหักล้างสัญญาณแทรกสอดดังกล่าวเป็น

$$\hat{z}_{k,L}(t) = r(t) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{K_L} z_{i,L}(t) - \sum_{i=1}^{K_M} \sum_{j=1}^{M_M} z_{ij,M}(t) \quad (3-18)$$

$$\hat{z}_{km,M}(t) = r(t) - \sum_{i=1}^{K_L} z_{i,L}(t) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{K_M} \sum_{j=1}^{M_M} z_{ij,M}(t) \quad (3-19)$$

โดย  $r(t)$  ได้จากสมการที่ (3-1) สำหรับระบบในหัวข้อที่ 3.1 หรือสมการที่ (3-9) สำหรับระบบในหัวข้อที่ 3.2

ในกรณีที่การหักล้างสัญญาณแทรกสอดมีความถูกต้องจะได้

$$\hat{y}_{k,L} = \int_0^T \hat{z}_{k,L}(t) s_{k,L}(t) dt = A_{k,L} b_{k,L} + MAI_H^a + \tilde{n}_{k,L} \quad (3-20)$$

$$\hat{y}_{km,M} = \int_0^T \hat{z}_{km,M}(t) s_{km,M}(t) dt = A_{km,M} b_{km,M} + MAI_H^a + \tilde{n}_{km,M} \quad (3-21)$$

โดย  $\tilde{n}_{k,L}$  และ  $\tilde{n}_{km,M}$  เป็นสัญญาณรบกวนที่ผ่านแมตริกซ์ฟิลเตอร์แล้ว และ  $MAI_H^a$  คือค่าสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ใช้อื่นที่มีอัตราสูงที่มีต่อสัญญาณที่มีตัวกำกับ  $a$  โดย

$$\text{ระบบในข้อ 3.1 : } MAI_H^a = \sum_{i=1}^{K_H} A_{i,H} b_{iM_H,H} \delta_{ig,H}^a \quad (3-22)$$

$$\text{ระบบในข้อ 3.2 : } MAI_H^a = \sum_{i=1}^{K_H} \sum_{j=1}^q A_{i,H} b_{i[j+M_H/2],H} \delta_{i(jg),H}^a \quad (3-23)$$

โดยที่  $\delta_a^b$  คือ ค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างรหัสที่มีตัวกำกับเป็น a และ b

จากนั้น จะนำสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางที่ได้จากสมการที่ (3-20) และ (3-21) มาเผื่ออีกครั้ง (respread) จะได้สัญญาณที่ผ่านการเผื่อดังกล่าวเป็น

$$\tilde{z}_{k,L}(t) = A_{k,L} \text{sgn}(\hat{y}_{k,L}) s_{k,L}(t) \quad (3-24)$$

$$\tilde{z}_{km,M}(t) = A_{k,M} \text{sgn}(\hat{y}_{km,M}) s_{km,M}(t) \quad (3-25)$$

สัญญาณที่ได้จากสมการที่ (3-24) และ (3-25) จะถูกมองให้เป็นสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ใช้อัตราต่ำและกลาง และจะนำมาหักลบออกจากสัญญาณที่รับได้ ( $r(t)$ ) ได้เป็น

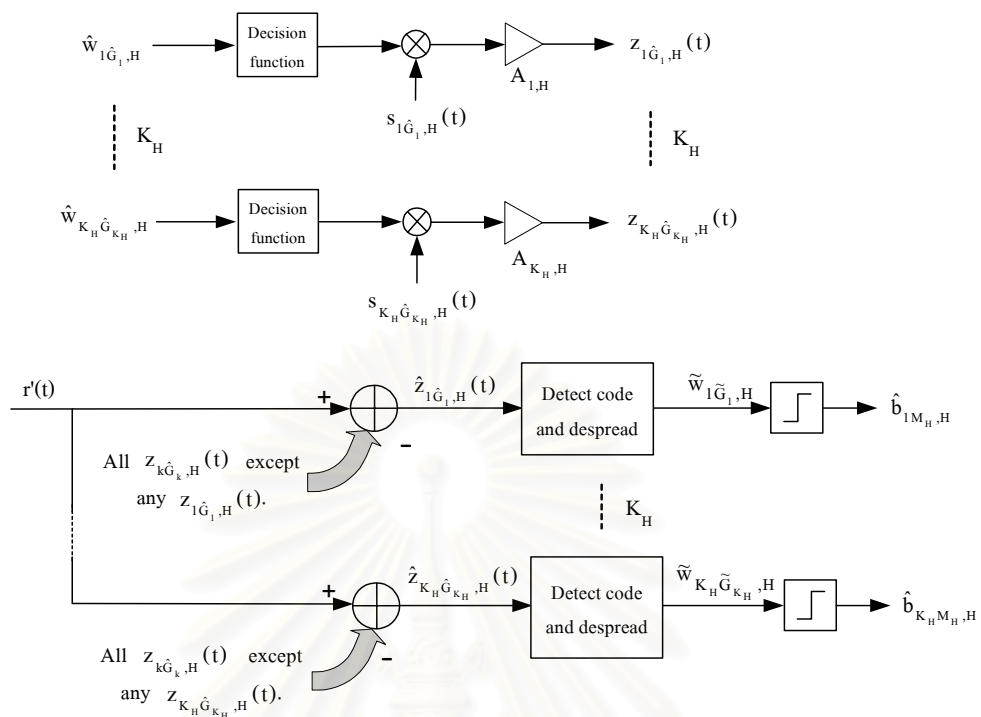
$$r'(t) = r(t) - \tilde{z}_{k,L}(t) - \tilde{z}_{km,M}(t) \quad (3-26)$$

โดย  $r(t)$  ได้จากสมการที่ (3-1) สำหรับระบบในหัวข้อที่ 3.1 หรือสมการที่ (3-9) สำหรับระบบในหัวข้อที่ 3.2

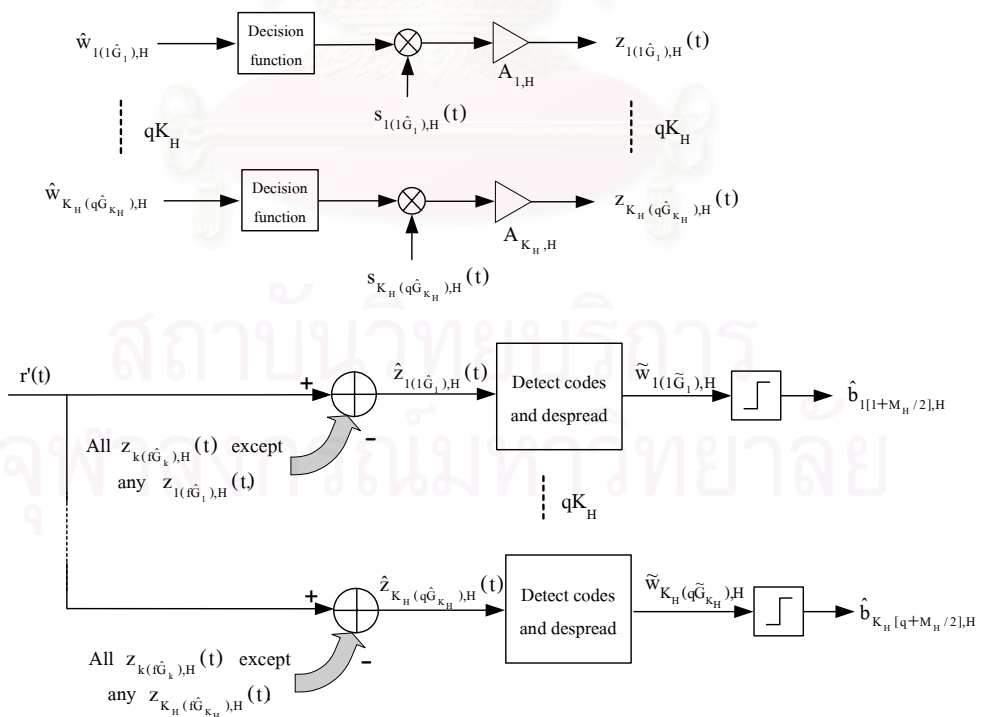
ถ้าการหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ใช้อัตราต่ำและกลางมีความถูกต้องเมื่อนำสัญญาณที่ผ่านการหักล้างสัญญาณแทรกสอดดังกล่าวมาผ่านเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์สำหรับผู้ใช้อัตราสูง จะได้สัญญาณที่ออกจากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์เป็น

$$\begin{aligned} \text{ระบบในข้อ 3.1 : } \hat{w}_{k\hat{G}_k,H} &= \int_0^T r'(t) s_{k\hat{G}_k,H}(t) dt \\ &= A_{k,H} b_{kM_H,H} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{K_H} A_{i,H} b_{iM_H,H} \delta_{ig,H}^{k\hat{G}_k,H} + \tilde{n}_{k\hat{G}_k,H} \end{aligned} \quad (3-27)$$

$$\begin{aligned} \text{ระบบในข้อ 3.2 : } \hat{w}_{k(\hat{G}_k),H} &= \int_0^T r'(t) s_{k(\hat{G}_k),H}(t) dt \\ &= A_{k,H} b_{kM_H,H} + \sum_{\substack{i=1 \\ (i,j) \neq (k,f)}}^{K_H} \sum_{j=1}^q A_{i,H} b_{i[j+M_H/2],H} \delta_{i(jg),H}^{k(\hat{G}_k),H} + \tilde{n}_{k(\hat{G}_k),H} \end{aligned} \quad (3-28)$$



รูปที่ 3.10 การหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง สำหรับระบบในหัวข้อที่ 3.1



รูปที่ 3.11 การหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง สำหรับระบบในหัวข้อที่ 3.2

โดย  $\tilde{n}_{k\hat{G}_k,H}$  และ  $\tilde{n}_{k(f\hat{G}_k),H}$  เป็นสัญญาณรบกวนที่ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์แล้ว และ  $\hat{G}_k$  คือหมายเลขชุดรหัสที่ได้จากการหาสัญญาณที่แมตซ์ได้แรงที่สุดสำหรับผู้ใช้รายที่  $k$  ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง โดยแมตซ์กับสัญญาณ  $r'(t)$  ในสมการที่ (3-26)

จากสมการที่ (3-27) และ (3-28) จะเห็นได้ว่าสัญญาณที่ได้ประกอบด้วยพจน์ของบิตข้อมูลที่ต้องการรวมอยู่กับพจน์ของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงรายอื่น ดังนั้นจึงนำสัญญาณที่ได้มาผ่านเครื่องรับหักล้างสัญญาณแทรกสอดแบบขนานในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงด้วยกัน ดังรูปที่ 3.10 และ 3.11 ซึ่งเป็นของระบบในข้อที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

ในกระบวนการหักล้างสัญญาณรบกวนแบบขนาน จะนำสัญญาณที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์มาผ่านการแก้แ่งอีกครั้งจะได้

$$\text{ระบบในข้อ 3.1 : } z_{k\hat{G}_k,H}(t) = A_{k,H} \text{sgn}(\hat{w}_{k\hat{G}_k,H}) s_{k\hat{G}_k,H}(t) \quad (3-29)$$

$$\text{ระบบในข้อ 3.2 : } z_{k(f\hat{G}_k),H}(t) = A_{k,H} \text{sgn}(\hat{w}_{k(f\hat{G}_k),H}) s_{k(f\hat{G}_k),H}(t) \quad (3-30)$$

เมื่อหักล้างสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้รายอื่นที่มีอัตราข้อมูลสูงแล้ว จะได้สัญญาณที่ผ่านการหักล้างสัญญาณแทรกสอดดังกล่าวเป็น

$$\text{ระบบในข้อ 3.1 : } \hat{z}_{k\hat{G}_k,H}(t) = r'(t) - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{K_H} z_{i\hat{G}_i,H}(t) \quad (3-31)$$

$$\text{ระบบในข้อ 3.2 : } \hat{z}_{k(f\hat{G}_k),H}(t) = r'(t) - \sum_{\substack{i=1 \\ (i,j) \neq (k,f)}}^{K_H} \sum_{j=1}^q z_{i(j\hat{G}_i),H}(t) \quad (3-32)$$

ในกรณีที่มีการหักล้างสัญญาณแทรกสอดมีความถูกต้องจะได้

$$\text{ระบบในข้อ 3.1 : } \tilde{w}_{k\hat{G}_k,H} = \int \hat{z}_{k\hat{G}_k,H}(t) s_{k\hat{G}_k,H}(t) dt = A_{k,H} b_{kM_{H,H}} + \tilde{n}_{k\hat{G}_k,H} \quad (3-33)$$

$$\text{ระบบในข้อ 3.2 : } \tilde{w}_{k(f\hat{G}_k),H} = \int \hat{z}_{k(f\hat{G}_k),H}(t) s_{k(f\hat{G}_k),H}(t) dt = A_{k,H} b_{k[f+M_H/2],H} + \tilde{n}_{k(f\hat{G}_k),H} \quad (3-34)$$

โดย  $\tilde{n}_{k\hat{G}_k,H}$  และ  $\tilde{n}_{k(f\hat{G}_k),H}$  เป็นสัญญาณรบกวนที่ผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์แล้ว และ  $\hat{G}_k$  คือหมายเลขชุดรหัสที่ได้จากการหาสัญญาณที่แมตซ์ได้แรงที่สุดสำหรับผู้ใช้รายที่  $k$  ของผู้ใช้ข้อมูล

อัตราสูง โดยแมตซ์กับสัญญาณที่ผ่านการหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ใช้อัตราสูงตั้งสมการที่ (3-31) หรือ (3-32) แล้ว

เมื่อนำสัญญาณในสมการที่ (3-20), (3-21) และ (3-33) หรือ (3-34) ไปตัดสินบิต จะได้บิตข้อมูลของผู้ใช้อัตราต่ำ กลางและสูง ดังนี้

$$\text{อัตราข้อมูลต่ำ: } \hat{b}_{k,L} = \text{sgn}(\hat{y}_{k,L}) \quad (3-35)$$

$$\text{อัตราข้อมูลกลาง: } \hat{b}_{k,M} = \text{sgn}(\hat{y}_{k,M}) \quad (3-36)$$

$$\text{อัตราข้อมูลสูง ระบบในหัวข้อที่ 3.1: } \hat{b}_{k[M_H],H} = \text{sgn}(\tilde{w}_{k\tilde{G}_k,H}) \quad (3-37)$$

$$\text{อัตราข้อมูลสูง ระบบในหัวข้อที่ 3.2: } \hat{b}_{k[\lceil M_H/2 \rceil],H} = \text{sgn}(\tilde{w}_{k(\lceil \tilde{G}_k \rceil),H}) \quad (3-38)$$

สำหรับบิตข้อมูล  $[b_{k[M_H-1],H}, \dots, b_{k1,H}]$  ของผู้ใช้อัตราสูงของระบบในหัวข้อที่ 3.1 และ บิตข้อมูล  $[b_{k[M_H/2],H}, \dots, b_{k1,H}]$  ของผู้ใช้อัตราสูงของระบบในหัวข้อที่ 3.2 หาได้ดังนี้

$$\text{ระบบในหัวข้อที่ 3.1: } [b_{k[M_H-1],H}, \dots, b_{k1,H}] = \text{bin}(\tilde{G}_k) \quad (3-39)$$

$$\text{ระบบในหัวข้อที่ 3.2: } [b_{k[M_H/2],H}, \dots, b_{k1,H}] = \text{bin}(\tilde{G}_k) \quad (3-40)$$



## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

ในบทนี้จะเป็นส่วนของผลการวิจัย รวมทั้งการวิจารณ์ผลที่ได้ โดยผลการวิจัยจะได้รับการจำลองระบบเพื่อหาสมรรถนะของระบบในรูปแบบของอัตราความผิดพลาดบิต ในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาระบบสามอัตราเป็นหลัก โดยจะทำการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบและเครื่องรับที่เสนอซึ่งกล่าวไว้ในบทที่ 3 กับระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสในผู้ใช้ทุกรายที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 โดยในรูปกราฟผลการทดสอบในบทนี้จะใช้ตัวย่อของระบบและเครื่องรับดังนี้

- ระบบ

- ระบบที่เสนอ

- ระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางและต่ำ และใช้แบบแผนไบออร์ทอคอนอลที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ใช้ตัวย่อว่า “Bio”
- ระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางและต่ำ และใช้แบบแผนไบออร์ทอคอนอลแบบหลายรหัสที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ใช้ตัวย่อว่า “BioMC”

- ระบบเดิม

- ระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง กลางและต่ำ ใช้ตัวย่อว่า “MC”

- เครื่องรับ

- เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์จะใช้ตัวย่อว่า “MF” ใช้ทั้งในระบบ Bio, BioMC และ MC
- เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณรบกวนอย่างขนาน ใช้ตัวย่อว่า “PIC” ใช้ในระบบ MC
- เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณรบกวนอย่างขนานเป็นกลุ่มที่หักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางก่อน แล้วจึงป้อนกลับเพื่อหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ใช้ตัวย่อว่า “IC” ใช้ในระบบ Bio และ BioMC

เนื่องจากเครื่องรับที่ใช้เป็นแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอด ซึ่งจำเป็นต้องใช้ความรู้เกี่ยวกับขนาดของสัญญาณที่ภาครับในกระบวนการทำงานด้วย อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ต้องการพิจารณาผลของการใช้ระบบที่เสนอที่มีต่อค่า BER เท่านั้น ดังนั้นจึงตั้งสมมติฐานว่าภาครับสามารถประมาณขนาดของสัญญาณได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

ในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 7 หัวข้อใหญ่ หัวข้อแรกจะกล่าวถึงวิธีการจำลองระบบ รวมทั้งพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองระบบ หัวข้อที่สองแสดงอัตราความผิดพลาดบิต เมื่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน เปลี่ยนไป หัวข้อที่สามจะกล่าวถึงระบบที่มีการควบคุมกำลังแบบไม่สมบูรณ์และความต้านทานต่อปรากฏการณ์ใกล้-ไกล หัวข้อที่สี่แสดงผลของช่องสัญญาณแบบเฟดดิ้งที่มีต่อระบบ จากนั้นจะกล่าวถึงผลของสภาวะการส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสในหัวข้อที่ห้า หัวข้อที่หกจะแสดงความจุของระบบ หรืออัตราความผิดพลาดบิต เมื่อจำนวนผู้ใช้เพิ่มขึ้น และหัวข้อสุดท้ายจะเป็นการสรุปผลโดยรวม

## 4.1 วิธีการจำลองระบบ

### 4.1.1 รหัสแผลที่ใช้

สำหรับรหัสแผลที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นรหัสที่ได้จากการคูณแบบซิฟต่อซิฟระหว่างรหัสที่ใช้จำแนกผู้ใช้ และรหัสตั้งฉากที่ใช้ในการจำแนกรหัสย่อยในผู้ใช้แต่ละราย โดยรหัสที่ใช้จำแนกผู้ใช้ในที่นี้จะใช้รหัสแบบสุ่มเป็นหลัก ทั้งนี้เนื่องจากรหัสที่มีคุณสมบัติด้านสหสัมพันธ์ข้ามที่ดีมักจะมีจำนวนรหัสในชุดจำกัด เช่น รหัสโกลด์ มีจำนวนรหัสเท่ากับจำนวนซิฟในรหัส แตรหัสแบบสุ่มซึ่งเป็นรหัสที่มีคุณสมบัติด้านสหสัมพันธ์ข้ามที่ไม่ดีนัก มีจำนวนรหัสในชุดมากกว่ารหัสชนิดอื่นมาก ทำให้มีความสามารถในการรองรับผู้ใช้ที่มีจำนวนมากขึ้นในอนาคต

ในการจำลองระบบ รหัสแผลจะถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานตามอัตราบิตของผู้ใช้แต่ละราย โดยจะทำการหารรหัสแผลด้วยรากที่สองของอัตราส่วนแผล หรือในกรณีรหัสสั้นคือการหารด้วยรากที่สองของความยาวรหัสนั่นเอง การทำให้เป็นบรรทัดฐานนั้นทำเพื่อให้กำลังของสัญญาณเมื่อผ่านการรวมกลับแล้วมีค่าเป็น 1 (เมื่อส่งสัญญาณขนาด 1 หน่วย) ซึ่งถือเป็นกำลังของบิตข้อมูล 1 บิต ทำให้การหาค่ากำลังสัญญาณต่อกำลังสัญญาณรบกวนมีความสะดวกและถูกต้อง

สำหรับความยาวรหัสแผล จะใช้ความยาว 64 ซิฟตลอดการวิจัย [41]

#### 4.1.2 สัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณ

ในการจำลองระบบ จะต้องมี การส่งสัญญาณข้อมูลผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวน โดยช่องสัญญาณที่ใช้นี้จะใช้ช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN ที่มีค่าเฉลี่ยขนาดสัญญาณเป็น 0 และมีค่าความแปรปรวนเปลี่ยนแปลงตามกำลังสัญญาณรบกวนที่ใช้นี้ในหัวข้อการวิจัยนั้นๆ ช่องสัญญาณลักษณะดังกล่าวถูกใช้ตลอดการวิจัย

#### 4.1.3 จำนวนผู้ใช้ในระบบ อัตราข้อมูล จำนวนบิตข้อมูลที่ใช้ในการจำลองระบบ

ระบบส่วนใหญ่ที่ใช้ในการจำลอง (หัวข้อที่ 4.2 - 4.5) จะมีผู้ใช้งานทั้งหมด 12 ราย ประกอบไปด้วยผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ 5 ราย ผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง 4 ราย และผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง 3 ราย ซึ่งการกำหนดจำนวนผู้ใช้ในลักษณะนี้สอดคล้องกับระบบทั่วไปที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงๆ มักจะมีจำนวนน้อยกว่าผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำๆ [41] ส่วนอัตราข้อมูลที่ใช้จะกำหนดให้อัตราข้อมูลกลางมากกว่าอัตราข้อมูลต่ำ 2 เท่า และอัตราข้อมูลสูงจะมากกว่าอัตราข้อมูลต่ำ 4 เท่า [30,32] ตลอดการวิจัย

สำหรับจำนวนบิตข้อมูล จะทำการจำลองบิตข้อมูลอัตราต่ำ 5,000 บิต นั่นก็จะต้องทำการจำลองบิตข้อมูลอัตรากลาง 10,000 บิต (2x5,000) และบิตข้อมูลอัตราสูง 20,000 บิต (4x5,000) ไปพร้อมๆ กัน ตารางที่ 4.1 แสดงจำนวนผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลต่างๆ ที่ใช้ในหัวข้อที่ 4.2 - 4.5 และจำนวนบิตข้อมูลสำหรับผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลต่างๆ

ตารางที่ 4.1 จำนวนผู้ใช้ที่ใช้ในหัวข้อที่ 4.2 – 4.5 และจำนวนบิตข้อมูลที่ใช้ในทุกหัวข้อการวิจัย

อัตราข้อมูล	จำนวนผู้ใช้ในหัวข้อที่ 4.2-4.5	จำนวนบิตข้อมูล (บิต)
อัตราข้อมูลต่ำ (R*)	5	5,000
อัตราข้อมูลกลาง (2R)	4	10,000
อัตราข้อมูลสูง (4R)	3	20,000

\* R คือ อัตราข้อมูลพื้นฐาน

#### 4.1.4 ค่าตัวแปรของตัวขยายสัญญาณที่ใช้

ในที่นี้จะพิจารณาค่าตัวแปรของตัวขยายสัญญาณ 2 ตัวแปร คือ ค่าความเป็นเชิงเส้นของตัวขยายสัญญาณ ( $p$ ) และค่าสัญญาณออกสูงที่สุดของตัวขยาย ( $A_0$ ) ดังที่ได้กล่าวมาแล้วตามรูปที่ 2.7 โดยค่าของตัวแปรทั้งสองที่ใช้ในการจำลองระบบในที่นี้ คือ

- **ค่าความเป็นเชิงเส้นของตัวขยายสัญญาณ ( $p$ )** : ใช้ค่า  $p = 2$  ตลอดการวิจัย เนื่องจากค่าความเป็นเชิงเส้นดังกล่าว ทำให้ได้ความโค้งของลักษณะสมบัติของตัวขยายสัญญาณที่ใกล้เคียงกับลักษณะสมบัติของตัวขยายสัญญาณที่ใช้จริงในทางปฏิบัติ [52]
- **ค่ากำลังออกสูงที่สุดของตัวขยาย ( $A_0$ )** : โดยปกติจะมีค่ามากกว่ากำลังสูงที่สุดของสัญญาณออกจริงอยู่เล็กน้อย [52,53] แต่เนื่องจากข้อจำกัดของตัวขยายสัญญาณที่ใช้ในระบบที่ต้องใช้กำลังที่สูงเช่นแบบแผนหลายรหัส ในวิทยานิพนธ์นี้จึงพิจารณาระบบที่มีลักษณะการใช้ตัวขยายสัญญาณ 2 ลักษณะ คือระบบที่สามารถใช้ตัวขยายที่มีค่ากำลังสูงที่สุดได้มากตามกำลังสูงที่สุดจริงของผู้ใช้ทุกๆ ราย และระบบที่จำกัดค่ากำลังสูงที่สุดของตัวขยายสัญญาณไว้ที่ค่าไม่สูงมากนัก โดยมีรายละเอียดดังนี้

**ระบบ A** : ตัวขยายที่มีค่ากำลังสูงที่สุดได้มากตามกำลังสูงที่สุดจริงของผู้ใช้ทุกๆ ราย โดยเมื่อให้สัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำก่อนผ่านตัวขยายสัญญาณมีขนาด  $X$  หน่วย จะใช้ค่ากำลังสูงที่สุดของตัวขยาย ( $A_0$ ) ดังนี้

- สัญญาณ  $X$  หน่วย ได้แก่สัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำที่ใช้แบบแผนหลายรหัส และสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอล : ใช้ค่า  $A_0 = (1.5X)^2$
- สัญญาณ  $2X$  หน่วย ได้แก่สัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางที่ใช้แบบแผนหลายรหัส และสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัส : ใช้ค่า  $A_0 = (2.5X)^2$
- สัญญาณ  $4X$  หน่วย ได้แก่สัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้แบบแผนหลายรหัส : ใช้ค่า  $A_0 = (4.5X)^2$

อนึ่ง ค่ากำลังออกสูงที่สุดของตัวขยาย ( $A_0$ ) ให้มีค่ามากกว่าค่ากำลังสูงที่สุดของผู้ใช้เล็กน้อย ส่วนอัตราส่วนระหว่างค่ากำลังออกสูงที่สุดของตัวขยาย ( $A_0$ ) ต่อค่ากำลังของสัญญาณรวมในผู้ใช้นั้น ในที่นี้จะให้มีค่าลดลงเมื่อค่าขนาดสัญญาณรวมดัง

กล่าวมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากการสร้างตัวขยายที่มีค่ากำลังสูงที่สุดสูงขึ้นไปมากมีความยากลำบากและต้องใช้ค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นมาก

**ระบบ B :** ระบบที่จำกัดค่ากำลังสูงที่สุดของตัวขยายสัญญาณไว้ที่ค่าไม่สูงมากนัก ทั้งนี้เนื่องจากเมื่ออัตราขยายมากขึ้นมากๆ ตัวขยายที่มีค่ากำลังสูงที่สุดเพิ่มขึ้นมากๆ จะสร้างได้ยากในทางปฏิบัติ ดังนั้นจึงอาจต้องจำกัดค่ากำลังสูงที่สุดของตัวขยายไว้ที่ค่าหนึ่งๆ โดยในที่นี้จะให้ค่ากำลังสูงที่สุดของตัวขยายสัญญาณทั้งระบบ จำกัดไว้ที่ค่ากำลังสูงที่สุดของตัวขยายสัญญาณที่ใช้ในผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางในระบบ ดังนั้นเมื่อให้สัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำก่อนผ่านตัวขยายสัญญาณมีขนาด  $X$  หน่วย จะให้ค่ากำลังสูงที่สุดของตัวขยาย ( $A_0$ ) เป็นดังนี้

- สัญญาณ  $X$  หน่วย ได้แก่สัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำที่ใช้แบบแผนหลายรหัส และสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอล : ใช้ค่า  $A_0 = (1.5X)^2$
- สัญญาณ  $2X$  หน่วย ได้แก่สัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางที่ใช้แบบแผนหลายรหัส และสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัส : ใช้ค่า  $A_0 = (2.5X)^2$
- สัญญาณ  $4X$  หน่วย ได้แก่สัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้แบบแผนหลายรหัส : ใช้ค่า  $A_0 = (2.5X)^2$

สัญญาณออกสูงที่สุดของตัวขยายสัญญาณของระบบทั้งสองแสดงดังตารางที่ 4.2

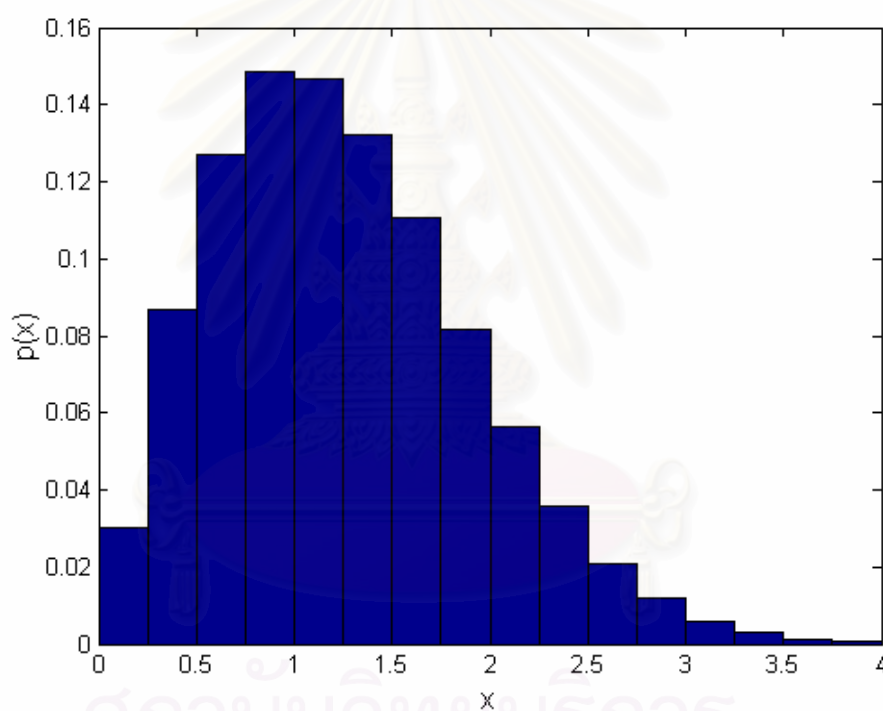
ตารางที่ 4.2 กำลังสูงที่สุดของตัวขยายสัญญาณที่ใช้ในระบบ A และระบบ B

ขนาดสัญญาณ*	กำลังสูงที่สุดของตัวขยายสัญญาณ ( $A_0$ )	
	ระบบ A	ระบบ B
X	$(1.5X)^2$	$(1.5X)^2$
2X	$(2.5X)^2$	$(2.5X)^2$
4X	$(4.5X)^2$	$(2.5X)^2$

\* กำหนดให้สัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำก่อนผ่านตัวขยายสัญญาณมีขนาด  $X$  หน่วย

#### 4.1.5 เฟดดิ้ง

เฟดดิ้งจะถูกนำมาพิจารณาในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 โดยเฟดดิ้งที่ใช้จะเป็นเฟดดิ้งที่มีผลกระทบต่อขนาด (amplitude) ของรูปคลื่นสัญญาณเพียงอย่างเดียว และไม่มีผลต่อเฟส (phase) ของรูปคลื่น โดยการแจกแจงเฟดดิ้งที่ใช้จะเป็นแบบเรย์ลี (Rayleigh) นอกจากนี้เฟดดิ้งที่ใช้จะมีลักษณะที่ไม่มีสหสัมพันธ์ (uncorrelated) ทั้งในทางเวลา และระหว่างส่วนประกอบจริง (real part) และส่วนประกอบเสมือน (imaginary part)



รูปที่ 4.1 การแจกแจงของสัมประสิทธิ์การลดทอนขนาดสัญญาณแบบเรย์ลีที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับการจำลองเฟดดิ้งแบบเรย์ลีนั้น จะทำการจำลองสัญญาณส่วนประกอบจริงและเสมือนที่มีการกระจายแบบเกาส์เซียน จากนั้นนำส่วนประกอบทั้งสองมารวมกัน แล้วจึงพิจารณาขนาดของสัญญาณที่ได้จากการรวมดังกล่าว โดยการแจกแจงของสัมประสิทธิ์การลดทอนขนาดสัญญาณ ( $x$ ) ที่ได้จะเป็นแบบเรย์ลี ดังตัวอย่างในรูปที่ 4.1



## 4.2 อัตราความผิดพลาดบิตเมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาอัตราความผิดพลาดบิตเมื่อทำการเปลี่ยนค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ซึ่งถือเป็นผลการวิจัยทั่วไปที่นำมาใช้ในการเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ โดยผลการวิจัยในหัวข้อนี้จะยังไม่พิจารณาถึงผลของเฟดดิ้ง และการส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส นอกจากนี้จะให้มีการควบคุมกำลังอย่างสมบูรณ์ นั่นคือสัญญาณของผู้ใช้ทุกรายที่ภาครับมีขนาดเท่ากัน สำหรับผลของตัวขยายสัญญาณที่ภาคส่ง จะพิจารณาด้วยขยายที่มีลักษณะทั้งระบบ A และระบบ B ดังตารางที่ 4.2 และจะใช้จำนวนผู้ใช้ อัตราข้อมูล ตลอดจนจำนวนบิตข้อมูล ดังตารางที่ 4.1

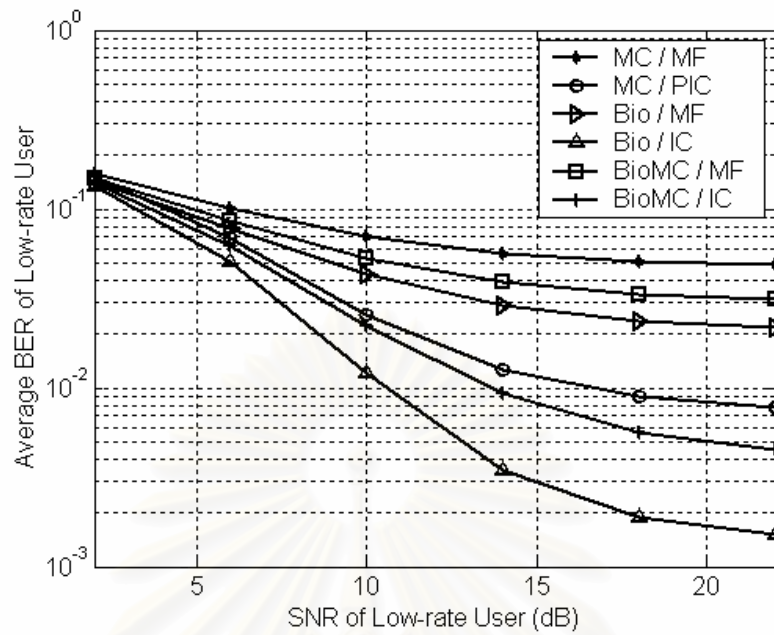
ผลการวิจัยของระบบ A และระบบ B เป็นดังนี้

- ระบบ A : กำลังสูงสุดของตัวขยายมีค่ามากเพียงพอกับกำลังสัญญาณของผู้ใช้แต่ละราย

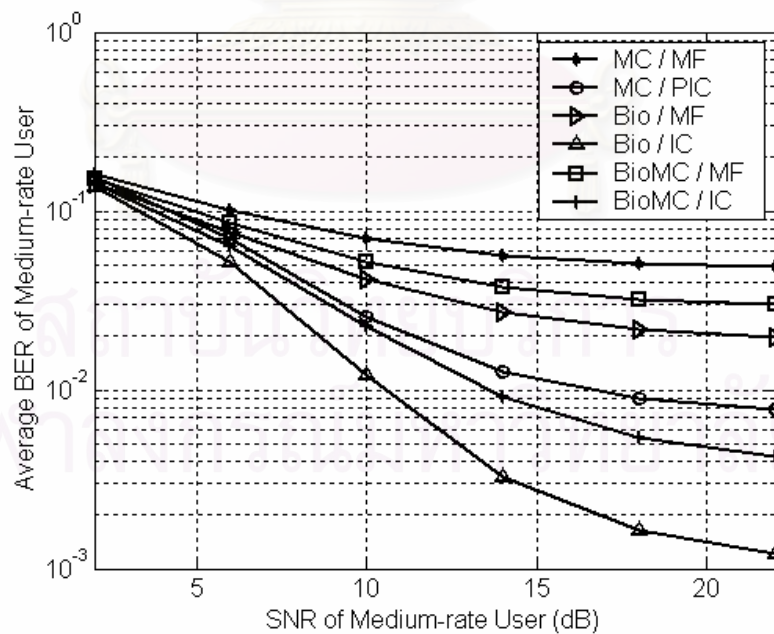
รูปที่ 4.2 4.3 และ 4.4 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ โดยจะใช้ตัวขยายที่มีค่ากำลังสูงสุดมากพอ (ระบบ A ในตารางที่ 4.2) ทั้งนี้ อัตราความผิดพลาดบิตจะได้รับการเฉลี่ยผลการทดสอบเป็นจำนวน 50 ครั้ง พบว่าเมื่อพิจารณากรณีที่ใช้เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ (MF) ระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลที่ใช้ข้อมูลอัตราสูง (Bio) และระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสที่ใช้ข้อมูลอัตราสูง (BioMC) จะให้ค่าความผิดพลาดบิตที่สูงกว่าระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (รูปที่ 4.4) แต่จะให้ค่าความผิดพลาดบิตต่ำกว่าระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ในผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลาง (รูปที่ 4.2 และ 4.3) ทั้งนี้เป็นเพราะในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอล รวมทั้งแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสนั้นไม่ทนทานต่อสัญญาณรบกวนเท่าผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้แบบแผนหลายรหัส ทำให้สมรรถนะเมื่อใช้เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้อัตราข้อมูลสูงดีกว่าในกรณีที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด ในขณะที่เดียวกันสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอล และสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสส่งผลแทรกสอดผู้ใช้อัตราข้อมูลต่ำและกลางน้อยกว่าการแทรกสอดที่เกิดจากผู้ใช้อัตราข้อมูลสูงที่ใช้แบบแผนหลายรหัส จึงทำให้ค่าความผิดพลาดบิตเมื่อใช้เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ในผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางของระบบที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลหรือแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสดีกว่าในกรณีที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด

เมื่อพิจารณากรณีที่ผู้ใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอด (PIC และ IC) จะเห็นได้ว่าการใช้การหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานเป็นกลุ่มซึ่งจะหักล้างสัญญาณแทรกสอดในกลุ่มผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางก่อน (IC) ในระบบที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอล (Bio) และระบบที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัส (BioMC) จะให้อัตราความผิดพลาดบิตในผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางที่ดีกว่าการใช้เครื่องรับหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน (PIC) ที่ใช้กับระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ทั้งนี้ถึงแม้ว่าการหักล้างเป็นกลุ่มลักษณะดังกล่าวจะละเลยการหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง แต่เนื่องจากการแทรกสอดที่เกิดขึ้นจากผู้ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลและแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสมีค่าน้อย รวมทั้งความเชื่อถือได้ของข้อมูลผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางที่ได้จากเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ จึงทำให้ค่าความผิดพลาดบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางและต่ำของระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลหรือแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงและใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานเป็นกลุ่ม (Bio/IC และ BioMC/IC) ดีกว่าระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมดและใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน (MC/PIC) (รูปที่ 4.2 และ 4.3) สำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (รูปที่ 4.4) พบว่าระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (BioMC) จะเริ่มมีค่าความผิดพลาดบิตที่ดีกว่าระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ที่ค่า SNR 11.5 dB ขึ้นไป ในขณะที่ระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (Bio) จะเริ่มมีค่าความผิดพลาดบิตที่ดีกว่าระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ที่ค่า SNR 13.5 dB ขึ้นไป และดีกว่าระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (BioMC) ที่ค่า SNR 15 dB ขึ้นไป โดยแนวโน้มของสมรรถนะที่ดีกว่านี้ สืบเนื่องมาจากความเชื่อถือได้ที่สูง (ความผิดพลาดบิตต่ำ) ของ ข้อมูลผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางที่ได้จากเครื่องรับหักล้างสัญญาณรบกวนเป็นกลุ่มที่นำมาป้อนกลับให้ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง โดยเฉพาะที่ค่า SNR สูงๆ ซึ่งสัญญาณรบกวนที่ต่ำ ทำให้ความแตกต่างระหว่างเส้นกราฟมีความชัดเจนมากกว่าที่ค่า SNR ต่ำๆ

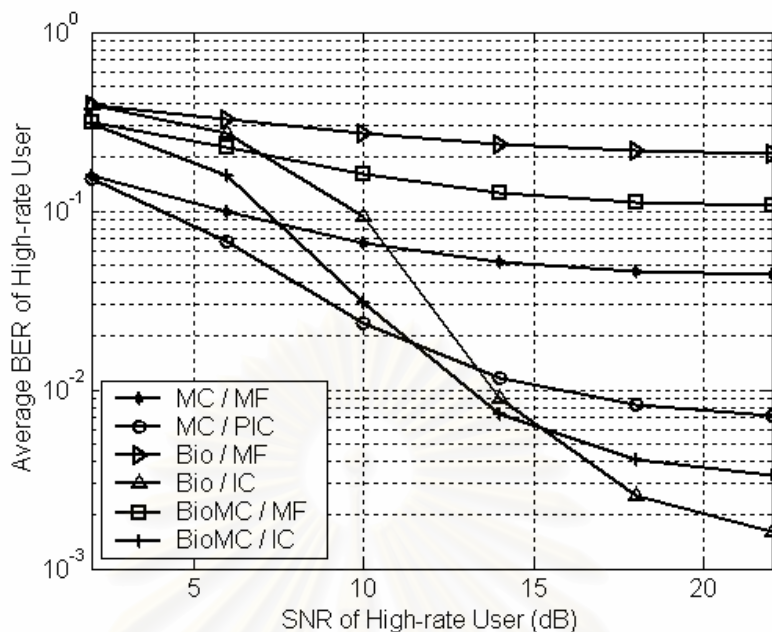
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ  
ของระบบที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A)



รูปที่ 4.3 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง  
ของระบบที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A)



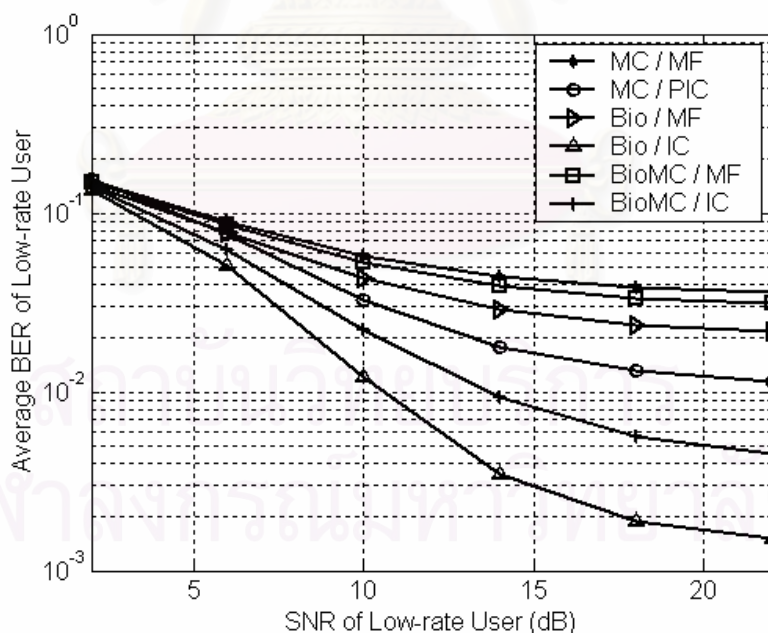
รูปที่ 4.4 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง  
ของระบบที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A)

- ระบบ B : กำลังสูงที่สุดของตัวขยายถูกจำกัดไว้ที่กำลังสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง

รูปที่ 4.5 4.6 และ 4.7 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ โดยจะใช้ตัวขยายที่มีกำลังออกสูงที่สุดจำกัดไว้ที่กำลังออกสูงที่สุดของตัวขยายสำหรับผู้ใช้อัตรากลาง (ระบบ B ในตารางที่ 4.2) ทั้งนี้อัตราความผิดพลาดบิตจะได้รับการเฉลี่ยผลการทดลองเป็นจำนวน 50 ครั้ง

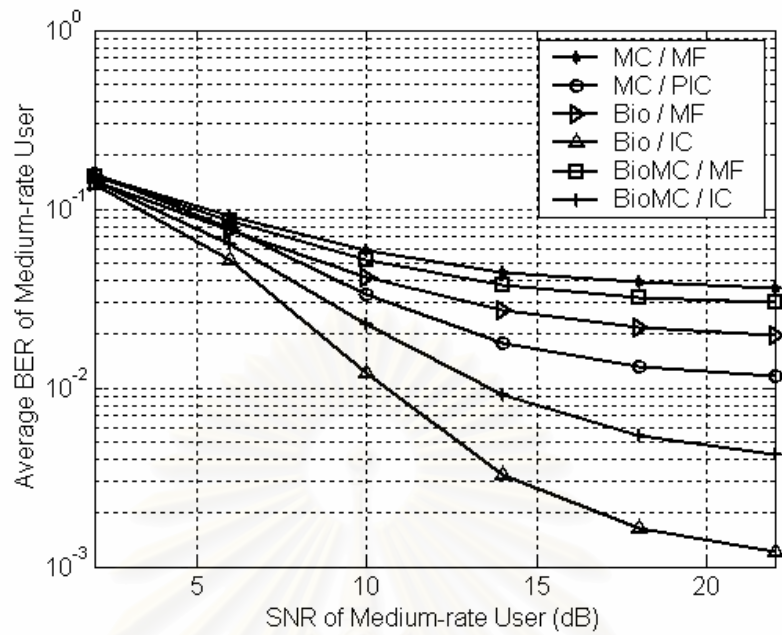
เมื่อพิจารณาเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์จะเห็นได้ว่าตัวขยายที่มีกำลังออกสูงที่สุดจำกัดจะทำให้ผู้ใช้อัตราข้อมูลสูงที่ใช้แบบแผนหลายรหัส (MC) มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.7) เนื่องจากเกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณรวมทั้งการลดทอนกำลังสัญญาณเมื่อผ่านตัวขยายสัญญาณดังกล่าว แต่เมื่อพิจารณาที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลาง (รูปที่ 4.5 และ 4.6) พบว่าความผิดพลาดบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางมีค่าใกล้เคียงกับระบบที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงใช้แบบแผนไบออร์ทอคอนอลแบบหลายรหัส (BioMC) มากขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ถูกจำกัดโดยตัวขยายสัญญาณจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้อื่นๆ ในระบบน้อยลง ทำให้ความผิดพลาดที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางมีค่าต่ำลง

เมื่อพิจารณาเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอด พบว่าความเชื่อถือได้ที่เลวลง (ความผิดพลาดบิตเพิ่มขึ้น) ในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงของระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) จะทำให้สมรรถนะของเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน (PIC) ที่ใช้ในระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมดมีค่าต่ำลงในผู้ใช้ทุกราย โดยเมื่อพิจารณารูปที่ 4.5 และ 4.6 พบว่าผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางของระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตน้อยกว่าค่าดังกล่าวของระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลกับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (Bio) และระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสกับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (BioMC) อย่างชัดเจน ในขณะที่รูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าอัตราความผิดพลาดบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอล (Bio) และผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัส (BioMC) จะเริ่มดีกว่าระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ด้วยค่า SNR ที่ต่ำกว่าในกรณีที่ผู้ใช้ตัวขยายที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A) โดยค่า BER ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัส (BioMC) จะเริ่มดีกว่าระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ที่ SNR 7 dB ขึ้นไป และค่า BER ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอล (Bio) จะเริ่มดีกว่าระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ที่ SNR 11 dB ขึ้นไป

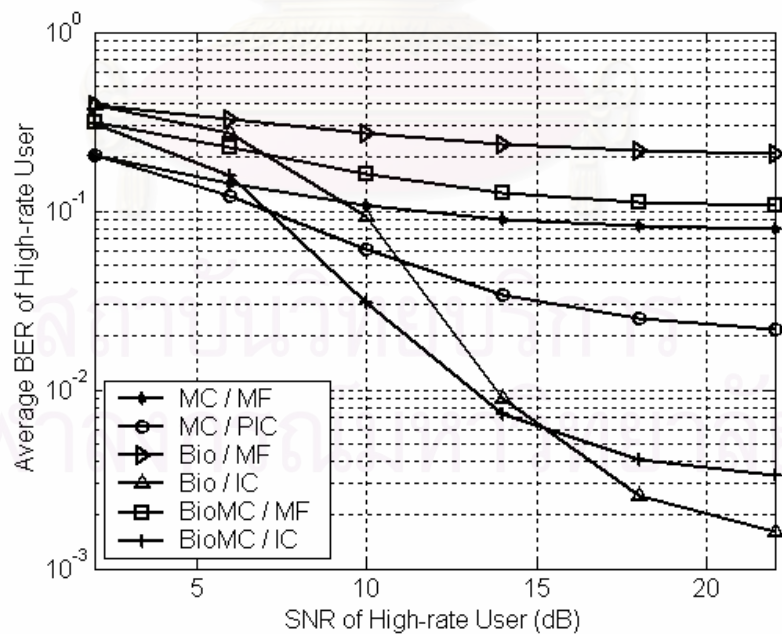


รูปที่ 4.5 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ ของระบบที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงที่สุดของผู้ใช้อัตรากลาง (ระบบ B)





รูปที่ 4.6 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง ของระบบ  
ที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงสุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงสุดของผู้ใช้อัตรากลาง (ระบบ B)



รูปที่ 4.7 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ของระบบ  
ที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงสุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงสุดของผู้ใช้อัตรากลาง (ระบบ B)



### 4.3 ผลของขนาดสัญญาณที่มาถึงภาครับไม่เท่ากัน

การวิจัยในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าอัตราผิดพลาดบิตในระบบที่สัญญาณของผู้ใช้แต่ละรายที่ภาครับมีขนาดไม่เท่ากัน ซึ่งเป็นผลจากการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์ ทั้งนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะทำการเปรียบเทียบค่าอัตราผิดพลาดบิตเมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนในระบบที่มีการควบคุมกำลังแบบไม่สมบูรณ์ และส่วนที่สองจะพิจารณาความต้านทานต่อปรากฏการณ์ใกล้-ไกล ในส่วนของจำนวนผู้ใช้ อัตราข้อมูล และจำนวนบิตข้อมูลในหัวข้อนี้ จะใช้ค่าดังตารางที่ 4.1 โดยอิทธิพลของเฟดดิ้งและการส่งแบบอะซิงโครนัสจะยังไม่นำมาพิจารณาในส่วนนี้ สำหรับอิทธิพลของตัวขยายสัญญาณจะใช้ค่ากำลังสูงที่สุดของตัวขยายเป็นดังระบบ A (ตารางที่ 4.2) ในผู้ใช้ทั่วไป และจะละเลยผลของตัวขยายสัญญาณในผู้ใช้ที่ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดสัญญาณ

#### 4.3.1 ค่า BER ที่ SNR ต่างๆ ของระบบที่มีการควบคุมกำลังแบบไม่สมบูรณ์

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาผลของการควบคุมกำลังที่ไม่สมบูรณ์ โดยจะพิจารณาผลในรูปของค่าความผิดพลาดบิตของผู้ใช้ที่ได้รับผลของสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้ที่มีขนาดสัญญาณใหญ่กว่า เปรียบเทียบที่ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้รายนั้น ทั้งนี้จะให้ผู้ใช้ข้อมูลอัตราหนึ่งมีขนาดสัญญาณใหญ่กว่าผู้ใช้ข้อมูลอัตราอื่นอยู่ 5 dB นั่นคือ ถ้าขนาดสัญญาณผู้ใช้ทั่วไปมีค่าเป็น 1 หน่วย สัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราดังกล่าวจะมีขนาดเท่ากับ  $\sqrt{10^{(5/10)}} = 1.78$  หน่วย โดยในรูปที่ 4.8 และ 4.9 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางและสูง ตามลำดับ เมื่อสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำมีขนาดใหญ่กว่าอยู่ 5 dB ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 4.10 และ 4.11 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและสูง ตามลำดับ เมื่อสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางมีขนาดใหญ่กว่าอยู่ 5 dB และรูปที่ 4.12 และ 4.13 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางและสูง ตามลำดับ เมื่อสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงมีขนาดใหญ่กว่าอยู่ 5 dB ค่าอัตราความผิดพลาดบิตจะเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดสอบเป็นจำนวน 50 ครั้ง

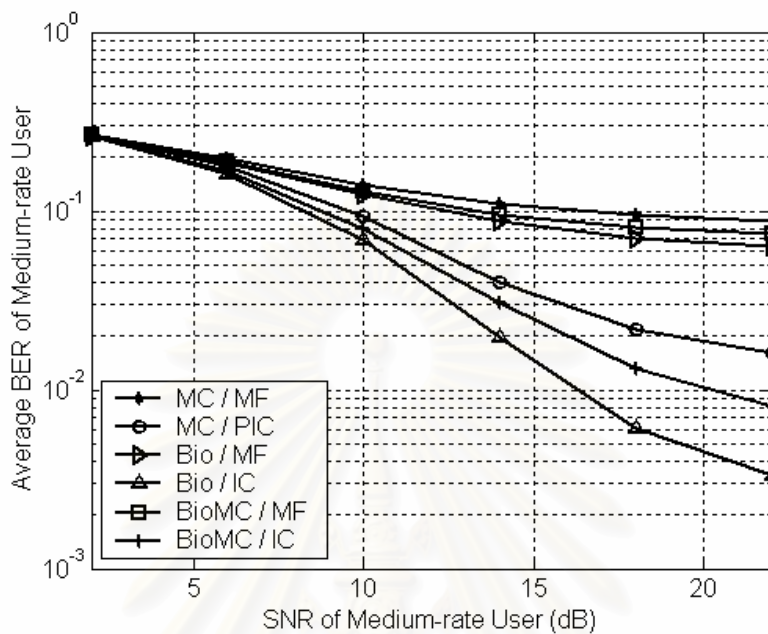
เมื่อพิจารณาอิทธิพลของขนาดสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ (รูปที่ 4.8 และ 4.9) พบว่าสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำที่ใหญ่ขึ้นจะส่งผลเสียต่อผู้ใช้รายอื่นของระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอคอนอลในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (Bio) และระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอคอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (BioMC) ในระดับที่ใกล้เคียงกัน

โดยแนวโน้มของค่าความผิดพลาดบิตของระบบทั้งสามจะเพิ่มขึ้นจากกรณีควบคุมกำลังแบบ สมบูรณ์ (รูปที่ 4.3 และ 4.4) ในระดับใกล้เคียงกัน

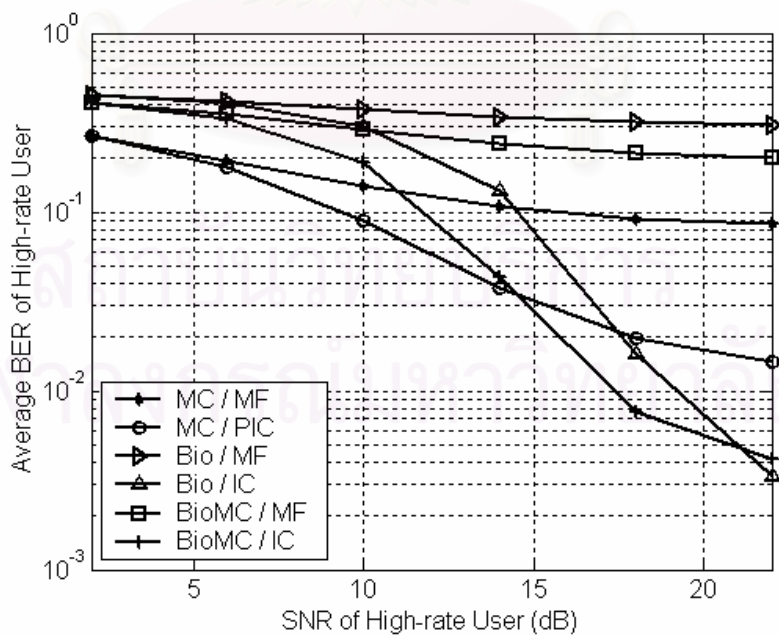
สำหรับอิทธิพลของขนาดสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางที่ใหญ่กว่าขนาดสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราอื่น (รูปที่ 4.10 และ 4.11) พบว่าจะส่งผลกระทบต่อระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ในระดับหนึ่ง แต่จะส่งผลกระทบต่อระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (BioMC) ด้วยเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณรบกวนอย่างขนานเป็นกลุ่ม (IC) และระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (Bio) ด้วยเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานเป็นกลุ่ม (IC) ในระดับที่น้อยมาก ทั้งนี้เป็นเพราะสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ใช้อัตรากลาง เป็นสัญญาณแทรกสอดหลักในระบบทั้งสอง ทำให้เมื่อความเชื่อถือได้จากผู้ใช้อัตรากลางเพิ่มขึ้นจากขนาดที่ใหญ่ขึ้น การหักล้างสัญญาณแทรกสอดในระบบทั้งสองจึงแม่นยำขึ้น ดังนั้นอัตราความผิดพลาดบิตของผู้ใช้รายอื่นผ่านเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดแล้วจึงไม่เพิ่มขึ้น ถึงแม้ขนาดสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อัตรากลางจะเพิ่มขึ้นก็ตาม

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของขนาดสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (รูปที่ 4.12 และ 4.13) พบว่าสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใหญ่ขึ้นจะส่งผลกระทบต่อระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (BioMC) ด้วยเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานเป็นกลุ่ม (IC) และต่อระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (Bio) ด้วยเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานเป็นกลุ่ม (IC) ในระดับที่ค่อนข้างมาก ทั้งนี้เนื่องจากการหักล้างด้วยเครื่องรับดังกล่าวไม่พิจารณาผลของสัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงในขั้นแรก เมื่อสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงทำให้สมรรถนะด้อยลงอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสองระบบที่ใช้เครื่องรับลักษณะดังกล่าว พบว่าต่อระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (BioMC) จะมีสมรรถนะที่ด้อยลงมากกว่า เนื่องจากสัญญาณของผู้ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสจะประกอบไปด้วยสัญญาณย่อยที่มากกว่าหนึ่งสัญญาณรวมกัน ดังนั้นเมื่อสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงทำให้สัญญาณแทรกสอดที่ไม่ถูกหักล้างมีค่าเพิ่มขึ้นเร็วกว่าในระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่สัญญาณปราศจากการรวมสัญญาณย่อย (หรือกล่าวได้ว่ามีสัญญาณย่อยเพียงหนึ่งสัญญาณในผู้ใช้แต่ละราย) นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ที่ใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณรบกวนอย่างขนาน (PIC) มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ดีขึ้น เนื่องจากในระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมดนั้นสัญญาณแทรกสอดส่วนใหญ่ในระบบจะเกิดจากผู้ใช้อัตราสูง ดังนั้นเมื่อข้อมูลผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงมีความเชื่อ

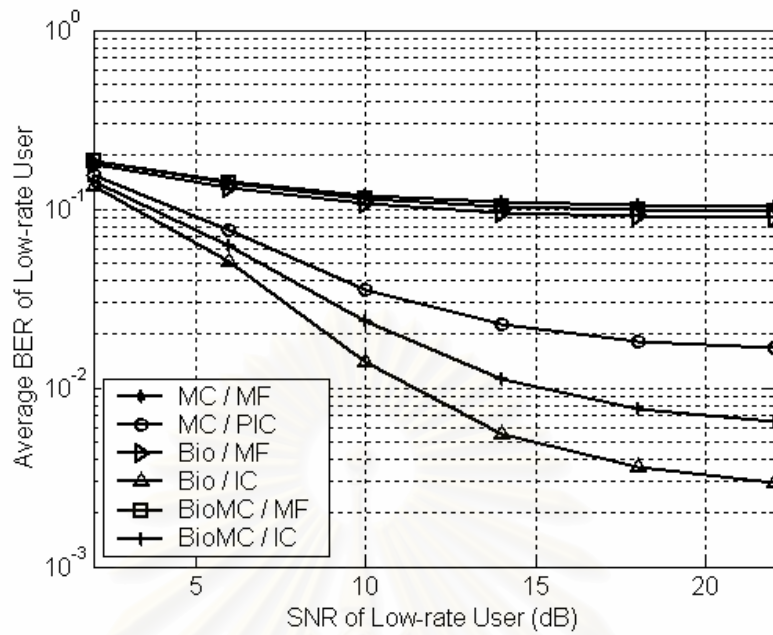
ถือได้มากขึ้นจากการที่มีขนาดสัญญาณใหญ่ขึ้น ทำให้ห้กล้างสัญญาณแทรกสอดได้แม่นยำขึ้นในผู้ใช้รายอื่นๆ



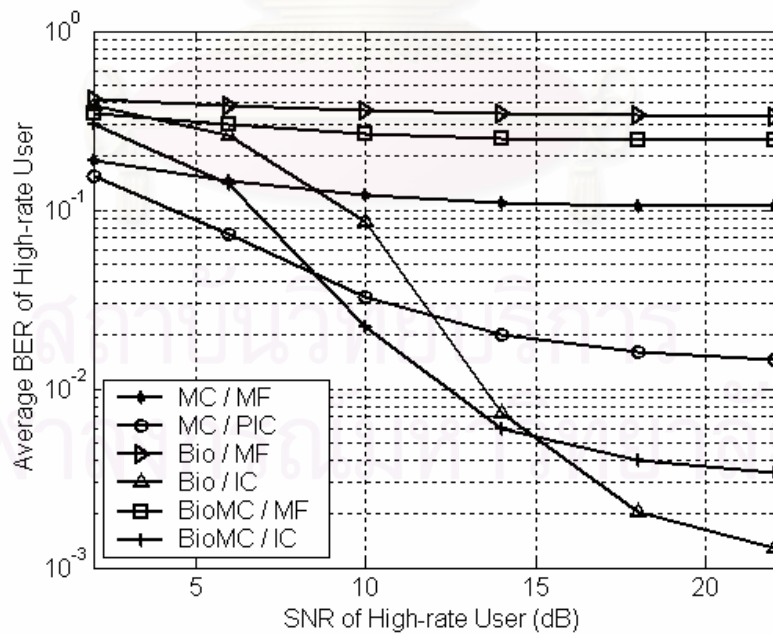
รูปที่ 4.8 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง เมื่อ SNR ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำมีค่ามากกว่าค่า SNR ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราอื่น 5 dB



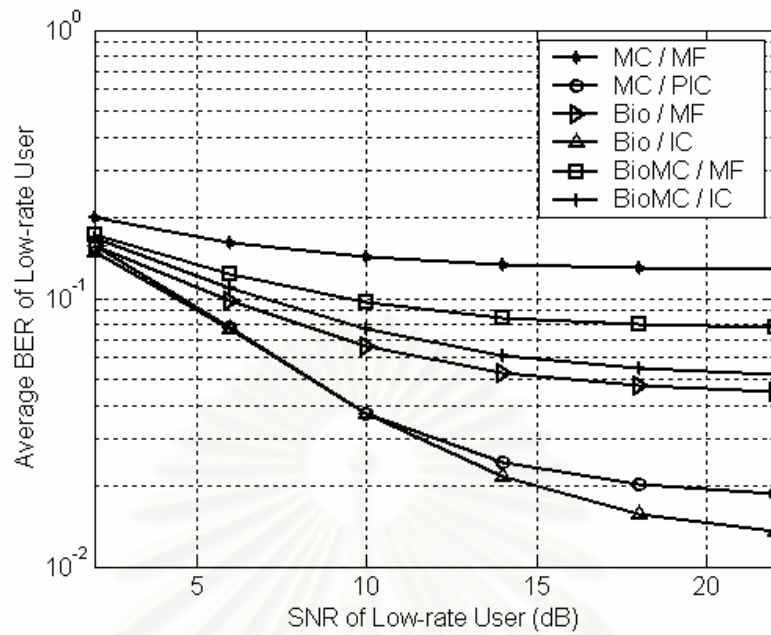
รูปที่ 4.9 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง เมื่อ SNR ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำมีค่ามากกว่าค่า SNR ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราอื่น 5 dB



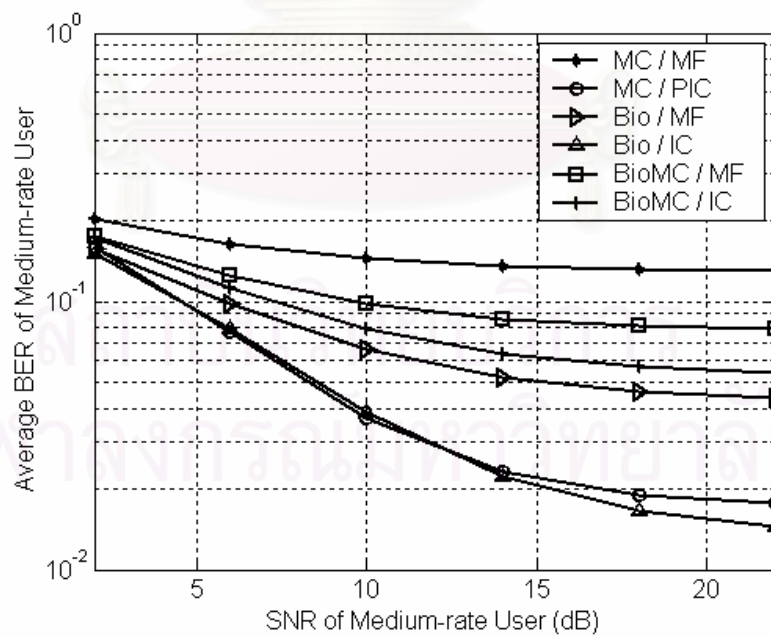
รูปที่ 4.10 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ  
เมื่อ SNR ของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางมีค่ามากกว่าค่า SNR ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราอื่น 5 dB



รูปที่ 4.11 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง  
เมื่อ SNR ของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางมีค่ามากกว่าค่า SNR ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราอื่น 5 dB



รูปที่ 4.12 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ  
เมื่อ SNR ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงมีค่ามากกว่าค่า SNR ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราอื่น 5 dB



รูปที่ 4.13 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง  
เมื่อ SNR ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงมีค่ามากกว่าค่า SNR ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราอื่น 5 dB



### 4.3.2 ค่า BER เมื่อทำการเปลี่ยนกำลังสัญญาณแทรกสอด

ในหัวข้อนี้จะทำการเปรียบเทียบค่าอัตราความผิดพลาดบิต เมื่อเพิ่มขนาดสัญญาณของผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลต่ำ กลาง หรือสูง โดยการทดสอบจะทำการเป็นจำนวน 50 ครั้ง แล้วจึงนำผลที่ได้มาเฉลี่ย

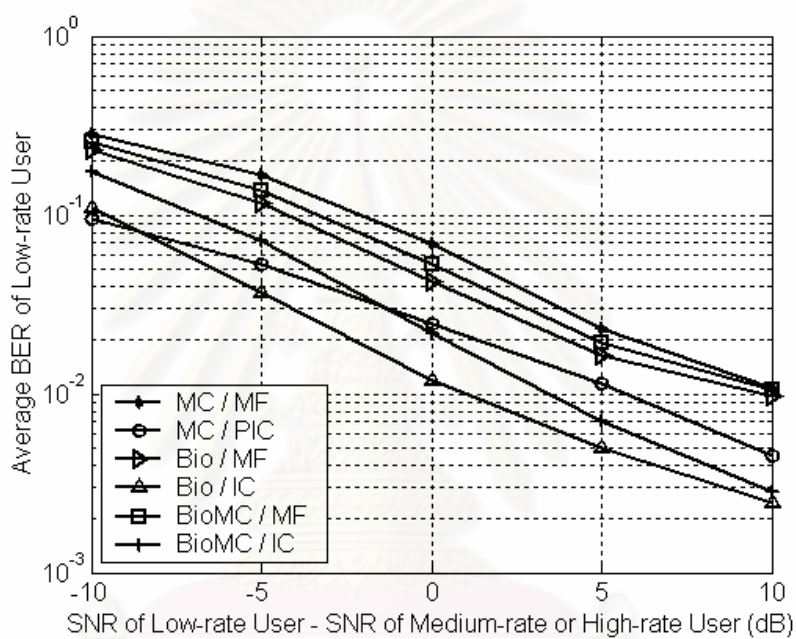
รูปที่ 4.14 - 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำเพิ่มขึ้น โดยให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่มีอัตรากลางและสูงมีค่า 10 dB คงที่ และสัญญาณรบกวนในระบบคงที่ ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 4.17 - 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง ต่ำ และสูง ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางเพิ่มขึ้น โดยให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่มีอัตราต่ำและสูงมีค่า 10 dB คงที่ รูปที่ 4.20 - 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ต่ำ และกลาง ตามลำดับ เมื่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงเพิ่มขึ้น โดยให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่มีอัตราต่ำและกลางมีค่า 10 dB คงที่

เมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลต่ำ (รูปที่ 4.14 - 4.16) พบว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางและสูงของระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (Bio) มากที่สุด (รูปที่ 4.15 และ 4.16) กล่าวคือค่าอัตราความผิดพลาดบิตจะน้อยลงมากเมื่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลต่ำมีค่าต่ำ ในขณะที่ค่าอัตราความผิดพลาดบิตจะเพิ่มขึ้นมากเมื่ออัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลต่ำมีค่าสูง ผลกระทบดังกล่าวส่งผลกระทบต่อระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (BioMC) มากกว่าที่ส่งผลกระทบต่อระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) อยู่เล็กน้อย แนวโน้มเช่นนี้เกิดมาจากการที่ค่าความผิดพลาดบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำในระบบทั้งสามมีแนวโน้มความชันที่ไม่แตกต่างกัน (รูปที่ 4.14) ทำให้ลักษณะอัตราความผิดพลาดบิตของผู้ใช้ที่มีอัตรากลางและสูงขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะตัวของแต่ละระบบเป็นหลัก โดยระบบที่ใช้ข้อมูลอัตราสูงใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลซึ่งเป็นแบบแผนที่ทนสัญญาณรบกวนได้น้อยที่สุดจะได้รับผลกระทบมากที่สุด ในขณะเดียวกัน เมื่อขนาดสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำมีค่าน้อยผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางและสูงของระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (Bio) ก็จะมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ต่ำที่สุด เนื่องจากเป็นระบบที่มีสัญญาณแทรกสอดรวมในระบบน้อยที่สุด (รูปที่ 4.15-4.16)



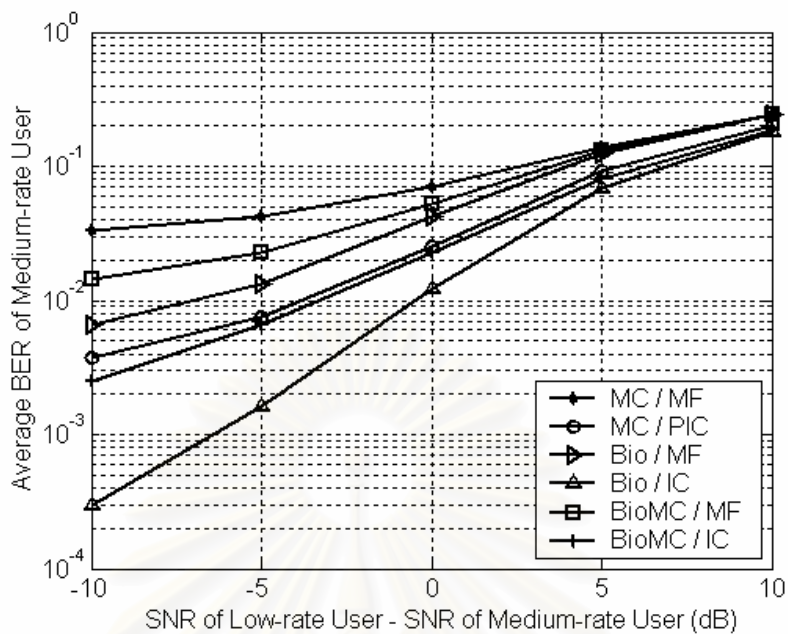
เมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลกลาง (รูปที่ 4.16 - 4.18) พบว่าส่งผลกระทบต่อระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ที่ใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน (PIC) ก่อนข้างมาก ในขณะที่ผลกระทบต่อระบบที่ใช้แบบแผนไบนารีทอกอนอลในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (Bio) ที่ใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานเป็นกลุ่ม (IC) และระบบที่ใช้แบบแผนไบนารีทอกอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (BioMC) ที่ใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานเป็นกลุ่ม (IC) นั้นมีน้อยมาก โดยค่าอัตราความผิดพลาดบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและสูงของระบบทั้งสองดังกล่าว แทบจะไม่เพิ่มตามขนาดของการแทรกสอดที่มาจากผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางที่มากขึ้นเลย ทั้งนี้เนื่องจากค่าอัตราความผิดพลาดบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางของระบบที่ใช้แบบแผนไบนารีทอกอนอลในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (Bio) และระบบที่ใช้แบบแผนไบนารีทอกอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (BioMC) มีลักษณะที่ลดลงเร็วมากเมื่อขนาดสัญญาณเพิ่มขึ้น (รูปที่ 4.16) ทั้งนี้เป็นเพราะการที่สัญญาณแทรกสอดในระบบทั้งสองเกิดจากผู้ใช้อัตรากลางเป็นหลัก ทำให้เมื่อสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลางมีขนาดสูงขึ้น ความเชื่อถือได้ในการหักล้างสัญญาณแทรกสอดมีมากขึ้น ดังนั้นถึงแม้ว่าสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อัตรากลางมีขนาดใหญ่ขึ้น ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของผู้ใช้อัตราอื่นของระบบทั้งสองก็ไม่เพิ่มขึ้นจากเดิมมากนัก

เมื่อเปลี่ยนค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ที่มีอัตราข้อมูลสูง (รูปที่ 4.19 - 4.22) พบว่าส่งผลกระทบต่อระบบที่ใช้แบบแผนไบนารีทอกอนอลในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (Bio) และระบบที่ใช้แบบแผนไบนารีทอกอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (BioMC) ที่ใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานเป็นกลุ่ม (IC) มากกว่าระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ด้วยเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน (PIC) ทั้งนี้เป็นเพราะการหักล้างสัญญาณแทรกสอดแบบเป็นกลุ่มในที่นี้ (IC) จะละเลยผลของสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อัตราสูงในขั้นแรก ดังนั้นเมื่อสัญญาณของผู้ใช้อัตราสูงมีขนาดใหญ่ขึ้น ก็จะทำให้สัญญาณแทรกสอดที่ไม่ถูกหักล้างมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเพิ่มขึ้นด้วยแนวโน้มที่สูงกว่าการใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน (PIC) ในระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ที่มีการหักล้างสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อัตราสูง ราย ด้วยความเชื่อถือได้ที่เท่ากัน

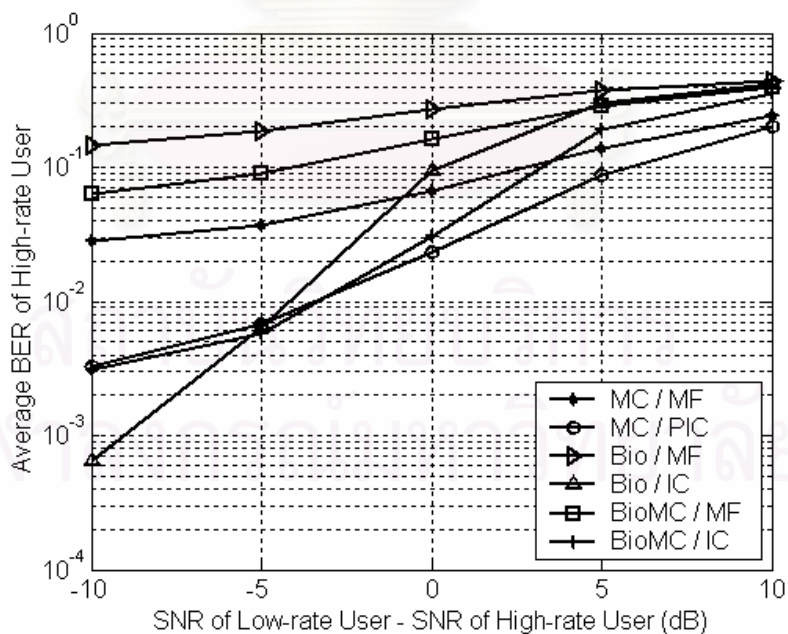


รูปที่ 4.14 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ  
เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ

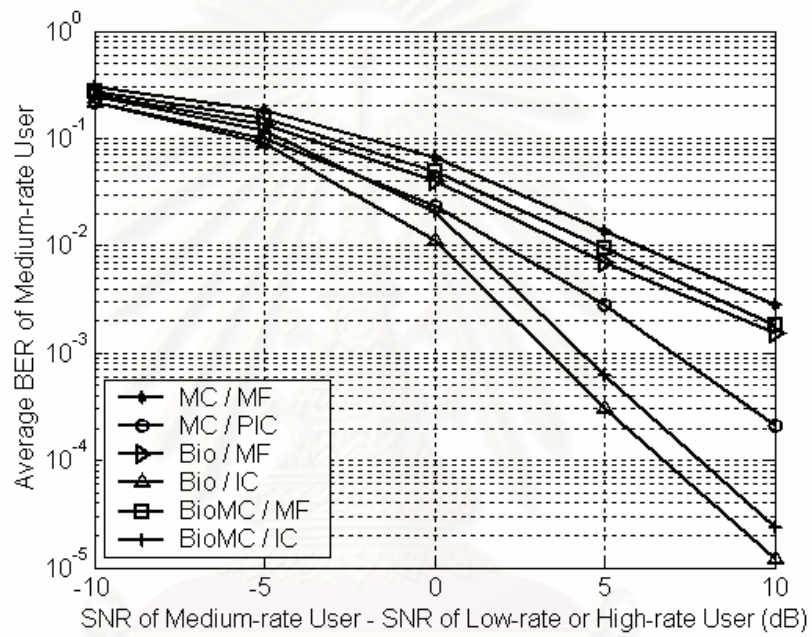
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง  
เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ

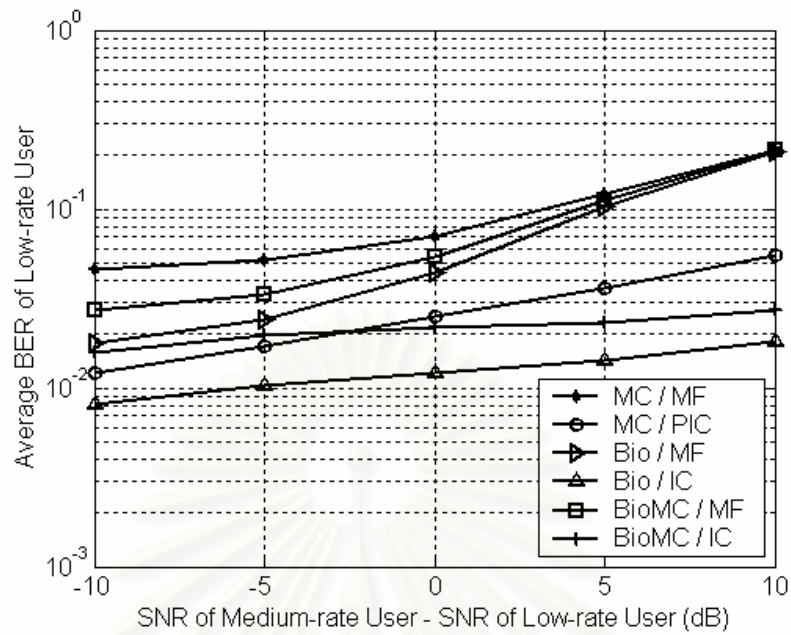


รูปที่ 4.16 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง  
เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ

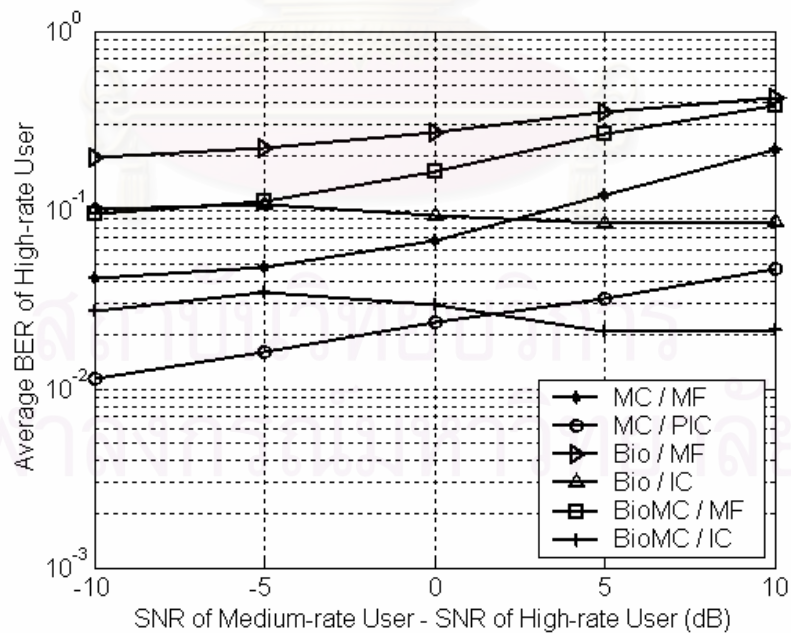


รูปที่ 4.17 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง  
เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง

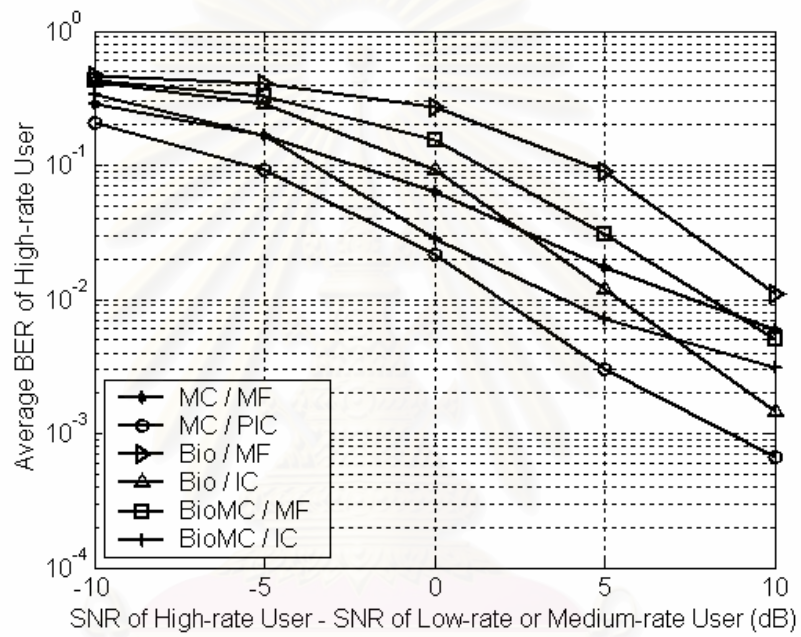
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง



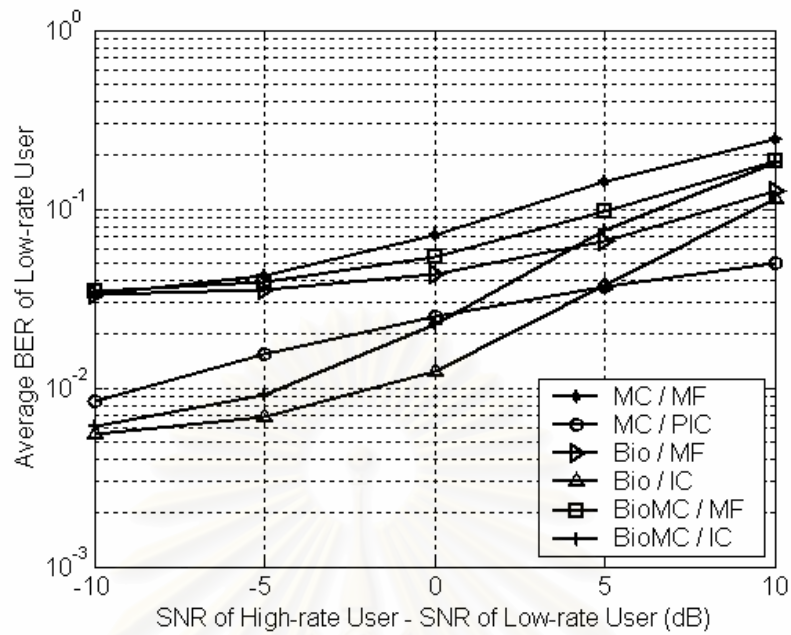
รูปที่ 4.19 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง



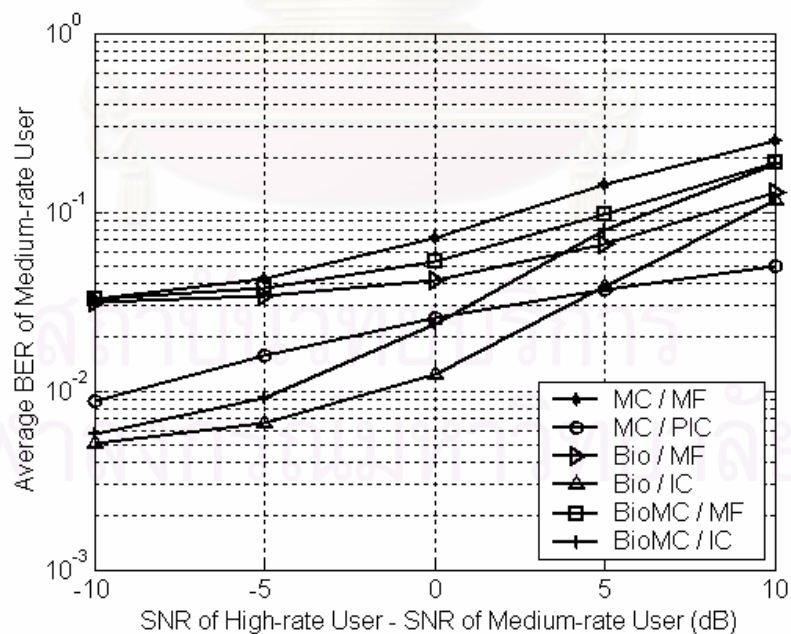
รูปที่ 4.20 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง  
เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.21 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง



รูปที่ 4.22 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง เมื่อเปลี่ยนอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง

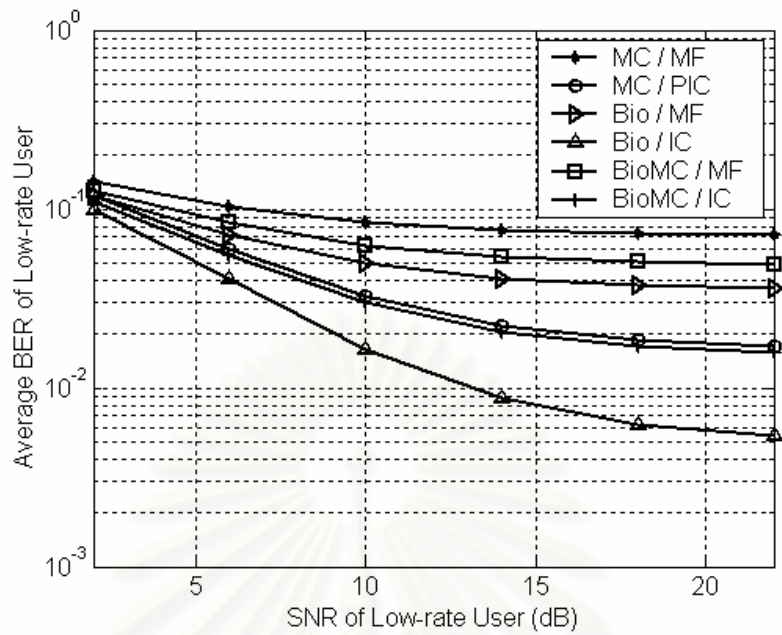
#### 4.4 ผลของเฟดดิ้ง

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาอิทธิพลของช่องสัญญาณที่เกิดการเฟดดิ้งที่มีลักษณะการแจกแจงเป็นแบบเรย์ลี (รูปที่ 4.1) ที่ส่งผลกระทบต่อระบบทั้งสาม โดยจะแสดงเป็นค่าอัตราความผิดพลาดบิต ที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่างๆ ในที่นี้จะให้จำนวนผู้ใช้ อัตราข้อมูล และจำนวนบิตข้อมูลเป็นดังตารางที่ 4.1 ส่วนตัวขยายสัญญาณ จะใช้ตัวขยายที่มีกำลังสูงสุดดังตารางที่ 4.2 โดยจะแยกพิจารณาเป็นกรณีระบบ A และกรณีระบบ B

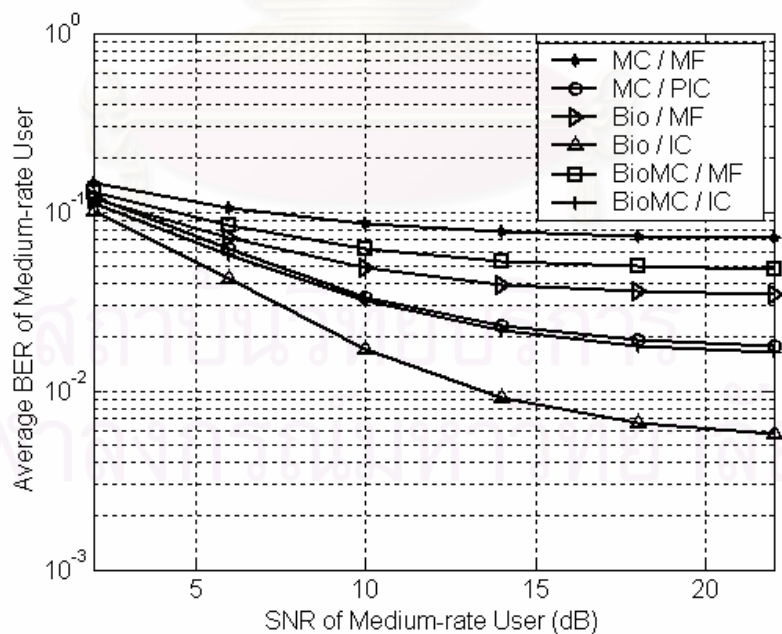
อนึ่ง ค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่แสดงในที่นี้ได้จากการเฉลี่ยผลการทดสอบเป็นจำนวน 50 ครั้ง

- ระบบ A: กำลังสูงสุดของตัวขยายมีค่ามากเพียงพอกับกำลังสัญญาณของผู้ใช้แต่ละราย

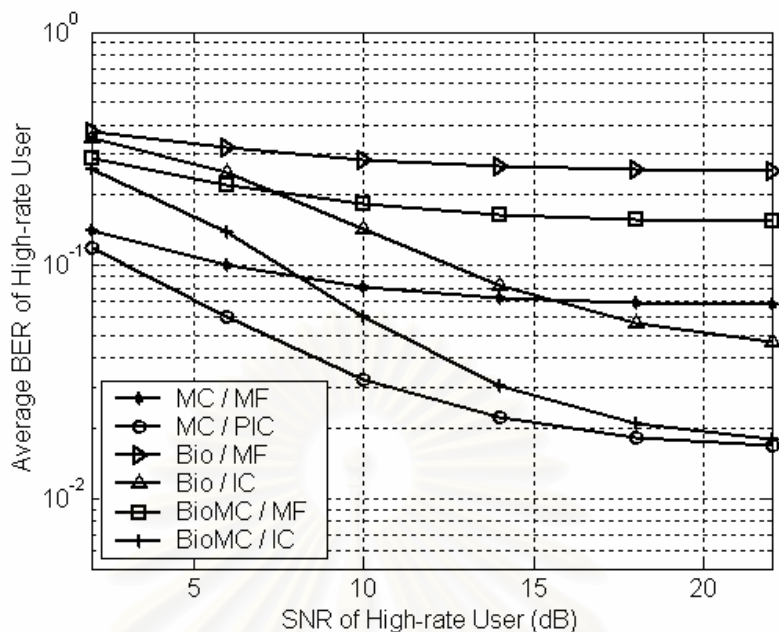
รูปที่ 4.23 4.24 และ 4.25 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ โดยจะใช้ตัวขยายที่มีกำลังสูงสุดมากพอ (ระบบ A ในตารางที่ 4.2) พบว่าเฟดดิ้งของช่องสัญญาณจะส่งผลกระทบต่อระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลกับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (Bio) และระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสกับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (BioMC) มากกว่า ระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางของระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสกับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (BioMC) ที่ใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานเป็นกลุ่มที่มีการป้อนกลับ (IC) ค่อยลงจนอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกับระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ด้วยเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน (PIC) ในขณะที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงของระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสและระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลจะมีอัตราความผิดพลาดบิตที่น้อยกว่าระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ทุกค่าอัตราส่วนกำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ที่แสดงไว้ในที่นี้



รูปที่ 4.23 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ  
ของระบบที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A)  
ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่มีการเฟดดิ้งแบบเรย์ลี



รูปที่ 4.24 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง  
ของระบบที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A)  
ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่มีการเฟดดิ้งแบบเรย์ลี

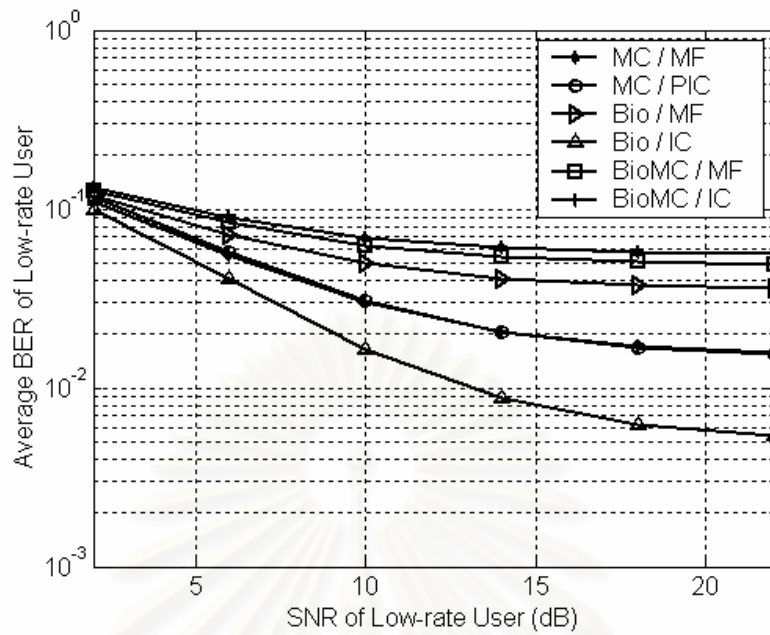


รูปที่ 4.25 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง  
ของระบบที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A)  
ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่มีการเฟดคิงแบบเรย์ลี

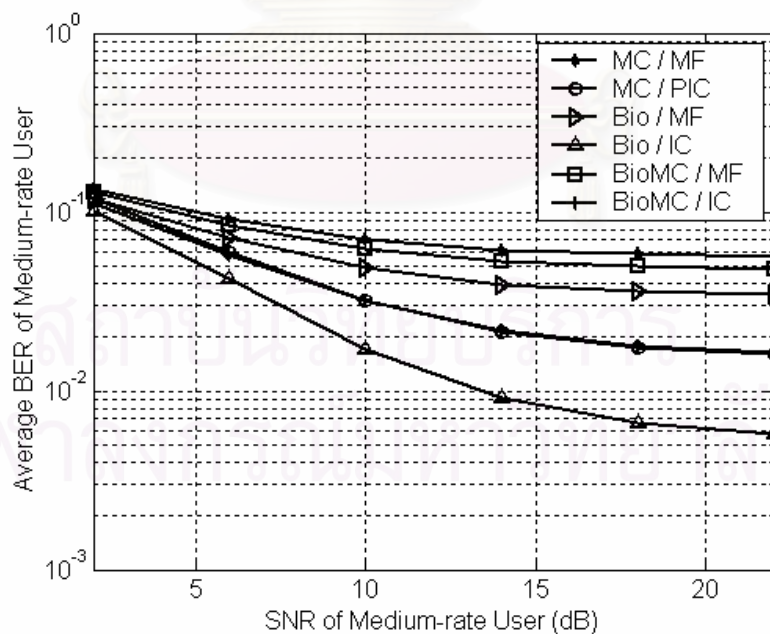
- ระบบ B : กำลังสูงที่สุดของตัวขยายถูกจำกัดไว้ที่ค่ากำลังสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง

รูปที่ 4.26 4.27 และ 4.28 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ โดยจะใช้ตัวขยายที่มีค่ากำลังสูงที่สุดจำกัดไว้ที่กำลังของผู้ใช้ข้อมูลอัตรา กลาง (ระบบ B ในตารางที่ 4.2)

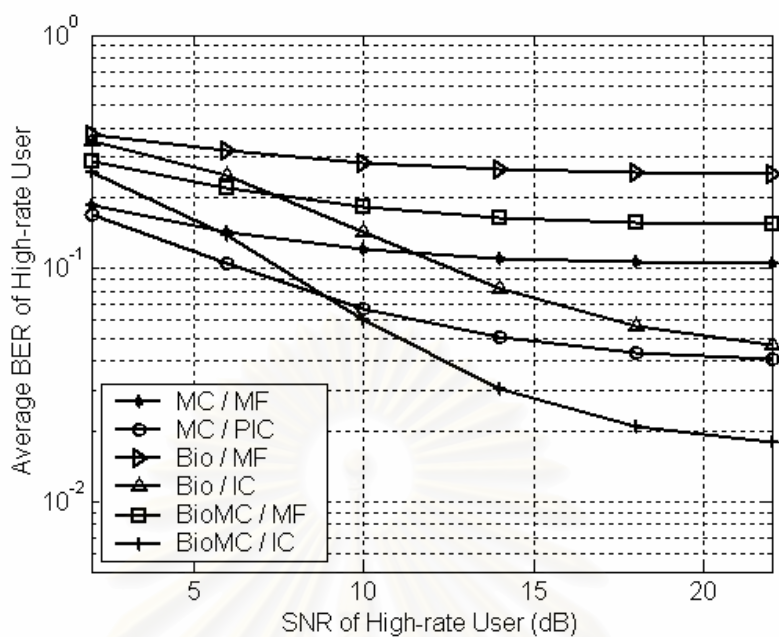
ผลการวิจัย แสดงให้เห็นว่า เมื่อกำลังสูงที่สุดของตัวขยายสัญญาณถูกจำกัดไว้ที่ค่ากำลัง สัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง จะทำให้อัตราความผิดพลาดบิตของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงของ ระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) เลวลง ทำให้ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงของระบบที่ใช้แบบ แผนไบออร์ทอคอนอลแบบหลายรหัส (BioMC) ด้วยเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่าง ขนานเป็นกลุ่มที่มีการป้อนกลับ (IC) มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ดีกว่าระบบที่ใช้แบบแผนหลาย รหัสทั้งหมด (MC) ด้วยเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน (PIC) ที่ค่าอัตราส่วน กำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน 9 dB ขึ้นไป ส่วนระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอคอนอล (Bio) จะมีอัตราความผิดพลาดบิตที่ดีกว่าระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ทุกค่าอัตราส่วน กำลังสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่แสดงไว้ในที่นี้



รูปที่ 4.26 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ ของระบบ  
ที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงที่สุดของผู้ใช้อัตรากลาง (ระบบ B)  
ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่มีการเฟดดิ้งแบบเรย์ลี



รูปที่ 4.27 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง ของระบบ  
ที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงที่สุดของผู้ใช้อัตรากลาง (ระบบ B)  
ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่มีการเฟดดิ้งแบบเรย์ลี



รูปที่ 4.28 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ของระบบ  
 ที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงที่สุดของผู้ใช้อัตรากลาง (ระบบ B)  
 ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณที่มีการเฟดดิ้งแบบเรย์ลี



#### 4.5 การส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาอิทธิพลของการส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสซึ่งจะทำให้จุดเริ่มต้นของข้อมูลของผู้ใช้แต่ละรายแตกต่างกัน โดยจะแสดงผลเป็นค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่างๆ และจะให้จำนวนผู้ใช้ อัตราข้อมูล และจำนวนบิตข้อมูลเป็นดังตารางที่ 4.1 ส่วนตัวขยายสัญญาณ จะใช้ตัวขยายที่มีกำลังสูงที่สุดดังตารางที่ 4.2 โดยจะพิจารณาทั้งกรณีระบบ A และกรณีระบบ B นอกจากนี้จะพิจารณาทั้งกรณีช่องสัญญาณที่มีการเฟดดิ้งแบบเรย์ลีดังรูปที่ 4.1 และกรณีที่ไม่มีการเฟดดิ้ง ทั้งนี้ค่าอัตราความผิดพลาดบิต จะได้จากการเฉลี่ยผลการทดสอบเป็นจำนวน 50 ครั้ง

ในที่นี่จะพิจารณาให้ระบบที่ใช้ในการวิจัย ใช้มาตรฐานการสื่อสารเคลื่อนที่ยุคที่ 3 ซึ่งจะมีการส่ง pilot channel ที่ช่วยในการซิงโครไนซ์ (synchronization) ข้อมูลของผู้ใช้รายต่างๆ ในการสื่อสารข้อมูลขาขึ้น ดังนั้นจึงอนุมานว่าเวลาประวิงของผู้ใช้แต่ละรายมีค่าไม่มากนัก นอกจากนี้จะพิจารณาเฉพาะเวลาประวิงที่เป็นจำนวนเท่าของคาบชีพของรหัสแผ่เท่านั้น โดยเวลาประวิงที่ใช้ในการวิจัยในส่วนนี้สำหรับผู้ใช้อัตราต่ำ 5 ราย อัตรากลาง 4 ราย และอัตราสูง 3 ราย เป็นดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 เวลาประวิงที่ใช้ สำหรับผู้ใช้อัตราต่ำ 5 ราย อัตรากลาง 4 ราย และอัตราสูง 3 ราย ตามลำดับ

อัตราข้อมูล	ต่ำ					กลาง				สูง		
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3
ผู้ใช้รายที่												
เวลาประวิง (ชีพ)	0	3	5	7	9	0	4	6	8	0	5	10

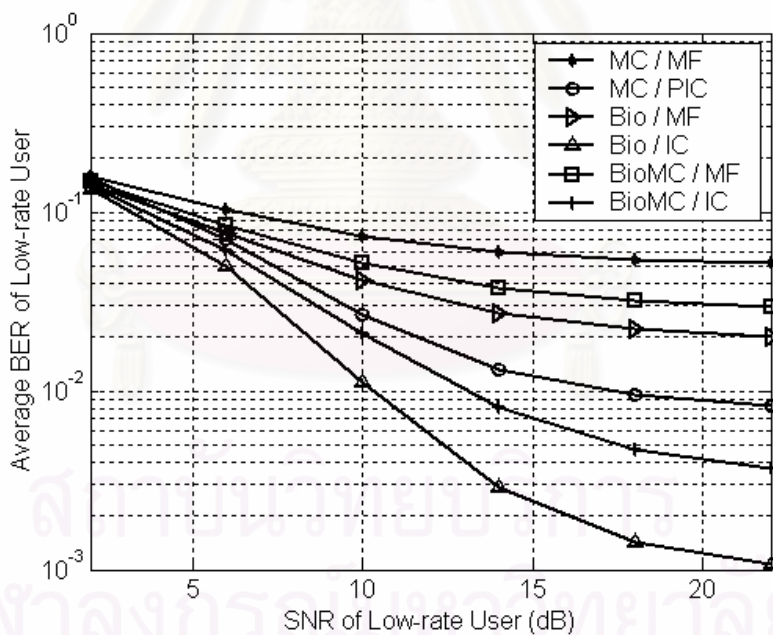
อนึ่ง ในการจำลองระบบที่ส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส จะอนุมานให้ภาครับมีกรรมวิธีในการตรวจหาการประวิงเวลาของข้อมูลผู้ใช้แต่ละรายได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

##### 4.5.1 ช่องสัญญาณอะซิงโครนัสปราศจากเฟดดิ้ง (Asynchronous non-fading channel)

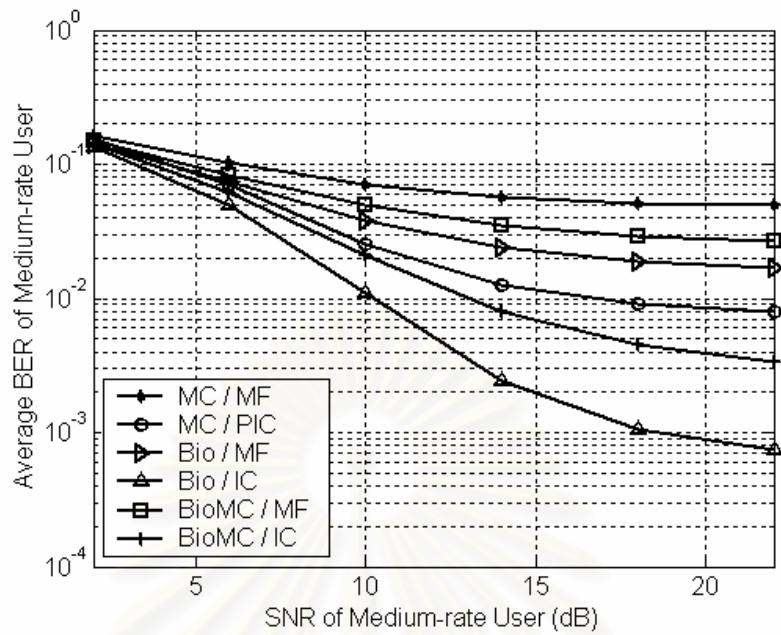
อิทธิพลของช่องสัญญาณอะซิงโครนัสแบบปราศจากเฟดดิ้งจะถูกนำมาพิจารณาในที่นี่ โดยจะแยกพิจารณาเป็นสองกรณี คือกรณีที่ใช้ตัวขยายที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A) และกรณีที่ใช้ตัวขยายที่ กำลังสูงที่สุดจำกัดอยู่ที่กำลังสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง (ระบบ B)

- ระบบ A: กำลังสูงสุดของตัวขยายมีค่ามากเพียงพอกับกำลังสัญญาณของผู้ใช้แต่ละราย

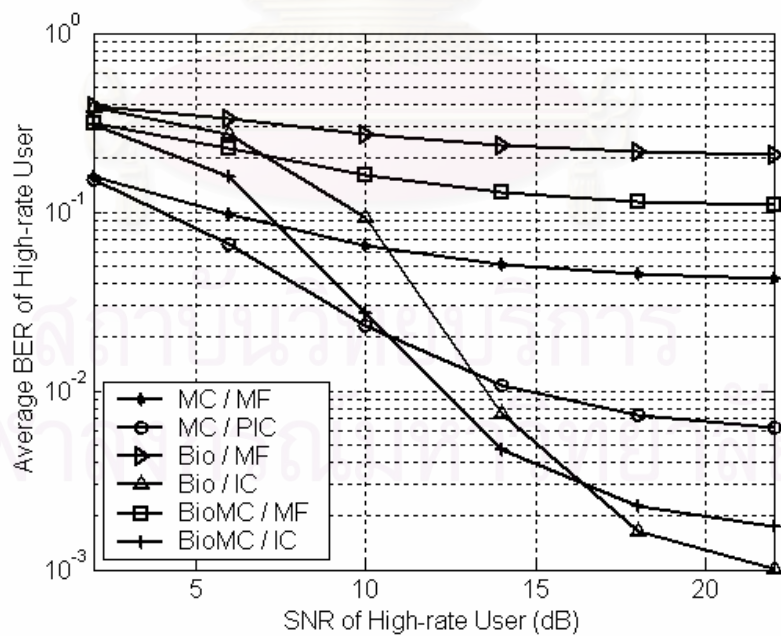
รูปที่ 4.29 4.30 และ 4.31 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ พบว่าผลการวิจัยที่ได้มีความใกล้เคียงกับกรณีที่เป็นการส่งข้อมูลแบบชิง โครนัส (รูปที่ 4.2 – 4.4) มาก ในทุกๆ เส้นกราฟ ทั้งนี้ด้วยเหตุผลมาจากการที่รหัสแผล่ที่เกิดจากการ คุณแบบชีพต่อชีพระหว่างรหัสแบบสุ่มที่ใช้จำแนกผู้ใช้กับรหัสตั้งฉาก มีคุณสมบัติใกล้เคียงกับรหัส แบบสุ่ม ซึ่งมีคุณสมบัติทางค่าสหสัมพันธ์ข้ามที่เหมือนกันทั้งในระบบที่มีการประวิงเวลาและ ระบบที่ไม่มีการประวิงเวลา ทำให้เมื่อภากรับทราบการประวิงเวลาของสัญญาณผู้ใช้แต่ละราย จึง สามารถตรวจหาบิตข้อมูลที่ส่งมาได้ด้วยความผิดพลาดที่ไม่แตกต่างกับกรณีระบบชิง โครนัส ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการส่งข้อมูลแบบอะชิง โครนัสไม่ส่งผลกระทบต่อระบบทั้งสาม



รูปที่ 4.29 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ ของระบบที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงสุดที่มากที่สุดพอ (ระบบ A) ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณอะชิง โครนัส



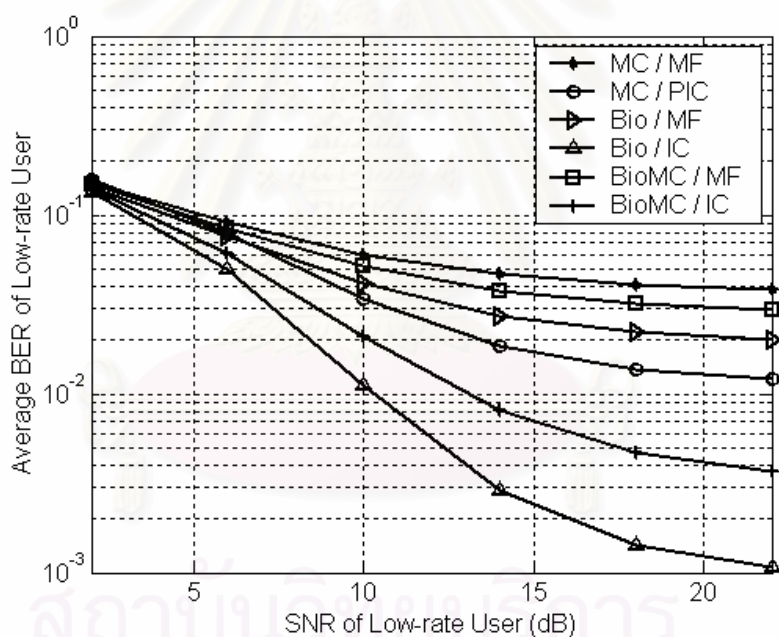
รูปที่ 4.30 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง  
ของระบบที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A)  
ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณอะซิงโครนัส



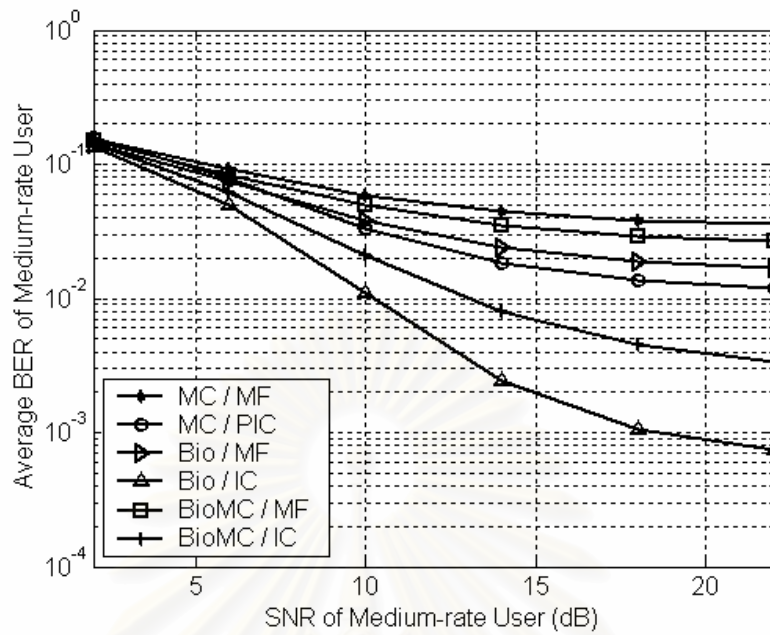
รูปที่ 4.31 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง  
ของระบบที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A)  
ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณอะซิงโครนัส

- ระบบ B : กำลังสูงสุดของตัวขยายถูกจำกัดไว้ที่ค่ากำลังสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ

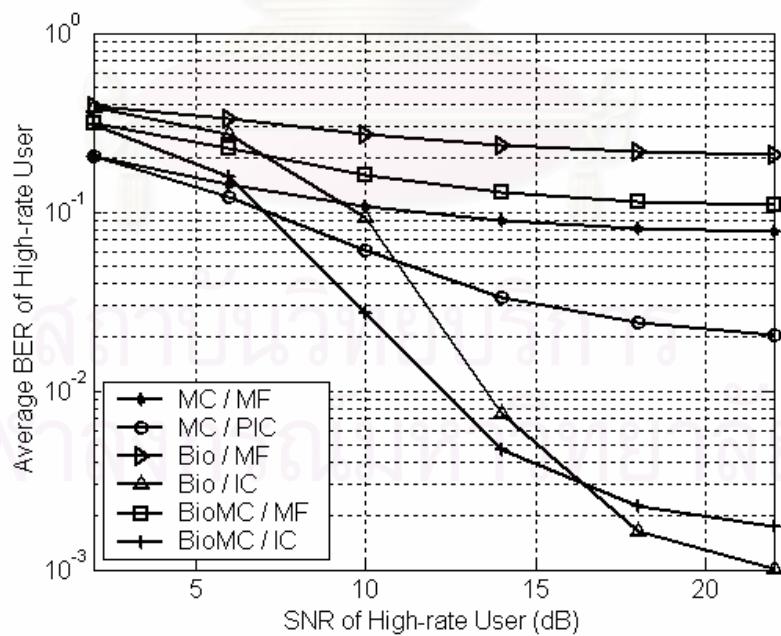
รูปที่ 4.32 4.33 และ 4.34 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ พบว่าผลการวิจัยที่ได้มีความใกล้เคียงกับกรณีที่เป็นการส่งข้อมูลแบบชิง โครนัส (รูปที่ 4.5 – 4.7) เช่นเดียวกับกรณีที่กำลังสูงสุดที่สุคมีค่ามากพอ (ระบบ A) ด้วยสาเหตุจากคุณสมบัติของรหัสแ่ที่คล้ายคลึงกับรหัสแบบสุ่มดังที่ได้กล่าวไว้แล้วในส่วนระบบ A ของหัวข้อที่ 4.5.1



รูปที่ 4.32 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ ของระบบ ที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงสุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงสุดของผู้ใช้อัตราต่ำ (ระบบ B) ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณอะชิงโครนัส



รูปที่ 4.33 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง ของระบบ  
ที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงสุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงสุดของผู้ใช้อัตรากลาง (ระบบ B)  
ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณอะซิงโครนัส



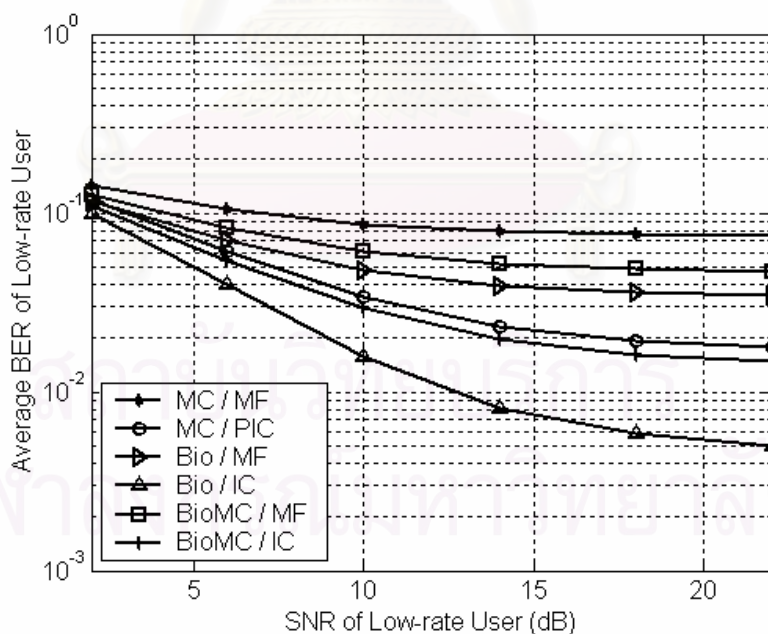
รูปที่ 4.34 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ของระบบ  
ที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงสุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงสุดของผู้ใช้อัตรากลาง (ระบบ B)  
ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณอะซิงโครนัส

#### 4.5.2 ช่องสัญญาณอะซิงโครนัสที่มีเฟดดิ้ง (Asynchronous fading channel)

ช่องสัญญาณอะซิงโครนัสที่มีเฟดดิ้งจะถูกนำมาพิจารณาในที่นี้ โดยจะแยกพิจารณาเป็นสองกรณี คือกรณีที่ผู้ใช้ตัวขยายที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A) และกรณีที่ผู้ใช้ตัวขยายที่กำลังสูงที่สุดจำกัดอยู่ที่กำลังสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ (ระบบ B)

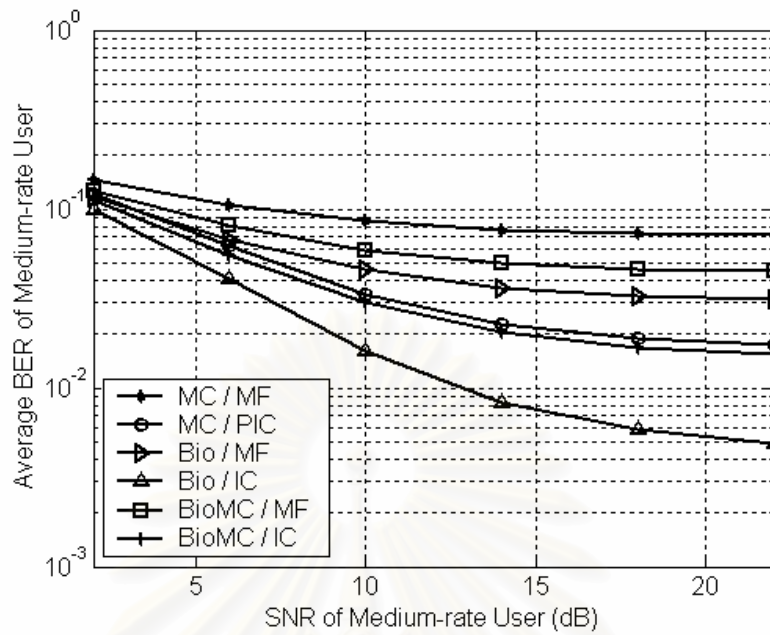
- ระบบ A: กำลังสูงที่สุดของตัวขยายมีค่ามากเพียงพอกับกำลังสัญญาณของผู้ใช้แต่ละราย

รูปที่ 4.35 4.36 และ 4.37 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ พบว่าผลการวิจัยที่ได้มีความใกล้เคียงกับกรณีที่เป็นการส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส (รูปที่ 4.23 – 4.25) เช่นเดียวกับในกรณีที่ปราศจากเฟดดิ้ง จึงกล่าวได้ว่าผลของความอะซิงโครนัสในระบบใดๆ ก็ตามที่ใช้รหัสแม่แบบสุ่ม จะให้ผลโดยรวมเหมือนกรณีที่เป็นระบบซิงโครนัส

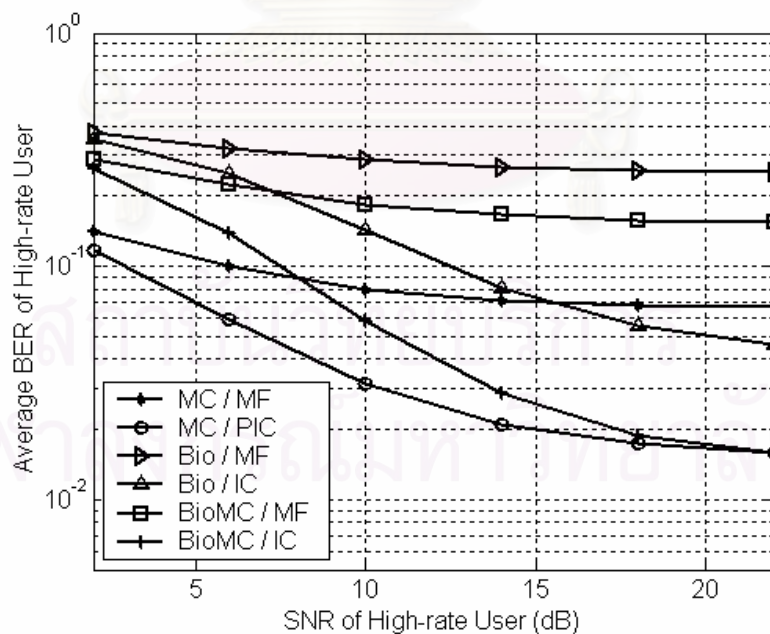


รูปที่ 4.35 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ ของระบบที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A) ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณอะซิงโครนัสที่มีการเฟดดิ้งแบบเรย์ลี





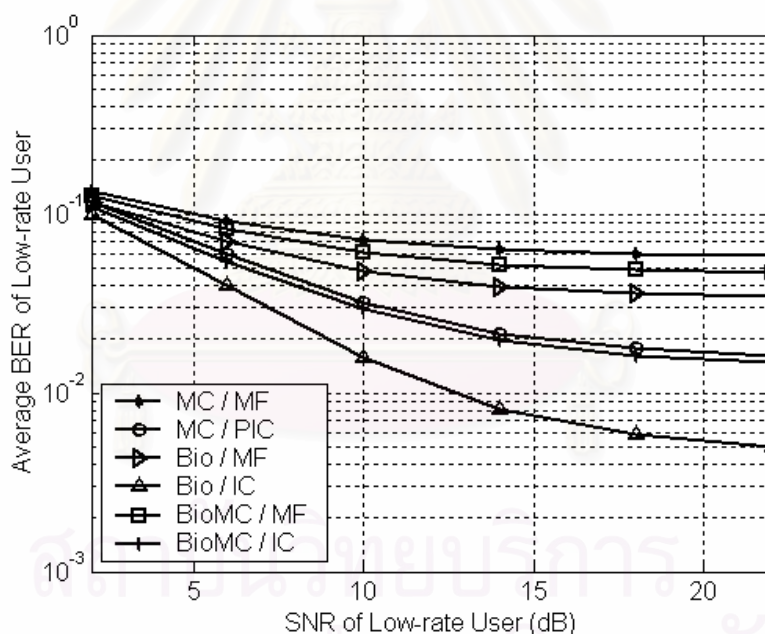
รูปที่ 4.36 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง  
ของระบบที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A)  
ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณอะซิงโครนัสที่มีการเฟดดิ้งแบบเรย์ลี



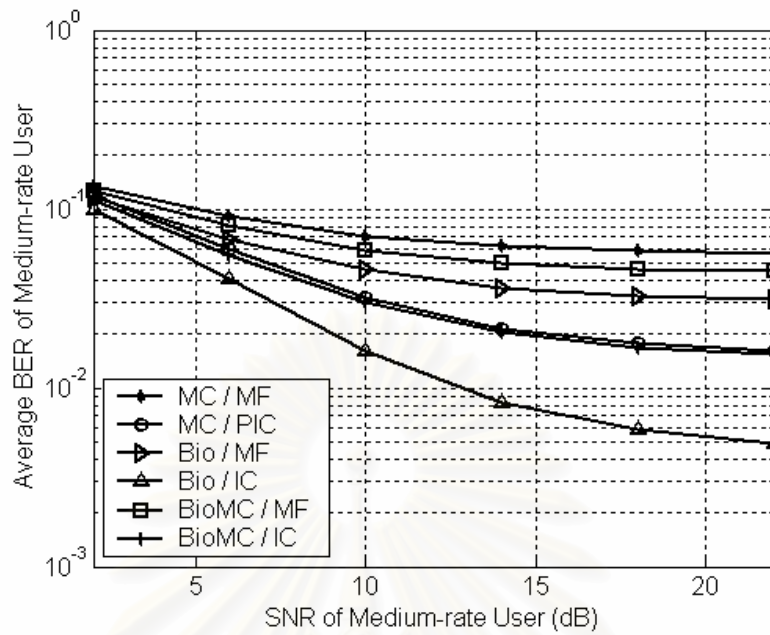
รูปที่ 4.37 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง  
ของระบบที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A)  
ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณอะซิงโครนัสที่มีการเฟดดิ้งแบบเรย์ลี

- ระบบ B : กำลังสูงสุดของตัวขยายถูกจำกัดไว้ที่ค่ากำลังสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ

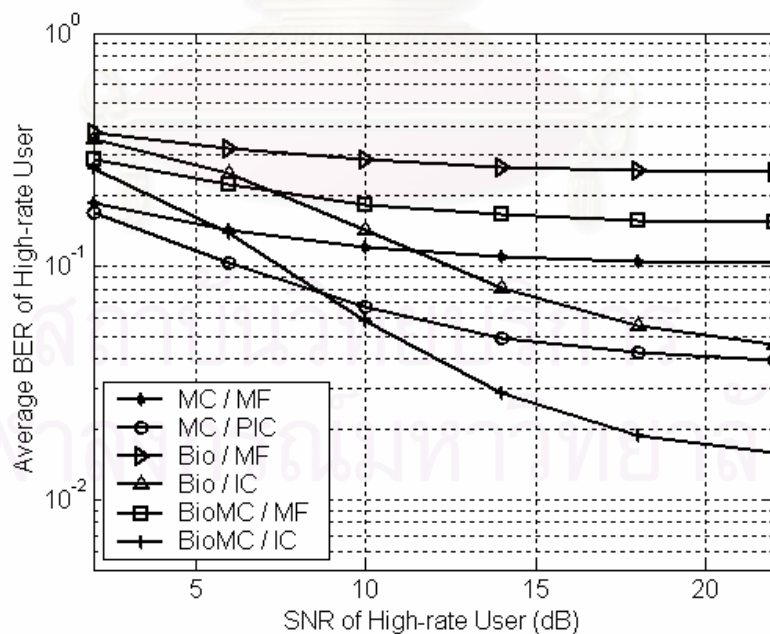
รูปที่ 4.38 4.39 และ 4.40 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ พบว่าผลการวิจัยที่ได้มีความใกล้เคียงกับกรณีที่เป็นการส่งข้อมูลแบบชิง โครนัส (รูปที่ 4.26 – 4.28) เช่นเดียวกับส่วนการทดสอบการส่งข้อมูลแบบอะชิง โครนัสที่ผ่านมา (หัวข้อที่ 4.5.1 ระบบ A และระบบ B และหัวข้อที่ 4.5.2)



รูปที่ 4.38 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ ของระบบ ที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงสุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงสุดของผู้ใช้อัตราต่ำ (ระบบ B) ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณอะชิง โครนัสที่มีการเฟดดิ้งแบบเรย์ลี



รูปที่ 4.39 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง ของระบบ  
ที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงสุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงสุดของผู้ใช้อัตรากลาง (ระบบ B)  
ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณอะซิงโครนัสที่มีการเฟดดิ้งแบบเรย์ลี



รูปที่ 4.40 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ของระบบ  
ที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงสุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงสุดของผู้ใช้อัตรากลาง (ระบบ B)  
ที่ส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณอะซิงโครนัสที่มีการเฟดดิ้งแบบเรย์ลี

#### 4.6 ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้

ในหัวข้อนี้จะพิจารณาความจุของระบบทั้งสาม โดยทำการเพิ่มจำนวนผู้ใช้ในระบบ และแสดงผลเป็นค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่ได้จากการเฉลี่ยผลการทดสอบเป็นจำนวน 50 ครั้ง ที่จำนวนผู้ใช้งานรวมต่างๆ กัน ทั้งนี้อัตราข้อมูล และจำนวนบิตข้อมูลยังคงใช้ดังตารางที่ 4.1 รวมทั้งกำลังสูงสุดของตัวขยายสัญญาณจะแยกพิจารณาเป็นกรณีระบบ A และกรณีระบบ B ดังตารางที่ 4.2 นอกจากนี้ในการจำลองระบบจะกำหนดให้ค่าอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเป็น 10 dB ในผู้ใช้ทุกราย

สำหรับจำนวนผู้ใช้ที่ใช้ในที่นี้จะเริ่มจากจำนวนผู้ใช้ 12 ราย (ผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ 5 ราย ผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง 4 ราย และผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง 3 ราย) ซึ่งเป็นจำนวนที่ใช้ในการทดสอบก่อนหน้า และจะทำการเพิ่มจำนวนผู้ใช้ในทุกๆ อัตราข้อมูล โดยจะเพิ่มเป็นอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกับระบบทั่วไปผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำๆ มักมีจำนวนมากกว่าผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงๆ [41] ดังนั้นในที่นี้จึงเพิ่มผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ และกลางคราวละ 2 ราย ในขณะที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงเพิ่มขึ้นคราวละ 1 ราย สำหรับแต่ละจุดกราฟ โดยรายละเอียดจำนวนผู้ใช้ทั้งหมดที่ใช้ แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 จำนวนผู้ใช้ที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะเมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้

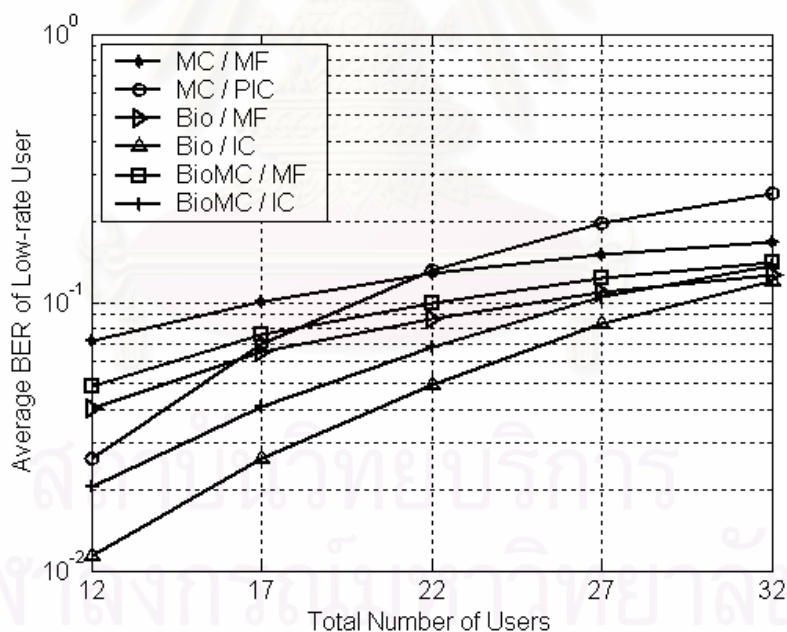
ผู้ใช้ \ จุดกราฟที่	1	2	3	4	5
ผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ (ราย)	5	7	9	11	13
ข้อมูลอัตรากลาง (ราย)	4	6	8	10	12
ข้อมูลอัตราสูง (ราย)	3	4	5	6	7
ผู้ใช้รวม (ราย)	12	17	22	27	32

- ระบบ A: กำลังสูงสุดของตัวขยายมีค่ามากเพียงพอกับกำลังสัญญาณของผู้ใช้แต่ละราย

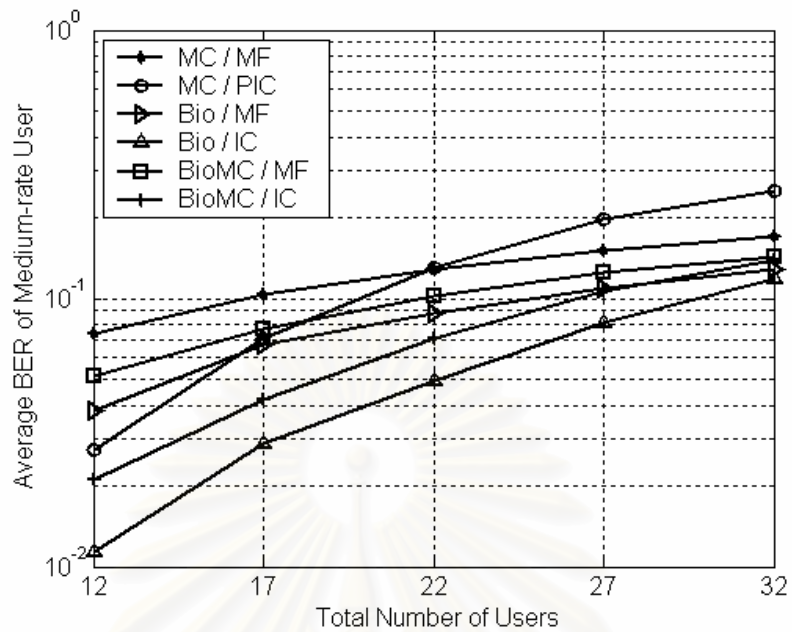
รูปที่ 4.41 4.42 และ 4.43 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้ อัตราความผิดพลาดบิตของระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) ระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอคอนอลในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (Bio) และ

ระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (BioMC) ที่ใช้เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ (MF) จะเพิ่มขึ้นด้วยแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน

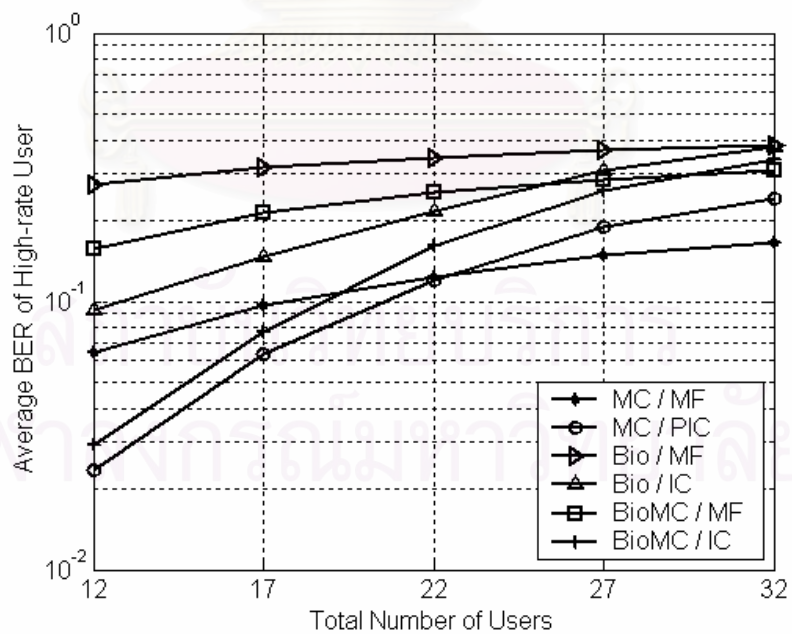
เมื่อพิจารณาเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน (PIC) และเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานเป็นกลุ่ม (IC) พบว่าจะมีแนวโน้มอัตราความผิดพลาดบิตเพิ่มขึ้นเร็วกว่าเมื่อใช้เครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ เนื่องจากการหักล้างที่ผิดพลาดมากขึ้นเมื่อจำนวนผู้ใช้เพิ่มสูงขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบแต่ละระบบ พบว่าที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลาง (รูปที่ 4.41 และ 4.42) ระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) มีแนวโน้มอัตราความผิดพลาดบิตที่เพิ่มขึ้นเร็วกว่าอีกสองระบบอยู่เล็กน้อย ในขณะที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (รูปที่ 4.43) พบว่า ระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอกอนอลในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (Bio) มีแนวโน้มอัตราความผิดพลาดบิตที่เพิ่มขึ้นช้ากว่าอีกสองระบบอยู่เล็กน้อย



รูปที่ 4.41 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำของระบบที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A) เมื่อจำนวนผู้ใช้งานในระบบเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.42 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง  
ของระบบที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A)  
เมื่อจำนวนผู้ใช้งานในระบบเพิ่มขึ้น

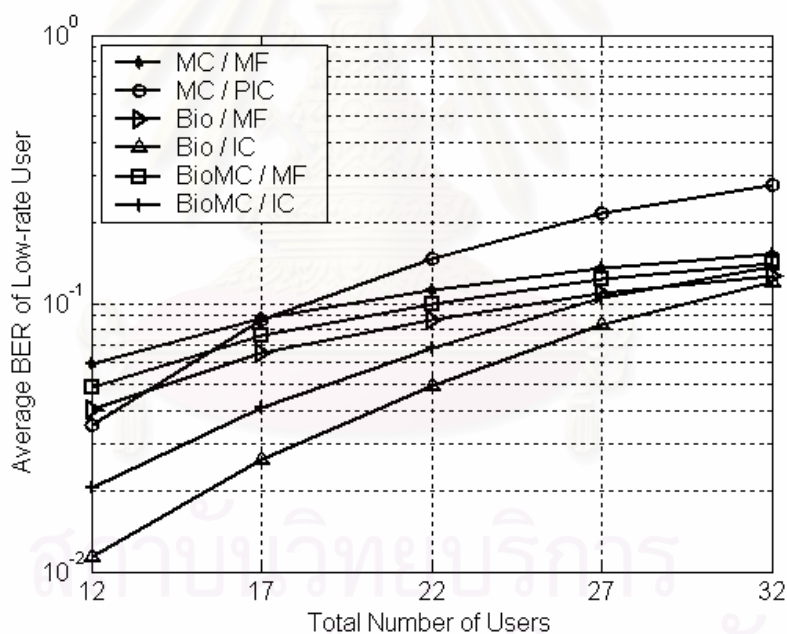


รูปที่ 4.43 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง  
ของระบบที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอ (ระบบ A)  
เมื่อจำนวนผู้ใช้งานในระบบเพิ่มขึ้น

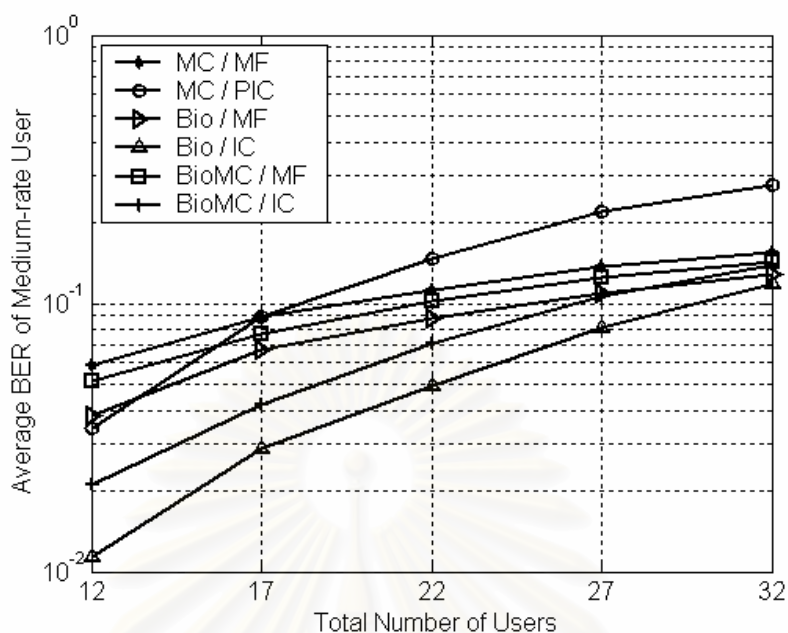


- ระบบ B : กำลังสูงสุดของตัวขยายถูกจำกัดไว้ที่ค่ากำลังสัญญาณของผู้ใช้อัตรากลาง

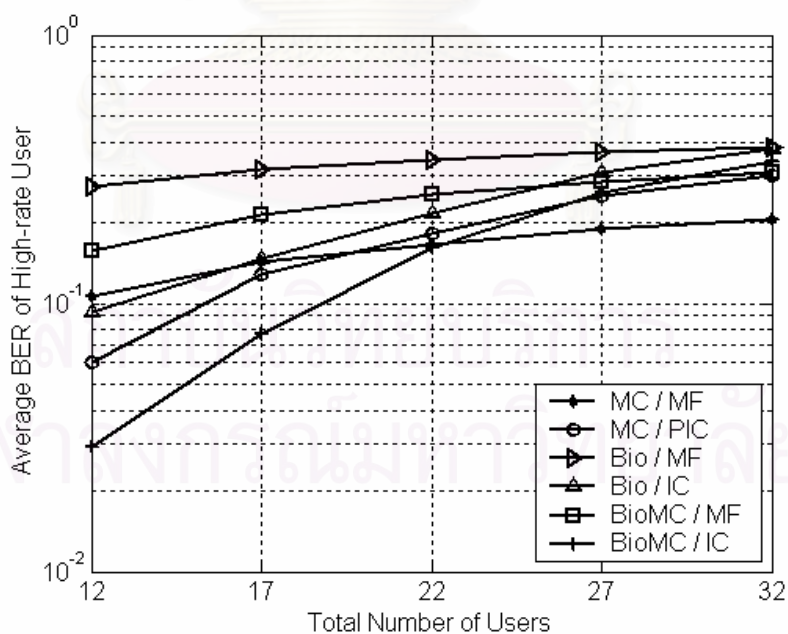
รูปที่ 4.44 4.45 และ 4.46 แสดงค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้อัตราต่ำ กลาง และสูง ตามลำดับ พบว่าเมื่อมีการจำกัดกำลังสูงสุดของตัวขยาย จะทำให้ระบบที่ใช้แบบ แพนหลายรหัสทั้งหมด (MC) มีสมรรถนะที่เลวลง โดยค่าอัตราความผิดพลาดบิต โดยรวมจะมากกว่าในกรณีที่ตัวขยายมีกำลังสูงสุดมากพอในทุกๆ จำนวนผู้ใช้ สำหรับแนวโน้มความชันของ ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของระบบที่ใช้แบบแพนหลายรหัสทั้งหมด (MC) จะมีแนวโน้มน่าใกล้เคียง กับในกรณีที่ตัวขยายมีกำลังสูงสุดมากพอ



รูปที่ 4.44 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้อัตราต่ำ ของระบบ ที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงสุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงสุดของผู้ใช้อัตรากลาง (ระบบ B) เมื่อจำนวนผู้ใช้งานในระบบเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.45 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตรากลาง ของระบบ  
ที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงที่สุดของผู้ใช้อัตรากลาง (ระบบ B)  
เมื่อจำนวนผู้ใช้งานในระบบเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.46 อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ของระบบ  
ที่ใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดจำกัดไว้ที่กำลังสูงที่สุดของผู้ใช้อัตรากลาง (ระบบ B)  
เมื่อจำนวนผู้ใช้งานในระบบเพิ่มขึ้น

#### 4.7 ผลสรุปโดยรวม

ผลการทดสอบทั้งหมดในบทนี้ สรุปได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลสรุปเปรียบเทียบระบบโดยรวม

	Bio/IC vs. MC/PIC	BioMC/IC vs. MC/PIC
BER ที่ สถานะปกติ (ส่งข้อมูลแบบ ซิงโครนัส ปราศจาก การเฟดดิ้ง และมีการควบคุม กำลังแบบ สมบูรณ์)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>ระบบ A (<math>A_0</math> มากพอ)</b> ในผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลาง Bio/IC จะให้ผลทาง BER ที่ดีกว่า MC/PIC อย่างชัดเจน สำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ SNR ต่ำๆ BER ของระบบ Bio/IC จะดีออกว่าอย่างชัดเจน แต่ที่ SNR สูงกว่า 13 dB BER ของระบบ Bio/IC จะเริ่มดีกว่าอย่างชัดเจน</li> <li>● <b>ระบบ B (<math>A_0</math> จำกัด)</b> ในผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลาง Bio/IC จะให้ผลทาง BER ที่ดีกว่า MC/PIC มาก สำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ SNR ต่ำๆ BER ของระบบ Bio/IC จะดีออกว่าเล็กน้อย และที่ SNR สูงกว่า 11 dB BER ของระบบ Bio/IC จะเริ่มดีกว่าอย่างชัดเจน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>ระบบ A (<math>A_0</math> มากพอ)</b> ในผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลาง BioMC/IC จะให้ผลทาง BER ที่ดีกว่า MC/PIC เล็กน้อย สำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ SNR ต่ำๆ BER ของระบบ BioMC/IC จะดีออกว่าเล็กน้อย แต่ที่ SNR สูงกว่า 11.5 dB BER ของระบบ BioMC/IC จะเริ่มดีกว่าเล็กน้อย</li> <li>● <b>ระบบ B (<math>A_0</math> จำกัด)</b> ในผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลาง BioMC/IC จะให้ผลทาง BER ที่ดีกว่า MC/PIC มาก สำหรับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง BER ของระบบ BioMC/IC จะดีออกว่าอย่างชัดเจนที่ SNR มากกว่า 7 dB และดีออกว่าเพียงเล็กน้อยที่ SNR ต่ำกว่า 7 dB</li> </ul>
ความต้านทาน ต่อปรากฏการณ์ ใกล้-ไกล	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>สัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ใช้อัตราต่ำ</b> จะส่งผลกระทบต่อระบบ Bio/IC มาก โดยเฉพาะผลแง่บวก (ขนาดสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำมีค่าต่ำ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>สัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ใช้อัตราต่ำ</b> จะส่งผลกระทบต่อระบบ BioMC/IC มากกว่าระบบ MC/PIC เล็กน้อย</li> </ul>

ตารางที่ 4.5 (ต่อ) ผลสรุปเปรียบเทียบระบบโดยรวม

	Bio/IC vs. MC/PIC	BioMC/IC vs. MC/PIC
ความต้านทานต่อปรากฏการณ์ไกล์-โกล (ต่อ)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>สัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ให้ข้อมูลอัตรากลาง</b> แทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ Bio/IC ทั้งในแง่บวกและแง่ลบ</li> <li>● <b>สัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ให้ข้อมูลอัตราสูง</b> จะส่งผลกระทบต่อระบบ Bio/IC ค่อนข้างมาก ทั้งในแง่บวกและแง่ลบ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>สัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ให้ข้อมูลอัตรากลาง</b> แทบจะไม่ส่งผลกระทบต่อระบบ BioMC/IC ทั้งในแง่บวกและแง่ลบ</li> <li>● <b>สัญญาณแทรกสอดที่เกิดจากผู้ให้ข้อมูลอัตราสูง</b> จะส่งผลกระทบต่อระบบ BioMC/IC มาก ทั้งในแง่บวกและแง่ลบ</li> </ul>
ความต้านทานต่อเฟดดิ้ง	เฟดดิ้งส่งผลกระทบต่อผู้ใช้แบบแผนไบออร์โทกอนอลในปริมาณมากจนทำให้ค่า BER ในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ค่อนข้างกว่าระบบ MC/PIC ในทุกกรณี ถึงแม้ว่า BER ในผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางจะยังคงดีกว่าก็ตาม	เฟดดิ้งส่งผลกระทบต่อผู้ใช้แบบแผนไบออร์โทกอนอลแบบหลายรหัสในปริมาณค่อนข้างมากจนทำให้ค่า BER ในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงของระบบ BioMC/IC ค่อนข้างกว่าระบบ MC/PIC ในกรณีที่ใช้ตัวขยายที่มีค่า $A_0$ มากพอ (ระบบ A) แต่ค่าดังกล่าวจะดีกว่าในกรณีที่ใช้ตัวขยายที่มีค่า $A_0$ จำกัด (ระบบ B) ที่ SNR มากกว่า 9 dB ในขณะที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางจะให้ผลใกล้เคียงกับระบบ MC/PIC
การส่งแบบอะซิงโครนัส	ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบทั้งสอง เมื่อใช้รหัสแบบสุ่มจำแนกผู้ใช้	ไม่ส่งผลกระทบต่อระบบทั้งสอง เมื่อใช้รหัสแบบสุ่มจำแนกผู้ใช้
ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้	เมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้ BER ของระบบ Bio/IC จะเพิ่มขึ้นช้ากว่าระบบ MC/PIC เล็กน้อย	เมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้ BER ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางในระบบ BioMC/IC จะเพิ่มขึ้นช้ากว่าระบบ MC/PIC เล็กน้อย แต่ BER ของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงในระบบ BioMC/IC จะเพิ่มขึ้นเร็วกว่าระบบ MC/PIC เล็กน้อย

การใช้ระบบที่ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอลในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงด้วยเครื่องรับที่เสนอ (Bio/IC) แทนระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมดที่ใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณรบกวนอย่างขนาน (MC/PIC) จะให้ผลทาง BER ที่ดีขึ้นอย่างชัดเจน แต่ทั้งนี้ระบบดังกล่าวจะต้องมีการจัดการกับการเฟดดิ้งของช่องสัญญาณรวมทั้งมีการควบคุมกำลังสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงอย่างดี ในขณะที่การใช้ระบบที่ใช้แบบแผนไบนารีทอคอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงด้วยเครื่องรับที่เสนอ (BioMC/IC) จะให้ผลที่ดีขึ้นในระดับหนึ่งเมื่อส่งผ่านช่องสัญญาณที่ปราศจากการเฟดดิ้ง และจะให้ผลที่ดีกว่าในบางช่วงของ SNR เมื่อส่งผ่านช่องสัญญาณที่มีการเฟดดิ้ง ทั้งนี้ระบบ BioMC/IC จะต้องมีการควบคุมกำลังสัญญาณของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงอย่างดี



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เสนอการนำแบบแผนไบออร์ทอคอนอลและแบบแผนไบออร์ทอคอนอลแบบหลายรหัสมาใช้แทนแบบแผนหลายรหัสเฉพาะผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงของระบบ DS-CDMA รหัสที่ใช้แบบแผนหลายรหัส นอกจากนี้ยังได้เสนอให้ใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานเป็นกลุ่มที่หักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางก่อนแล้วจึงป้อนกลับเพื่อหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง ซึ่งมีแนวคิดมาจากการใช้สัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอคอนอลและแบบแผนไบออร์ทอคอนอลแบบหลายรหัสส่งผลกระทบต่อผู้รับอื่นน้อย จึงทำให้การหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำและกลางมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งจะส่งผลให้การหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนานในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงมีประสิทธิภาพสูงตามไปด้วย นอกจากนี้ การใช้แบบแผนไบออร์ทอคอนอลและแบบแผนไบออร์ทอคอนอลแบบหลายรหัสในผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง จะช่วยลดค่ากำลังรวมสูงที่สุดที่อาจเกิดขึ้นได้ในสัญญาณผู้รับหนึ่งๆ ซึ่งจะช่วยลดความจำเป็นในการใช้ตัวขยายที่มีกำลังสูงที่สุดสูงๆ ที่ยากในการสร้างเพื่อใช้งานจริงลงไปได้

ในการทดสอบสมรรถนะ จะทำการเปรียบเทียบระบบที่เสนอกว่าคือระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอคอนอลที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (Bio) และระบบที่ใช้แบบแผนไบออร์ทอคอนอลแบบหลายรหัสที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง (BioMC) กับระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) โดยจะใช้เครื่องรับสองประเภท คือเครื่องรับแบบแมตซ์ฟิลเตอร์ (MF) และเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอด โดยเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่ใช้กับระบบที่เสนอจะมีลักษณะที่เน้นป้อนกลับเพื่อหักล้างสัญญาณแทรกสอดให้กับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงเป็นหลัก (IC) ส่วนเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่ใช้กับระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด (MC) จะใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดอย่างขนาน (PIC) การจำลองระบบจะทำการจำลองระบบเชื่อมโยงขาขึ้นผ่านช่องสัญญาณที่มีสัญญาณรบกวนแบบ AWGN โดยรหัสแม่ที่ใช้เกิดจากรหัสแบบสุ่มที่ใช้แบ่งแยกผู้ใช้คุณสมบัติข้อพิพาทเข้ากับรหัสตั้งฉากที่ใช้แบ่งสัญญาณย่อยในผู้รับเดียวกัน สำหรับการวัดสมรรถนะจะใช้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเป็นหลัก โดยทำการวัดสมรรถนะทั้งในกรณีที่มีการควบคุมกำลังแบบสมบูรณ์และกรณีที่การควบคุมกำลังแบบไม่สมบูรณ์ และอิทธิพลของเฟดดิ้งใน



ช่องสัญญาณ รวมทั้งผลของการส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัส และผลการทดสอบเมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้ในระบบ

ผลการจำลองระบบ สรุปได้ว่าการนำแบบแผนไบออร์ทอกอนอลหรือแบบแผนไบออร์ทอกอนอล-หลายรหัสมาใช้แทนแบบแผนหลายรหัสที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง เมื่อใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่เน้นหักล้างสัญญาณแทรกสอดให้กับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูง จะทำให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของผู้ใช้โดยรวมดีขึ้น โดยเฉพาะที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนสูงๆ ซึ่งค่าอัตราความผิดพลาดบิตดังกล่าวจะดีกว่าในระบบที่ใช้แบบแผนหลายรหัสทั้งหมด ถึงแม้ในกรณีที่ใช้ตัวขยายที่มีกำลังสูงที่สุดมากพอก็ตาม อย่างไรก็ตามการนำแบบแผนดังกล่าวมาใช้แทนแบบแผนหลายรหัสและใช้เครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอดที่เน้นหักล้างสัญญาณแทรกสอดให้กับผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงนั้น จะทำให้ความต้านทานต่อเฟดดิ้ง รวมทั้งความต้านทานต่อขนาดที่เพิ่มขึ้นของสัญญาณผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงลดลง สำหรับผลของอะซิงโครนัสพบว่าเมื่อทราบเวลาประวิงของผู้ใช้แต่ละราย ผลที่ได้ไม่แตกต่างจากในกรณีซิงโครนัส นอกจากนี้ผลการทดสอบเมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มจำนวนผู้ใช้ การเพิ่มขึ้นของ BER ในแต่ละระบบจะมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน

## 5.2 ข้อดี-ข้อเสียของการนำแบบแผนไบออร์ทอกอนอลหรือแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสมาใช้แทนแบบแผนหลายรหัสที่ผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงด้วยเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอด

### ข้อดี

- กำลังสูงที่สุดของสัญญาณไม่เพิ่มตามอัตราข้อมูล ทำให้สามารถใช้ตัวขยายสัญญาณที่มีกำลังสูงที่สุดที่ไม่สูงมากนักได้ รวมทั้งลดความผิดเพี้ยนแบบไม่เชิงเส้นที่เกิดจากตัวขยายสัญญาณ
- เนื่องจากกำลังสูงที่สุดของสัญญาณไม่เพิ่มตามอัตราข้อมูล ทำให้มีความเป็นไปได้ในการรองรับข้อมูลที่มีอัตราสูงขึ้นในอนาคต โดยปราศจากข้อจำกัดทางฮาร์ดแวร์ (hardware)
- สมรรถนะดีขึ้นในผู้ใช้ข้อมูลอัตราต่ำ และกลาง และสมรรถนะของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงดีขึ้นในช่วงที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าค่อนข้างสูง
- ต้านทานต่อปรากฏการณ์ใกล้-ไกลที่เกิดจากผู้ใช้อัตรากลางได้ดี

### ข้อเสีย

- สมรรถนะของผู้ใช้ข้อมูลอัตราสูงด้อยลงในช่วงที่อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำ
- ด้านทานต่อเฟดดิ้งของช่องสัญญาณได้น้อย ดังนั้นจึงต้องมีกรรมวิธีในการลดปัญหาที่เกิดจากเฟดดิ้งเข้าช่วย
- ไม่ด้านทานต่อปรากฏการณ์ใกล้-ไกลที่เกิดจากผู้ใช้อัตราสูง เนื่องจากปราศจากการหักล้างสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้อัตราสูงในผู้ใช้อัตราอื่น

### 5.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

งานที่ควรได้รับการพัฒนาต่อไป คือ

- 1) ศึกษา และพัฒนาแบบแผนหลายอัตราที่สามารถส่งสัญญาณที่กำลังไม่แปรตามอัตราข้อมูล ดังเช่นแบบแผนไบออร์โทกอนอลและแบบแผนไบออร์โทกอนอลแบบหลายรหัส ให้มีสมรรถนะสูงขึ้น และทนทานต่อสัญญาณรบกวน ตลอดจนเฟดดิ้งของช่องสัญญาณได้ดีขึ้น [54]
- 2) ศึกษากรรมวิธีอื่นๆ ที่ใช้แก้ปัญหากำลังสูงที่สุดที่สูงเกินไปในแบบแผนหลายรหัส เช่น วิธีพรีโค้ดดิ้ง (Precoding) [42] พรีดิสทอร์ชัน (Predistortion) [44] และวิธีการทำให้ขนาดสัญญาณของแบบแผนหลายรหัสคงที่ [44] เพื่อเป็นทางเลือกในการแก้ปัญหา
- 3) ศึกษา และพัฒนาเครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายรายที่มีสมรรถนะสูงกว่าเครื่องรับแบบหักล้างสัญญาณแทรกสอด เพื่อสมรรถนะของระบบที่ดีขึ้น
- 4) พัฒนาระบบหลายอัตราในที่นี้ ให้สามารถรองรับข้อมูลที่มีอัตราข้อมูลการเปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ ซึ่งเรียกระบบที่ผู้ใช้สามารถเปลี่ยนแปลงอัตราข้อมูลที่ส่งได้ว่า ระบบ CDMA แบบเปลี่ยนอัตราได้ (Variable rate CDMA) [35]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

1. Pahlavan, K., and Levesque, A. H. Wireless information networks New York: John Wiley & Sons, 1995.
2. Knisely, D. N., Kumar, S., and Laha, S. Evolution of wireless data services: IS-95 to cdma2000. IEEE Communications Magazine Vol. 36 No. 10 (October 1998): 140-149.
3. Adachi, F., Sawahashi, M., and Suda, H. Wideband DS-CDMA for next-generation mobile communications systems. IEEE Communications Magazine Vol. 36 No. 9 (September 1998): 56-69.
4. Verdu, S. Multiuser detection. Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
5. Moshavi, S. Multi-user detection for DS-CDMA communications. IEEE Communications Magazine (October 1996): 124-136.
6. Duel-Hallen, A., Holtzman, J., and Zvornar, Z. Multiuser detection for CDMA systems. IEEE Personal Communications Vol. 2 No. 2 (April 1995): 46-58.
7. Ojanpera, T. Overview of multiuser detection/interference cancellation for DS-CDMA. IEEE International Conference on Personal Wireless Communications (1997): 115-119.
8. Buehrer, R. M., Correal-Mendoza, N. S., and Woerner, B. D. A simulation comparison of multiuser receivers for cellular CDMA. IEEE Transactions on Vehicular Technology Vol. 49 No. 4 (July 2000): 1065-1085.
9. Verdu, S. Minimum probability of error for asynchronous gaussian multiple-access channels. IEEE Transactions on Information Theory Vol. 32 No. 1 (January 1986): 85-96.
10. Lupas, R., and Verdu, S. Linear multiuser detectors for synchronous code-division multiple-access channels. IEEE Transactions on Information Theory Vol. 35 No. 1 (January 1989): 123-136.
11. Lupas, R., and Verdu, S. Near-far resistance of multiuser detectors in asynchronous channels. IEEE Transactions on Communications Vol. 38 No. 4 (April 1990): 496-508.
12. Chen, J., and Mitra, U. Analysis of decorrelator-based receivers for multirate DS/CDMA communications. IEEE Transactions on Vehicular Technology Vol. 48 No. 6 (November 1999): 1966-1983.
13. Xie, Z., Short, R. T., and Rushforth, C. K. A family of suboptimum detectors for coherent multiuser communications IEEE Journal on Selected Areas in Communications Vol. 8 No. 4 (May 1990): 683-690.

14. สุวิรัช คุณารัตนพฤกษ์. เทคนิคการลดความซับซ้อนในเครื่องรับที่ใช้การปรับตัวแบบบอดด้วยขั้นตอนลิเนียร์รีคอนสเตรนคอนแอสแตนต์มอดูลัส. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
15. สุวิรัช คุณารัตนพฤกษ์, เพ็ชรพร หลินประเสริฐ และสมชาย จิตะพันธ์กุล. การปรับปรุงอัตราการใช้โครงข่ายแบบลดความซับซ้อนของเครื่องรับชนิดทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าผิดพลาดต่ำที่สุดในระบบการใช้ช่องสัญญาณร่วมกันแบบแบ่งรหัส. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ปีที่ 22 (ธันวาคม 2542): 509-512.
16. Kunaruttanapruk, S., Jitapunkul, S., Kaweevat, V., and Linprasert, P. Transformation searching algorithm for partially adaptive linearly constrained structure DS-CDMA receiver. IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS 2000) Vol. 2 (November 2000): 811-814.
17. Varanasi, M. K., and Aazhang, B. Multistage detection in asynchronous code-division multiple-access communications. IEEE Transactions on Communications Vol. 38 No. 4 (April 1990): 509-519.
18. Sinthusak, J., Jitapunkul, S., and Kaweevat, V. Hybrid interference cancellation using partial cancellation technique in CDMA system. Electrical Engineering Conference (EECON-23) Vol. 1 (November 2000): 533-536.
19. Patel, P., and Holtzman, J. Analysis of a simple successive interference cancellation scheme in a DSCDMA system. IEEE Journal on Selected Areas in Communications Vol. 12 No. 5 (June 1994): 796-807.
20. Holtzman, J. M. Successive interference cancellation for direct sequence code division multiple access. Military Communications Conference (MILCOM) (1994): 997-1001.
21. Duel-Hallen, A. Decorrelating decision-feedback multiuser detector for synchronous code-division multiple-access channel. IEEE Transactions on Communications Vol. 41 No. 2 (February 1993): 285-290.
22. เพ็ชรพร หลินประเสริฐ. มัลติยูสเซอร์ดีเทคชันแบบป้อนกลับที่ใช้กระบวนการปรับอัตโนมัติชนิดบอดสำหรับระบบการสื่อสารแบบแบ่งแยกด้วยรหัสชนิดไคเรกซ์ซีเควนซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

23. เพียรพร หลินประเสริฐ, สุวิรัช คุณารัตนพุกภัย และสมชาย จิตะพันธ์กุล. มัลติยูสเซอร์ดีเทคชันแบบป้อนกลับชนิดไครเทรอนิ่งซีแควนซ์สำหรับระบบการใช้ช่องสัญญาณร่วมกันแบบแบ่งรหัส. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ปีที่ 22 (ธันวาคม 2542): 505-508.
24. Linprasert, P., Jitapunkul, S., Kaweevat, V., and Kunaruttanapruk, S. Blind adaptive decorrelating decision-feedback multiuser detection for DS-CDMA system. Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC) Vol. 1 (November 2000): 412-417.
25. Honig, M., Madhow, U., and Verdu, S. Blind adaptive multiuser detection. IEEE Transactions on Information Theory Vol. 41 No. 4 (July 1995): 944-960.
26. Woodward, G., and Vucevic, B. S. Adaptive detection for DS-CDMA. Proceedings of the IEEE Vol. 86 No. 7 (July 1998): 1413-1434.
27. Ottosson, T., and Svensson, A. Multi-rate schemes in DS/CDMA systems. Vehicular Technology Conference Vol. 2 (1995): 1006-1010.
28. Juntti, M. J. System concept comparisons for multirate CDMA with multiuser detection. Vehicular Technology Conference Vol. 1 (1998): 36-40.
29. Azad, H., and Aghvami, A. H. Multirate spread spectrum direct sequence CDMA techniques. Spread Spectrum Techniques for Radio Communications Systems, IEE Colloquium (1994): 4/1-4/5.
30. วรวิทย์ กวีวัจน์. มัลติยูสเซอร์ดีเทคชันแบบนำข้อมูลที่ตัดสินแล้วมาป้อนกลับที่ใช้กระบวนการปรับอัตราโน้ตซีแควนซ์สำหรับระบบสื่อสารแบบแบ่งแยกด้วยรหัสชนิดไครเทรอนิ่งซีแควนซ์แบบหลายอัตรา. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
31. Kaweevat, V., Jitapunkul, S., and Kunaruttanapruk, S. Blind adaptive decorrelating decision-feedback multiuser detection for multirate synchronous DS/CDMA communications. Electrical Engineering Conference (EECON-23) Vol. 1 (November 2000): 537-540.
32. Kaweevat, V., Jitapunkul, S., Archavawanitchakol, C., Wanichpakdeedecha, S., and Rasrikiangkrai, N. Blind adaptive decorrelating decision-feedback multiuser detection for multirate synchronous DS/CDMA communications. The Third IEEE Signal Processing Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC) (March 2001).
33. I, C., and Gitlin, R. D. Multi-code CDMA wireless personal communications networks. IEEE International Conference on Communications (ICC) Vol. 2 (1995): 1060-1064.



34. Kuganesan, P., Letaief, K. B., and Chen, Y. Multicode modulation for high-speed wireless data transmission. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) Vol. 2 (1997): 457-461.
35. Chang, P. R., and Lin, C. F. Design of spread spectrum multicode CDMA transport architecture for multimedia services. IEEE Journal on Selected Areas in Communications Vol. 18 No. 1 (January 2000): 99-111.
36. Zhang, R., Tjhung, T. T., Zhang, H. B., and He, P. BER performance comparison of single code and multicode DS/CDMA channelization schemes for high rate data transmission. IEEE Communications Letters Vol. 5 No. 2 (February 2001): 67-69.
37. Chan, M., and Chuang, J. Multicode high-speed transmission with interference cancellation for wireless personal communications. Vehicular Technology Conference Vol. 2 (1996): 661-665.
38. Chan, M., and Chuang, J. The effects of delay spread on multicode interference cancellation. Vehicular Technology Conference Vol. 3 (1997): 2153-2157.
39. Clark, M. V. Linear receivers for spread spectrum communication over multipath dispersive channels. Global Telecommunications Conference (Globecom) Vol. 1b (1999): 837-841.
40. Ulukus, S., Biglieri, E., and Win, M. Z. Optimum modulation and multicode formats in CDMA systems with multiuser receivers. INFOCOM 2001 Vol. 1 (2001): 395-402.
41. Guo, Z., and Letaief, K. B. Performance of VSG-CDMA and MC-CDMA in multirate systems. Vehicular Technology Conference (VTC) Vol. 1 (2001): 501-505.
42. Ottosson, T., and Palenius, T. The impact of using multicode transmission in the WCDMA system. Vehicular Technology Conference Vol. 2 (1999): 1550-1554.
43. Guo, N., and Milstein, L. B. The impact of nonlinear amplification on multi-code CDMA systems. IEEE International Conference on Communications (ICC) Vol. 2 (2000): 1034-1038.
44. Guo, N., and Milstein, L. B. Uplink performance evaluation of multicode DS/CDMA systems in the presence of nonlinear distortions. IEEE Journal on Selected Areas in Communications Vol. 18 No. 8 (August 2000): 1418-1428.
45. Ziemer, R. E., and Harvatin, D. T. An overview and characterization of multirate schemes for future-generation wireless systems. IEEE Sixth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Vol. 2 (2000): 550-554.



46. Peterson, R. L., Ziemer, R. E., and Seoane, J. L. Biorthogonal multicode modulation for high-rate high-reliability personal communications requiring controlled peak-to-average transmit power ratio. International Zurich Seminar on Broadband Communications (2000): 263-270.
47. Parkvall, S. Variability of user performance in cellular DS-SS-SSMA - long versus short spreading sequences. IEEE Transactions on Communications Vol. 48 No. 7 (July 2000): 1178-1187.
48. Dinan, E. H., and Jabbari, B. Spreading codes for direct sequence CDMA and wideband CDMA cellular networks. IEEE Communications Magazine Vol. 36 No.9 (September 1998): 48-54.
49. Hui, A. L. C., and Letaief, K. B. Successive interference cancellation for multiuser asynchronous DS-SS-SSMA detectors in multipath fading links. IEEE Transactions of Communications Vol. 46 No. 3 (March 1998): 384-391.
50. Sklar, B. Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems part I: Characterization. IEEE Communication Magazine (July 1997): 90-100.
51. Sklar, B. Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems part II: Mitigation. IEEE Communication Magazine (July 1997): 102-109.
52. Kaneyama, F., Sekiguchi, K., Okano, Y., Fujita, Y., and Oosawa, O. Power amplifier for CDMA (Vol. 63 No.158) [Online]. 1997. Available from:  
<http://www.obd.com/oki/otr/html/nf/otr-158-16.html>[2001,Nov21]
53. Triquint Semiconductor TQM7136-preliminary data sheet [Online]. 2001. Available from:  
<http://www.triquint.com/Wireless/Products/TQM7136/TQM7136.pdf>[2001,Nov21]
54. Kim, S. I., and Lee, H. S. Performance improvement of RAKE receiver for a multicode DS-SS-SSMA system with multistage interference cancellation detectors. IEEE Region 10 Conference Vol. 1 (1999): 573-576.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## ผลงานของผู้เขียนที่ได้รับการตีพิมพ์แล้ว

1. Wanichpakdeedecha, S., Jitapunkul, S., Kunaruttanapruk, S., Archavawanichakul, and Rasikriangkrai, N. Multicode decorrelator multirate DS-CDMA systems. Electrical Engineering Conference (EECON-24) (November 2001): 1138-1141.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## Multicode Decorrelator Multirate DS-CDMA Systems

Seree Wanichpakdeedecha, Somchai jitapunkul, Suwich Kunaruttanapruk,  
Choosak Archavawanichakul and Nattapron Rasrikiangkrai  
Digital Signal Processing Research Laboratory, Department of Electrical Engineering,  
Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand 10330.  
Phone (662) 218-6915, Fax (662) 218-6912, E-mail: [jomchai@chula.ac.th](mailto:jomchai@chula.ac.th)

### Abstract

A dual rate synchronous DS-CDMA system which is composed of two different data rates is considered. Up till now, a multirate multicode scheme and multi-spreading factor scheme are the two most interest schemes for supporting multi data rate systems. However, conventional receivers of both schemes are easily suffered from multiple access interference (MAI). Low-rate decorrelator (LRD) is previously proposed to the multi-spreading factor scheme to reduce MAI. This paper applies a decorrelator to multicode scheme, which has a same level in complexity as that of LRD but has a trend to yield better performance than that of LRD. Simulation results show that the multicode decorrelator outperforms the LRD.

**Keywords** : DS-CDMA, multiple access interference (MAI), multirate, multicode, multicode decorrelator, multi-spreading factor, low-rate decorrelator (LRD)

### I. Introduction

In terms of multiple access techniques, direct sequence code-division multiple access (DS-CDMA) has gained worldwide attention in recent years as a promising technology for providing multiuser access in wireless mobile networks. Unfortunately, conventional CDMA easily suffers from multiple access interference (MAI) which has much influence in the case with a difference in power of each user (called near-far effect). This effect significantly degrades the capacity of CDMA systems. For this reason, multiuser detectors (MUD) [1,2] were developed for reduction in MAI. One of the most popular MUD, decorrelator, is focused in this paper because of the ability in MAI reduction.

The third generation mobile communication system is expected to integrate several kinds of communication services such as voice, data, and video. Therefore, it needs to support a wide range of user data rates. Many multirate CDMA schemes are introduced [3]. Among these, multi-spreading factor scheme and multicode scheme have gained the most interest in that their ability in supporting multirate [4]. In the first scheme, only one code is used for each user. Thus, if the data rate of high-rate user's signal is M times that of low-rate user's, the spreading factor of a high-rate user is M times lower than that of a low-rate user. This results in degradation in performance of this scheme, especially in the system which has a wide range of data rate. In later scheme [5-6], many codes are used for each user.

The number of codes used in high rate user is equal to a ratio of data rate of high rate user to that of low rate user. Therefore, spreading factors of high-rate users are equal to those of low-rate-user. However, the additive codes (channels) in this scheme are make an influence as the addition in users in the system. This drawback degrades the capacity of the system.

In this paper, the decorrelator for multicode scheme is proposed to improve the performance in multirate multicode scheme. Besides, low-rate decorrelator (LRD) [7], a great performance decorrelator in multi-spreading factor scheme, is reviewed to compare the performance with. This paper is organized as follows. The conventional multicode scheme and multi-spreading factor scheme are summarized in Section II. The LRD is mentioned in Section III. In Section IV, the proposed multicode decorrelator is introduced. Finally, simulation results of bit error rate comparing multicode decorrelator with LRD and a conventional multicode receiver in dual-rate system and the conclusion are given in Section V and Section VI, respectively.

### II. Multirate scheme

For simplicity, this paper will consider a dual-rate system, which is composed of only two-data-rate streams: high-rate streams and low-rate streams, and a results are expected to be the same in any n-rate systems. In dual-rate CDMA system, low-rate users transmit one bit while high-rate users transmit M bits.

#### A. Multicode scheme

In a spreading process, a data stream of a high-rate user is split into M sub data streams (M channels) which have a bit rate equal to that of low-rate data streams. Then, each of them is spread with a different code, which generally is an orthogonal code. After that, all of them are spread with a user division code, which usually is a long PN code, for dividing the data streams of this user from those of other users [5-6], and summed together and transmitted. Note that the length of long PN code and orthogonal code should be relatively prime [6]. The  $m$ th spread signal of a  $k$ th user for high-rates users and the spread signal for low-rate users are expressed as

$$\left. \begin{aligned} s_{k,L}(t) &= A_{k,L} a_{k,L}^j(t) b_{k,L}^j \\ s_{km,H}(t) &= A_{k,H} a_{km,H}^j(t) b_{km,H}^j \end{aligned} \right| \quad (1)$$

where  $A_k$  represents the signal amplitude of  $k$ th user of each data rate.  $b_{k,L}$  and  $b_{km,H}$  represent data bit of  $k$ th low-rate user and data bit of  $m$ th channel in  $k$ th high-rate user, respectively.  $a_{k,L}^j$  is  $j$ th interval of a code  $a_{k,L}$  which is the code of  $k$ th low-rate user.  $a_{km,H}^j$  is  $j$ th interval of a code  $a_{km,H}$  that is projected on  $j$ th bit of  $m$ th channel of  $k$ th high-rate user. The  $a_{km,H}$  results from multiplying a  $k$ th user's PN code with a  $m$ th channel's orthogonal code. Where there are  $K$  users, composed of  $K_L$  low-rate users and  $K_H$  high-rate users, in the system and  $M$  sub data streams for a high-rate user, the received signal which is composed of desire signal with additive white gaussian noise (AWGN,  $n(t)$ ) can be written as

$$r(t) = \sum_{k=1}^{K_H} \sum_{m=1}^M s_{km,H}(t) + \sum_{k=1}^{K_L} s_{k,L}(t) + n(t) \quad (2)$$

A matched filter is used to detect desired data bits in each data stream. The output data bits of matched filters are defined as

$$\underline{y} = [y_{1,L}, \dots, y_{K_L,L}, y_{1,H}, \dots, y_{1M,H}, \dots, y_{K_H,1,H}, \dots, y_{K_H,M,H}]^T \quad (3)$$

with the output bit for code  $a_{km}$  is

$$\begin{aligned} y_{k,L} &= \int_{jT_L}^{(j+1)T_L} r(t) a_{k,L}^j(t) dt \\ y_{km,H} &= \int_{jT_L}^{(j+1)T_L} r(t) a_{km,H}^j(t) dt \end{aligned} \quad (4)$$

where  $T_L$  is low rate bit interval. In matrix form, the output is in term of cross correlation of spreading code  $a_{km}^j(t)$  ( $\Gamma$ ) as

$$\underline{y} = \Gamma \Lambda \underline{b} + N \quad (5)$$

where

$$\underline{b} = \left[ \underbrace{b_{1,L}, b_{2,L}, \dots, b_{K_L,L}}_{[0, T_L]}, \underbrace{b_{1,H}, \dots, b_{1M,H}, \dots, b_{K_H,1,H}, \dots, b_{K_H,M,H}}_{[0, T_H]} \right]^T \quad (6)$$

$\Lambda$  is a diagonal amplitude matrix which has diagonal elements as

$$[A_{1,L}, \dots, A_{K_L,L}, \underbrace{A_{1,H}, \dots, A_{1,H}}_M, \dots, \underbrace{A_{K_H,H}, \dots, A_{K_H,H}}_M]^T \quad (7)$$

Finally, data bits are detected by

$$\hat{\underline{b}} = \text{sgn}(\underline{y}) \quad (8)$$

## B. Multi-spreading factor scheme

In this scheme, a high-rate data bit is spread by a code which has  $T_H$  interval,  $1/M$  times the interval of low-rate spreading code. The receive signal with considering on one low-rate interval is

$$\tilde{r}(t) = \sum_{k=1}^{K_L} A_{k,L} b_{k,L} c_{k,L}(t) + \sum_{k=1}^{K_H} \left( \sum_{m=1}^M A_{k,H} b_{km,H}(t + (m-1)T_H) c_{k,H}(t) \right) + n(t) \quad (9)$$

where  $A_k$  represents the received amplitude for  $k$ th user of each rate.  $b_{k,L}$  and  $b_{km,H}$  are  $T_L$  interval low-rate bit and  $m$ th  $T_H$  interval high-rate bit, respectively.  $c_{k,L}$  and  $c_{k,H}$  are the spreading code of  $k$ th user of each rate.

The matrix form of output signal after despreading at matched filter is

$$\tilde{\underline{y}} = \Gamma \Lambda \tilde{\underline{b}} + N \quad (10)$$

The cross correlation matrix is involved with spreading code  $c_{k,L}$  and  $c_{k,H}$  and data bit matrix is

$$\tilde{\underline{b}} = \left[ \underbrace{b_{1,L}, b_{2,L}, \dots, b_{K_L,L}}_{[0, T_L]}, \underbrace{b_{1,H}, \dots, b_{1M,H}, \dots, b_{K_H,1,H}, \dots, b_{K_H,M,H}}_{[0, T_H]} \right]^T \quad (11)$$

## III. Low-Rate Decorrelator (LRD)

In the multi-spreading factor scheme, in one low-rate interval high-rate users can transmit  $M$  bits in one stream. When using LRD receiver,  $M$  bits in the data stream are equivalent to  $M$  virtual low-rate users. The spreading code for  $m$ th virtual user of  $k$ th high-rate user is

$$\tilde{c}_{km,H}(t) = c_{km,H}(t) : (m-1)T_H \leq t \leq mT_H \quad \left| \begin{array}{l} \\ = 0 \quad \text{:elsewhere} \end{array} \right. \quad (12)$$

From equation (5),  $\Gamma$  is replaced by  $\Gamma_{LRD}$  which

is

$$\Gamma_{LRD} = \begin{bmatrix} \Gamma_{LL} & \Gamma_{LH}^{(1)} & \Gamma_{LH}^{(2)} & \dots & \Gamma_{LH}^{(K_H)} \\ \Gamma_{HL}^{(1)} & \Gamma_{HH}^{(1)} & 0 & \dots & 0 \\ \Gamma_{HL}^{(2)} & 0 & \Gamma_{HH}^{(2)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Gamma_{HL}^{(K_H)} & 0 & 0 & \dots & \Gamma_{HH}^{(K_H)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

where



$$\left[ \Gamma_{LL} \right]_{i,j} = \int_0^{T_L} c_{i,L}(t) c_{j,L}(t) dt \quad (14)$$

$$\left[ \Gamma_{LH}^{(k)} \right]_{i,m} = \int_0^{T_L} c_{i,L}(t) \tilde{c}_{km,H}(t) dt = \left[ \Gamma_{HL}^{(k)} \right]_{m,i} \quad (15)$$

$$\left[ \Gamma_{HH}^{(k)} \right]_{n,m} = \int_0^{T_L} \tilde{c}_{kn,H}(t) \tilde{c}_{km,H}(t) dt \quad (16)$$

Let  $\tilde{\underline{z}}$  be the output of LRD, yielded from multiply  $\Gamma_{LRD}^{-1}$  to both sides of equation (5)

$$\tilde{\underline{z}} = \Gamma_{LRD}^{-1} \tilde{\underline{y}} = \Lambda \tilde{\underline{b}} + \Gamma_{LRD}^{-1} N \quad (17)$$

By replacing  $\underline{y}$  in (8) by  $\tilde{\underline{z}}$ , data bits are detected.

With the MAI cancellation in equation (17), the LRD has great performance with rather high complexity due to high dimension of correlation matrix. In next Section, the decorrelator is introduced in multicode scheme.

#### IV. Multicode Decorrelator (MCD)

As mentioned in Section II, the output matrix of multicode matched filter is term of the cross correlation matrix (5) which results in reduction in performance of system. With the same method as LRD in finding the inverse correlation matrix, to eliminate cross correlation term, correlation matrix for multicode is defined as

$$\Gamma_{MCD}(j) = \begin{bmatrix} \Gamma_{LL}^{(j)} & \Gamma_{LH}^{(j)} \\ \Gamma_{HL}^{(j)} & \Gamma_{HH}^{(j)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

where

$$\left[ \Gamma_{LL}^{(j)} \right]_{i,j} = \int_{jT_L}^{(j+1)T_L} a_{i,L}^{(j)}(t) a_{j,L}^{(j)}(t) dt \quad (19)$$

$$\left[ \Gamma_{LH}^{(j)} \right]_{i,M(k-1)+m} = \int_{jT_L}^{(j+1)T_L} a_{i,L}^{(j)}(t) a_{km,H}^{(j)}(t) dt \quad (20)$$

$$= \left[ \Gamma_{HL}^{(j)} \right]_{M(k-1)+m,i}$$

$$\left[ \Gamma_{HH}^{(j)} \right]_{M(p-1)+n, M(k-1)+m} = \int_{jT_L}^{(j+1)T_L} a_{pn,H}^{(j)}(t) a_{km,H}^{(j)}(t) dt \quad (21)$$

After multiplying  $\Gamma_{MCD}^{-1}(j)$  to both sides of equation (5), the output of multicode decorrelator is

$$\underline{z} = \Gamma_{MCD}^{-1}(j) \underline{y} = \Lambda \underline{b} + \Gamma_{MCD}^{-1}(j) N \quad (22)$$

By replacing  $\underline{y}$  in (8) by  $\underline{z}$ , data bits are detected.

The multicode decorrelator yields the same level of complexity as LRD with advantage in performance because of its longer non-zero spreading code in high-rate user and equality in power of different data-rate signal. Moreover, the fact that the correlation matrix in multicode decorrelator has almost all non-zero elements makes it provides more ability to reduce MAI better than LRD whose matrix has many zero elements.

#### V. Simulation Results

The results comparing bit error rate (BER) among the system receiver as conventional multicode receiver, conventional multi-spreading factor receiver, LRD and multicode decorrelator are presented in this section. We consider a small system that has two low-rate users and two high-rate users with 4 times more in data-rate ( $M=4$ ). BER is measured in 5,000 data bits for a low-rate user, which 20,000 data bits are transmitted for a high-rate user. For simplicity, 16 bits short random codes are generated to be used as signature codes and the perfect power control is held in the system. The simulation is carried in multipath fading with an additive white gaussian noise environment.

For low-rate users (fig. 1), even just a little better in conventional multicode receiver performance compared with conventional multi-spreading factor receiver, the performance of multicode decorrelator is clearly greater than that of LRD, especially in high SNR (low noise environment). However, for high-rate users (fig. 2), the performance of multicode decorrelator and LRD are almost identical.

#### VI. Conclusion

In this paper, we have proposed a multicode decorrelator to reduce MAI in the multirate multicode system. Besides, LRD which is the great performance receiver in multi-spreading factor scheme, another appreciating multirate scheme, is compared with. The simulation results illustrate that multicode decorrelator has an outstanding performance when compared with the conventional multicode. Besides, multicode decorrelator outperforms the LRD in MAI reduction with an equal level in complexity.

#### References

- [1] Verdu, S., *Multisuser detection*, Cambridge university press, UK, 1998.
- [2] Dual-Hallen, A., Holtzman, J., and Zvonar, Z., "Multiuser Detection for CDMA Systems," *IEEE personal communications*, April 1995, pp. 46-58.
- [3] Ottosson, T., and Svenson, A., "Multi-rate schemes in DS/CDMA systems," *Vehicular technology conference*, Vol. 2, 1995, pp. 1006-1010.



- [4] Zhang, R., Tjhung, T.T., Zhang, B., and He, P., "BER performance comparison of single code and multicode DS/CDMA channelization schemes for high rate data transmission," *IEEE communication letters*, Vol. 5, No. 2, Feb. 2001, pp. 67-69.
- [5] Lin, I., C., and Gitlin, R., D., "Multi-Code CDMA Wireless Personal Communications Networks," *IEEE international conference on communications*, Vol. 2, 1995, pp. 1060-1064.
- [6] Chang, P., R., and Lin, C., F., "Design of spread spectrum multicode CDMA transport architecture for multimedia services," *IEEE journal on selected areas in communications*, Vol. 18, No. 1, Jan. 2000, pp. 99-111.
- [7] Chen, J., and Mitra, U., "Analysis of Decorrelator-Based Receivers for Multirate DS/CDMA Communications," *IEEE transactions on vehicular technology*, Vol. 48, No. 6, Nov. 1999, pp.1966-1983.

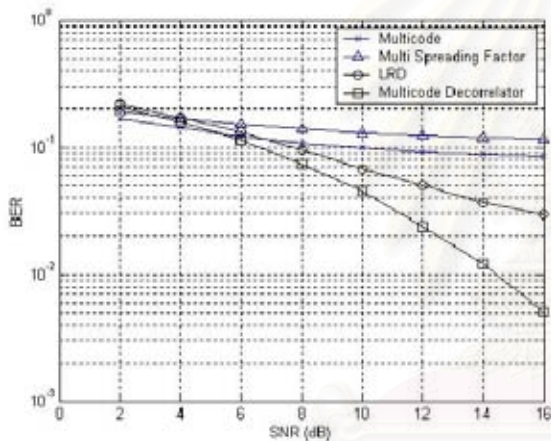


Fig. 1. BER comparison in low-rate users

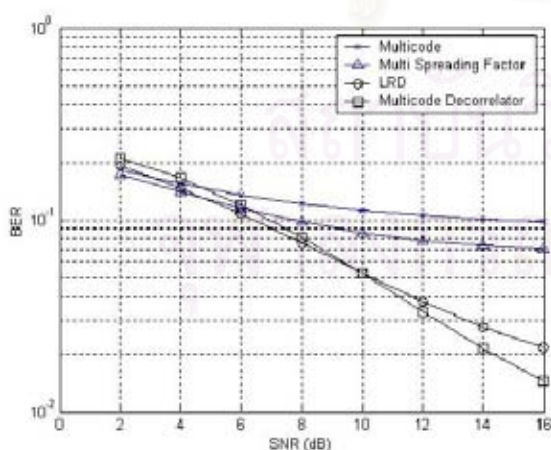


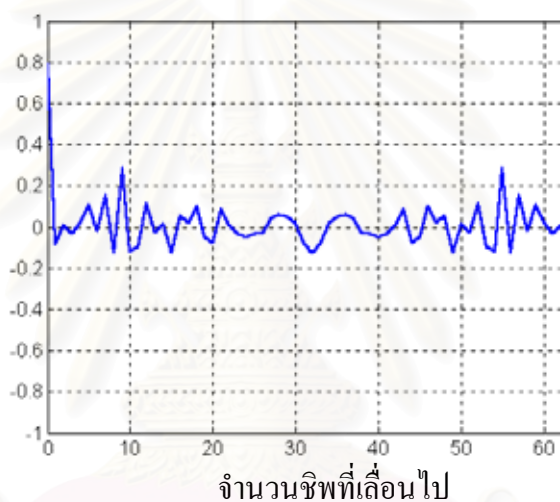
Fig. 2. BER comparison in high-rate users

## ภาคผนวก ข

### รหัสที่ใช้ในการวิจัย

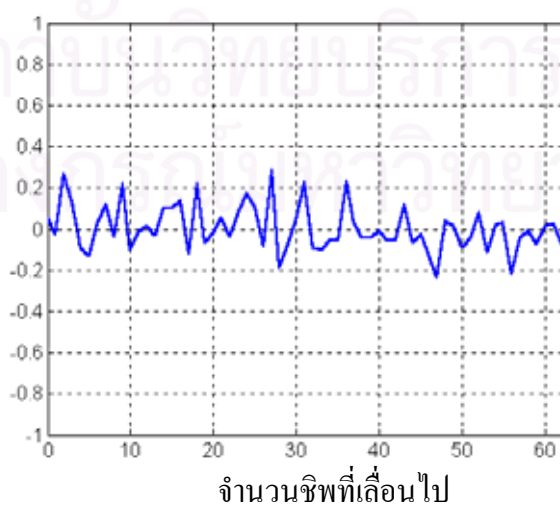
รหัสสำหรับแบบแผนหลายรหัส แบบแผนไบออร์ทอกอนอล และแบบแผนไบออร์ทอกอนอลแบบหลายรหัสจะได้จากการคูณแบบซิปต่อซิประหว่างรหัสแบ่งแยกผู้ใช้และรหัสแบ่งแยกสัญญาณย่อยซึ่งเป็นรหัสตั้งฉาก

#### ออสทสัมพันธ์



รูปที่ ข.1 ตัวอย่างออสทสัมพันธ์ของรหัสแบบสุ่ม

#### สหสัมพันธ์ข้าม



รูปที่ ข.2 ตัวอย่างสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแบบสุ่ม

รหัสแบ่งแยกผู้ใช้สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะเป็นรหัสแบบสุ่มที่มีความยาวเท่ากับ 64 บิต ทั้งนี้รหัสแบบสุ่มจะมีอัตราสัมพันธ์และสหสัมพันธ์ข้ามดังรูปที่ ข1 และ ข2 ตามลำดับ โดยจะเห็นว่าค่าอัตราสัมพันธ์จะเท่ากับ 1 เมื่อไม่มีการประวิงเวลา และจะมีค่าค่อนข้างต่ำเมื่อมีการประวิงเวลา สำหรับค่าสหสัมพันธ์ข้ามจะมีค่าค่อนข้างต่ำทั้งในสถานะที่มีการประวิงเวลาและสถานะที่ไม่มีการประวิงเวลา

รหัสตั้งฉากที่ใช้สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะเป็น Hadamard-Walsh Code ที่มีความยาวเท่ากับ 64 บิต โดยมีตัวอย่างอัตราสัมพันธ์และสหสัมพันธ์ข้ามดังรูปที่ 2.1 และ 2.2 ในบทที่ 2 ตามลำดับ

รหัสที่ได้จากการคูณกันแบบบิตต่อบิตของรหัสแบบสุ่มและรหัสตั้งฉากจะมีสมบัติทางสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างผู้ใช้เช่นเดียวกับสมบัติทางสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแบบสุ่ม และจะมีสมบัติทางสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างสัญญาณย่อยของแบบแผนหลายรหัสในผู้ใช้รายเดียวกันเช่นเดียวกับสมบัติทางสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสตั้งฉาก



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเสรี วัฒนภักดีเดชา เกิดวันที่ 9 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2523 ที่กรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2543 ในระหว่างการศึกษาระดับมหาบัณฑิตนี้ได้รับทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์จากทบวงมหาวิทยาลัย



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย