การปรับปรุงวิธีการหักล้างสัญญาณแทรกสอดแบบวนซ้ำชนิดซอฟต์
สำหรับระบบซีดีเอ็มเอแบบซิงโครนัสที่ใช้รหัสเทอร์โบ

นางสาวพัชรี เทพนิมิตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1912-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

AN IMPROVEMENT OF ITERATIVE SOFT INTERFERENCE CANCELLATION
FOR TURBO-CODED SYNCHRONOUS CDMA SYSTEM

Miss Phatcharee Thepnimit

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 2002

ISBN 974-17-1912-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การปรับปรุงวิธีการหักล้างสัญญาณแทรกสอดแบบวนซ้ำชนิดซอฟต์ สำหรับระบบซีดีเอ็มเอแบบซิงโครนัสที่ใช้รหัสเทอร์โบ
โดย	นางสาวพัชรี เทพนิมิตร
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

………………………………………….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…………………………………………… ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ประพิณมงคลการ)

………………………………………….. อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ)

……………………………………………กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วาทิต เบญจพลกุล)

……………………………………………กรรมการ
(อาจารย์ สุวิทย์ นาคพีระยุทธ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พัชรี เทพนิมิตร : การปรับปรุงวิธีการหักล้างสัญญาณแทรกสอดแบบวนซ้ำชนิดซอฟต์สำหรับระบบซีดีเอ็มเอแบบซิงโครนัสที่ใช้รหัสเทอร์โบ. (AN IMPROVEMENT OF ITERATIVE SOFT INTERFERENCE CANCELLATION FOR TURBO-CODED SYNCHRONOUS CDMA SYSTEM) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ, 83 หน้า. ISBN 974-17-1912-4.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ โดยใช้เครื่องรับแบบวนซ้ำที่มีความซับซ้อนต่ำ ซึ่งโครงสร้างการทำงานแบบวนซ้ำในเครื่องรับนั้น เกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่าง ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนชนิดไม่เชิงเส้นแบบซอฟต์อินพุตซอฟต์เอาต์พุต กับชุดของตัวถอดรหัสช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้คนเดียว ในส่วนของดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนนั้น จะใช้ประโยชน์จากค่าความน่าจะเป็นเบื้องแรกของผู้ใช้แต่ละคนนำมาทำการประมาณค่าบิตแบบซอฟต์ เพื่อใช้ในการขจัดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทางออกไป ส่วนตัวถอดรหัสช่องสัญญาณ ในที่นี้จะใช้ตัวถอดรหัสเทอร์โบ ทำหน้าที่สร้างค่าความน่าจะเป็นเบื้องหลังส่งออกมา เพื่อนำมาป้อนกลับให้ดีเทกเตอร์สำหรับใช้งานในรูปของความน่าจะเป็นเบื้องแรก งานหลักในการปรับปรุงสมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบอยู่ที่การดัดแปลงอัลกอริทึมในการประมาณค่าบิตแบบซอฟต์สำหรับใช้งานในดีเทกเตอร์ ซึ่งในที่นี้เสนอให้การประมาณค่าบิตแบบซอฟต์ได้มาจากข้อมูลของสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ และนำค่าบิตประมาณในรอบที่แล้วมาเป็นข้อมูลเพิ่มเติม สำหรับใช้ในการประมาณค่าสัญญาณแทรกสอด จากผลการจำลองระบบแสดงให้เห็นว่า เครื่องรับที่เสนอนี้สามารถทำงานได้ดีแม้ช่องสัญญาณจะมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ โดยเมื่อค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่มีค่าต่ำถึงปานกลาง เครื่องรับดังกล่าวสามารถทำให้สมรรถนะมีค่าเข้าใกล้กรณีที่ระบบมีผู้ใช้เพียงคนเดียว และเมื่อค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่มีค่าสูง ตัวประมาณค่าบิตที่เสนอนี้สามารถให้สมรรถนะดีกว่าตัวประมาณค่าบิตแบบเดิม

ภาควิชา......วิศวกรรมไฟฟ้า...... ลายมือชื่อนิสิต..............................

สาขาวิชา......วิศวกรรมไฟฟ้า...... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..............................

ปีการศึกษา......2545......

4370414021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD : ITERATIVE MULTIUSER DETECTION / TURBO-CODED CDMA / TURBO CODES / SOFT INTERFERENCE CANCELLATION

PHATCHAREE THEPNIMIT : THESIS TITLE. (AN IMPROVEMENT OF ITERATIVE SOFT INTERFERENCE CANCELLATION FOR TURBO-CODED SYNCHRONOUS CDMA SYSTEM) THESIS ADVISOR : ASST. PROF. LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ Ph.D., 83 pp. ISBN 974-17-1912-4.

In this thesis, the performance improvement of turbo-coded CDMA system with a low-complexity iterative receiver is proposed. A soft-input soft-output nonlinear multiuser detector is combined with a set of single-user channel decoders in an iterative detection / decoding structure. The nonlinear multiuser detector utilizes the prior probabilities of each user 's bits to form soft estimates used for multiple-access interference cancellation. The channel decoders perform turbo-code decoding and produce posterior probabilities which are fed back to the multiuser detector for use as prior probabilities. The main task in improving the performance of turbo-coded CDMA system is to develop algorithm for soft estimation of multiuser detector. Soft estimator utilize output signal from matched filter to estimate soft bits and soft-estimated bits in previous iteration to estimate multiple-access interference. Based on the results from computer simulations, it is found that the proposed multiuser receiver performs well in Gaussian noise environment. In particular, single-user turbo-code performance can be approached with low to medium cross correlation of spreading codes. When cross correlation of spreading codes is high, the proposed estimator is better than that of the conventional estimator.

Department ......Electrical Engineering...... Student's signature ....

Field of study ......Electrical Engineering...... Advisor's ignature ....

Academic year ....2002.........................

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินการวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ ที่กรุณาให้คำแนะนำในการวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาและพี่สาวที่ให้การสนับสนุนผู้วิจัยในทุก ๆ ด้าน เสมอมา รวมทั้งกำลังใจที่มีให้

ขอขอบคุณ นายพิสิฐ วนิชชานันท์ สำหรับข้อแนะนำและความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านในการทำวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อน ๆ ในห้องปฏิบัติการไฟฟ้าสื่อสารทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ รวมถึงเพื่อนพี่น้องนิสิตทุกท่านที่มีส่วนช่วยเหลือในการให้ข้อคิดเห็น คำแนะนำ และกำลังใจ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ เนื่องด้วยการทำงานวิจัยได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนโครงการ วิจัยหรือค้นคว้าเพื่อทำวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จึงขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.. จ

กิตติกรรมประกาศ.. ฉ

สารบัญ.. ช

สารบัญตาราง... ญ

สารบัญรูป.. ฎ

บัญชีคำศัพท์... ฑ

บทที่

1 บทนำ.. 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.................................... 1

1.2 แนวความคิดของงานวิจัยนี้... 4

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.. 5

1.4 ขอบเขตของการวิจัย... 5

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ... 6

1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน... 6

2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.. 7

2.1 ระบบซีดีเอ็มเอที่มีการเข้ารหัส (Coded CDMA system)........................ 7

2.1.1 แบบจำลองระบบทางภาคส่ง.. 8

2.1.2 แบบจำลองระบบทางภาครับ.. 10

2.2 รหัสเทอร์โบ (Turbo code).. 14

2.2.1 ตัวเข้ารหัสเทอร์โบ (Turbo encoder).. 14

2.2.2 ตัวถอดรหัสเทอร์โบ (Turbo decoder).. 15

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3 ระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ………………………………………………………. 20

3.1 หลักการทำงาน……………………………………………………………… 20

3.2 ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนชนิดซอฟต์อินพุตซอฟต์เอาต์พุต (soft input soft output multiuser detector : SISO MUD)………………………. 21

3.2.1 ตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์ (soft estimator)……………………... 23

3.2.2 การขจัดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทางชนิดซอฟต์ (soft MAI cancellation)……………………………………………….. 23

3.3 ชุดของตัวถอดรหัสช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้คนเดียว (set of single user channel decoders)………………………………………... 25

4 การประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์…………………………………………………………. 26

4.1 การประมาณค่าบิตโดยนำข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้ทุกคน มาช่วยในการประมาณ……………………………………………………. 26

4.2 การประมาณค่าบิตโดยนำเฉพาะข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนที่ต้องการ มาช่วยในการประมาณ……………………………………………………. 28

4.3 การประมาณค่าบิตโดยนำข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนที่ต้องการ และค่าบิตประมาณของผู้ใช้คนอื่น ๆ ในรอบที่แล้ว มาช่วยในการประมาณ……………………………………………………. 30

4.4 ความซับซ้อนในการคำนวณที่ใช้การประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์ แต่ละวิธี…………………………………………………………………... 33

5 ผลการทดสอบ……………………………………………………………………. 34

5.1 การทดสอบการทำงานทั่วไป…………………………………………... 34

5.1.1 การทดสอบสมรรถนะของรหัสเทอร์โบ……………………………… 34

5.1.2 การทดสอบสมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ…………. 36

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำ ที่ใช้การประมาณค่าบิตวิธีต่าง ๆ........ 38

5.2.1 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำ ที่ใช้การประมาณค่าบิตในแต่ละวิธี........ 38

5.2.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำ ที่ใช้การประมาณค่าบิตวิธีต่าง ๆ........ 43

5.3 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้การประมาณค่าบิต ด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัย........ 46

5.3.1 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับ เมื่อใช้วิธีการดัดแปลงต่าง ๆ........ 46

5.3.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องรับที่นำเสนอกับ เครื่องรับแบบอื่น........ 49

5.3.2 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับ เมื่อพารามิเตอร์บางอย่างเปลี่ยนไป........ 51

6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ........ 57

6.1 สรุปผลการวิจัย........ 57

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต........ 59

รายการอ้างอิง........ 60

ภาคผนวก........ 62

ภาคผนวก ก........ 63

ภาคผนวก ข........ 67

ภาคผนวก ค........ 77

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์........ 83

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ความซับซ้อนในการคำนวณค่าบิตชนิดซอฟต์แต่ละวิธี………………………. 33

ตารางที่ 5.1 เวลาที่ใช้ในการรันโปรแกรมจำลองระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ……….. 44

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แบบจำลองทางภาคส่งของระบบซีดีเอ็มเอที่มีการเข้ารหัส.......................... 9

รูปที่ 2.2 แบบจำลองทางภาครับของระบบซีดีเอ็มเอที่มีการเข้ารหัส.......................... 10

รูปที่ 2.3 โครงสร้างการทำงานของแมตช์ฟิลเตอร์สำหรับผู้ใช้คนที่ k.......................... 11

รูปที่ 2.4 โครงสร้างพื้นฐานของการเข้ารหัสเทอร์โบ.......................... 15

รูปที่ 2.5 ตัวอย่างตัวเข้ารหัสคอนโวลูชันแบบมีระบบและมีการป้อนกลับ.......................... 15

รูปที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐานของการถอดรหัสเทอร์โบ.......................... 16

รูปที่ 3.1 โครงสร้างการทำงานของระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ.......................... 20

รูปที่ 3.2 โครงสร้างการทำงานของเครื่องรับแบบวนซ้ำ.......................... 21

รูปที่ 3.3 โครงสร้างการทำงานของดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน
ในการวนซ้ำรอบที่ t.......................... 22

รูปที่ 4.1 โครงสร้างการทำงานของตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์โดยใช้การคำนวณ
ด้วยวิธีที่มีความซับซ้อนมากที่สุด.......................... 28

รูปที่ 4.2 โครงสร้างการทำงานของตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์โดยใช้การคำนวณ
ด้วยวิธีที่เสนอโดย Zhang ดังเอกสารอ้างอิง [8].......................... 30

รูปที่ 4.3 โครงสร้างการทำงานของตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์โดยใช้การคำนวณ
ด้วยวิธีที่นำเสนอ.......................... 32

รูปที่ 5.1 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของตัวถอดรหัสเทอร์โบ.......................... 35

5.1 (ก) บิตข้อมูลซิสเต็มเมติก.......................... 35

5.1 (ข) บิตข้อมูลพาริตี.......................... 35

รูปที่ 5.2 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของระบบซีดีเอ็มเอ
ที่มีการเข้ารหัสเทอร์โบและไม่มีการเข้ารหัส.......................... 37

รูปที่ 5.3 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ย เมื่อสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่
มีค่าเป็น 0.3.......................... 40

5.3 (ก) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูง.......................... 40

5.3 (ข) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่เสนอโดย Zhang.......................... 40

5.3 (ค) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัย.......................... 40

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.4 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ย เมื่อสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่มีค่าเป็น 0.5 41

5.4 (ก) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูง 41

5.4 (ข) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่เสนอโดย Zhang 41

5.4 (ค) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัย 41

รูปที่ 5.5 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ย เมื่อสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่มีค่าเป็น 0.7 42

5.5 (ก) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูง 42

5.5 (ข) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่เสนอโดย Zhang 42

5.5 (ค) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัย 42

รูปที่ 5.6 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับที่ใช้การประมาณบิตวิธีต่าง ๆ 45

5.6 (ก) $\rho = 0.3$ 45

5.6 (ข) $\rho = 0.5$ 45

5.6 (ค) $\rho = 0.7$ 45

รูปที่ 5.7 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับที่ใช้การประมาณบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ 47

5.7 (ก) $\rho = 0.3$ 47

5.7 (ข) $\rho = 0.5$ 47

5.7 (ค) $\rho = 0.7$ 47

รูปที่ 5.8 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับแบบที่นำเสนอกับเครื่องรับแบบอื่น 50

5.8 (ก) $\rho = 0.3$ 50

5.8 (ข) $\rho = 0.5$ 50

5.8 (ค) $\rho = 0.7$ 50

รูปที่ 5.9 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับที่ใช้การประมาณบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ เมื่อจำนวนผู้ใช้ในระบบเปลี่ยนไป 51

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.10 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับที่ใช้การประมาณบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ เมื่อขนาดของบล็อกข้อมูลเปลี่ยนไป…………………………... 52

รูปที่ 5.11 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับที่ใช้การประมาณบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ เมื่อการควบคุมกำลังไม่สมบูรณ์………………………………. 53

รูปที่ 5.12 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับที่ใช้การประมาณบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ เมื่อการควบคุมกำลังไม่สมบูรณ์ ในกรณีของผู้ใช้แต่ละคน…………….. 54

5.12 (ก) ผู้ใช้ที่มีกำลังต่ำ………………………………………………………. 54

5.12 (ข) ผู้ใช้ที่มีกำลังสูง………………………………………………………. 54

รูปที่ 5.13 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับที่ใช้การประมาณบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ เมื่อความถี่ในการใช้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนเปลี่ยนไป………… 55

รูปที่ 5.14 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับที่ใช้การประมาณบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ เมื่อจำนวนรอบในการวนซ้ำของตัวถอดรหัสเทอร์โบเปลี่ยนไป………. 56

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บัญชีคำศัพท์

การแก้ความผิดพลาดไปหน้า	forward error correction (FEC)
การขจัดสัญญาณแทรกสอดชนิดซอฟต์	soft interference cancellation
การขจัดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทางเพียงบางส่วน	partial interference cancellation
การเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งแยกด้วยรหัสชนิดลำดับโดยตรง หรือ ซีดีเอ็มเอชนิดไดเรกต์ซีเควนซ์	direct sequence - code division multiple access (DS-CDMA)
การเข้ารหัสควบคุมความผิดพลาด	error control coding
การตัดสินบิตแบบซอฟต์	soft decision
การตัดสินบิตแบบฮาร์ด	hard decision
การถอดรหัสแบบวนซ้ำ	iterative decoding
การประมาณค่าบิตแบบซอฟต์	soft estimation
การประมาณค่าบิตแบบฮาร์ด	hard estimation
การประมาณลำดับแบบความน่าเป็นจริงสูงสุด	maximum-likelihood sequence estimation (MLSE)
การปรับเท่า	equalization
การมอดูเลตด้วยรหัส	coded modulation
การมอดูเลตแบบดิจิตอลทางเฟสชนิดไบนารี	binary phase-shift keying (BPSK)
ข่าวสารจากช่องสัญญาณ	channel information
ข่าวสารเบื้องแรก	priori information
ข่าวสารเบื้องหลัง	posteriori information
ข่าวสารเอกซ์ทรินซิก	extrinsic information
ความน่าจะเป็นเบื้องแรก	priori probabilities
ความน่าจะเป็นเบื้องหลัง	posteriori probabilities
ความน่าจะเป็นร่วม	joint probability
เครื่องรับแบบวนซ้ำ	iterative receiver

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บัญชีคำศัพท์ (ต่อ)

ดีเทกเตอร์ชนิดขจัดสัญญาณแทรกสอดแบบขนาน	parallel interference cancellation (PIC)
ดีเทกเตอร์ชนิดขจัดสัญญาณแทรกสอดแบบต่อเนื่อง	successive interference cancellation (SIC)
ดีเทกเตอร์ชนิดดีคอร์รีเลต	decorrelating detector
ดีเทกเตอร์ชนิดทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดต่ำสุด	minimum mean square error detector
ดีเทกเตอร์ชนิดนำข้อมูลที่ตัดสินแล้วมาป้อนกลับ	decorrelating decision-feedback detector (DDFD)
ดีเทกเตอร์ที่เหมาะที่สุด	optimum detector
ดีเทกเตอร์ที่เหมาะรองลงไป	sub-optimum detector
ดีเทกเตอร์แบบเชิงเส้น	linear detector
ดีเทกเตอร์แบบไม่เชิงเส้น	non-linear detector
ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน	multiuser detector
ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนแบบซอฟต์อินพุตซอฟต์เอาต์พุต	soft input soft output multiuser detector (SISO MUD)
ตัวเข้ารหัสคอนโวลูชันแบบมีระบบและมีการป้อนกลับ	recursive systematic convolution encoder
ตัวเข้ารหัสเทอร์โบ	turbo encoder
ตัวถอดรหัสช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้คนเดียวแบบซอฟต์อินพุตซอฟต์เอาต์พุต	soft input soft output single-user channel decoder
ตัวถอดรหัสเทอร์โบ	turbo decoder
ตัววางสลับ	interleaver
ตัววางสลับกลับ	deinterleaver
ปรากฏการณ์ใกล้-ไกล	near-far effect
พหุนามป้อนกลับ	backward polynomial
พหุนามป้อนไปหน้า	forward polynomial
เฟดดิงจากคลื่นหลายวิถี	multipath fading

บัญชีคำศัพท์ (ต่อ)

รหัสคอนโวลูชัน	convolution code
รหัสเทรลลิส	trellis code
รหัสเทอร์โบ	turbo code
รหัสแผ่	spreading code
ระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้การเข้ารหัส	coded CDMA system
ระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ	turbo-coded CDMA system
วงจรกรองแบบที่ทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด	minimum mean square error (MMSE) filter
วงจรกรองแบบแมตช์ หรือ แมตช์ฟิลเตอร์	matched filter
วงจรกรองสัญญาณรบกวนสีขาว	whitening filter
สหสัมพันธ์ข้าม	cross correlation
สัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทาง	multiple access interference (MAI)
สัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก	additive white Gaussian noise (AWGN)
หลักการเทอร์โบ	Turbo principle
ออร์โทกอนัล	orthogonal
อะซิงโครนัส	asynchronous
อัตราขยายการเข้ารหัส	coding gain
อัตราความผิดพลาดบิต	bit error rate (BER)
อัตราส่วนความน่าเป็นจริง	likelihood ratio

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ในระบบสื่อสารไร้สายแถบความถี่กว้าง เทคโนโลยีการเข้าถึงหลายทางแบบแบ่งแยกด้วยรหัสชนิดลำดับโดยตรง หรือ ซีดีเอ็มเอชนิดไดเรกต์ซีเควนซ์ (DS-CDMA) ได้มีการพัฒนาขึ้นมาเพื่อเพิ่มความจุให้กับระบบ ทำให้ระบบสามารถรองรับจำนวนผู้ใช้มาก ๆ ได้ โดยในระบบซีดีเอ็มเอนั้น ผู้ใช้ทุกคนสามารถใช้งานที่ความถี่และเวลาเดียวกัน ซึ่งข้อมูลของผู้ใช้จะสามารถแยกออกจากกันด้วยชุดรหัสเฉพาะสำหรับผู้ใช้แต่ละคน จากการส่งข้อมูลของผู้ใช้หลายคนพร้อมกัน ทำให้เกิดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทาง (multiple access interference : MAI) ขึ้น ซึ่งสัญญาณแทรกสอดดังกล่าวนี้กลายเป็นสาเหตุหลักในการจำกัดความจุของระบบซีดีเอ็มเอ โดยในส่วนของภาครับ เครื่องรับแบบดั้งเดิมจะมีเพียงแมตช์ฟิลเตอร์เท่านั้น ซึ่งทำหน้าที่แยกสัญญาณของผู้ใช้แต่ละคนออกจากกัน แต่จะไม่มีการกำจัดสัญญาณแทรกสอด ทางภาครับจึงได้ทำการปรับปรุงสมรรถนะด้วยการนำดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน (Multiuser Detector : MUD) มาร่วมใช้งานด้วย เพื่อทำหน้าที่กำจัดสัญญาณแทรกสอดดังกล่าวออกไป ดังนั้น งานวิจัยต่าง ๆ ในระบบซีดีเอ็มเอจึงได้ให้ความสนใจในการศึกษาเกี่ยวกับดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนเป็นอย่างมาก

งานวิจัยเกี่ยวกับดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนในช่วงแรกนั้น จะเจาะจงลงไปเฉพาะในระบบซีดีเอ็มเอที่ไม่มีการเข้ารหัสช่องสัญญาณ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ข้อมูลของผู้ใช้แต่ละคนควรถูกส่งไปทำการเข้ารหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้า (Forward Error Correction : FEC) ก่อนที่จะทำการแผ่สัญญาณ เพื่อปกป้องข้อมูลของผู้ใช้ให้มีความผิดพลาดน้อยลงเมื่อข้อมูลถูกรบกวนจากการส่งผ่านช่องสัญญาณ รวมทั้งทำให้ระบบมีความจุเพิ่มขึ้นอีกด้วย ดังนั้น นักวิจัยจึงเริ่มหันมาให้ความสนใจศึกษาการทำงานในระบบซีดีเอ็มเอที่มีการเข้ารหัสช่องสัญญาณมากขึ้น โดยเฉพาะการทำงานในส่วนของตัวถอดรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้ากับดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน ดังในเอกสารอ้างอิง [1] กล่าวถึง การนำรหัสคอนโวลูชัน รหัสเทรลลิส และรหัสเทอร์โบ มาใช้เป็นรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้าในระบบซีดีเอ็มเอที่มีการเข้ารหัส ซึ่งพบว่า การนำรหัสเทอร์โบมาใช้เป็นรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้านั้น จะทำให้ระบบซีดีเอ็มเอที่มีการเข้ารหัสมีสมรรถนะดีที่สุด

รหัสเทอร์โบ [2] ตั้งแต่มีการแนะนำเป็นต้นมาก็ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีความสามารถจัดการกับปัญหาความผิดพลาดที่เกิดจากการส่งข่าวสารผ่านช่องสัญญาณได้เป็นอย่างดี โดยในส่วนของตัวถอดรหัสเทอร์โบ การทำงานมีลักษณะแบบวนซ้ำ ซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยน

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข่าวสารเอกซ์ทรินซิก (extrinsic information) ระหว่างตัวถอดรหัสย่อย ทำให้อัตราความผิดพลาดของบิตข้อมูลมีค่าลดลงตามจำนวนรอบการวนซ้ำที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างการวนซ้ำดังกล่าวนี้เรียกว่าหลักการเทอร์โบ (Turbo Principle) [3] จากเอกสารอ้างอิง [3] แสดงให้เห็นว่า หลักการเทอร์โบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ ได้มากมาย เช่น การปรับเท่า (equalization) การมอดูเลตด้วยรหัส (coded modulation) และการดีเทกต์สำหรับผู้ใช้หลายคน (multiuser detection) เป็นต้น

งานวิจัยสำหรับระบบซีดีเอ็มเอที่มีการเข้ารหัสนั้น มีทั้งการนำรหัสคอนโวลูชันมาใช้เป็นรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้า โดยที่ภาครับมีการนำหลักการเทอร์โบมาประยุกต์ใช้ ดังเช่นงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [4] หรือการนำรหัสเทอร์โบมาใช้เป็นรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้าโดยตรง ดังงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [5-8] โดยในแต่ละงานวิจัยที่อ้างอิงนั้น ต่างก็ใช้ตัวถอดรหัสเทอร์โบที่มีการคำนวณค่าความน่าจะเป็นเบื้องหลัง (a posteriori probabilities : APP) ตามอัลกอริทึมในเอกสารอ้างอิง [9] เป็นหลัก

งานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [4] เป็นการนำระบบซีดีเอ็มเอที่มีการเข้ารหัสคอนโวลูชันมาศึกษา โดยให้ภาครับมีโครงสร้างการทำงานแบบวนซ้ำตามหลักการเทอร์โบ เครื่องรับประกอบด้วยดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนแบบซอฟต์อินพุตซอฟต์เอาต์พุต (soft input soft output multiuser detector : SISO MUD) กับเซตของตัวถอดรหัสช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้คนเดียวแบบซอฟต์อินพุตซอฟต์เอาต์พุต (soft input soft output single-user channel decoder) ในแต่ละรอบของการทำงานแบบวนซ้ำ ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนและตัวถอดรหัสจะมีการแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่างกัน ข่าวสารเอกซ์ทรินซิกที่คำนวณได้ในแต่ละส่วนจะถูกส่งไปส่วนถัดไปเพื่อใช้งานในรูปของข่าวสารเบื้องแรก (a priori information) ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนจะใช้วิธีการคำนวณโดยตรง ทำให้เครื่องรับมีความซับซ้อนในการคำนวณสูงมากไม่เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งความซับซ้อนในการคำนวณมีค่าแปรผันตามสองยกกำลังจำนวนผู้ใช้ในระบบ ดังนั้น งานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [4] จึงเสนอวิธีการดีเทกต์สำหรับผู้ใช้หลายคนอีกวิธีหนึ่งขึ้นมาเพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณลง โดยอาศัยเทคนิควิธีการขจัดสัญญาณแทรกสอดชนิดซอฟต์ (soft interference cancellation) ซึ่งจะนำข่าวสารเบื้องแรกที่ได้จากตัวถอดรหัสเทอร์โบ มาช่วยในการประมาณค่าสัญญาณแทรกสอด จากนั้นนำสัญญาณที่ขจัดสัญญาณแทรกสอดแล้ว ไปผ่านวงจรกรองแบบที่ทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด (minimum mean square error : MMSE filter) ถึงแม้การดีเทกต์วิธีนี้จะทำให้ความซับซ้อนในการคำนวณมีค่าลดลง แต่ก็ยังคงมีค่าสูง โดยความซับซ้อนในการคำนวณมีค่าแปรผันตามจำนวนผู้ใช้ในระบบยกกำลังสอง

ส่วนงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [5-8] นั้น เป็นการนำระบบซีดีเอ็มเอที่มีการเข้ารหัสเทอร์โบมาศึกษา โดยยังคงให้ภาครับมีโครงสร้างการทำงานแบบวนซ้ำตามหลักการเทอร์โบ งานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [5] เสนอให้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนกับเซตของตัวถอดรหัสเทอร์โบสำหรับผู้

ใช้คนเดียวทำงานคู่กันไป ตัวถอดรหัสย่อยในการถอดรหัสเทอร์โบมีการเชื่อมต่อแบบอนุกรม ในส่วนของดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน ทำหน้าที่คำนวณความน่าจะเป็นของช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้แต่ละคน จากนั้นนำมาป้อนให้กับตัวถอดรหัสเทอร์โบเพื่อใช้ในการคำนวณค่าความน่าจะเป็นเบื้องหลัง และค่าความน่าจะเป็นเบื้องหลังที่คำนวณได้จะถูกป้อนกลับไปให้กับดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนเพื่อใช้เป็นค่าความน่าจะเป็นเบื้องแรก ส่วนงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [6] มีลักษณะการทำงานคล้ายกับงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [5] แต่แตกต่างกันในส่วนของการถอดรหัสเทอร์โบ โดยงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [6] นี้ ให้ตัวถอดรหัสย่อยมีการเชื่อมต่อกันแบบขนาน สมรรถนะของระบบในการทำงานของทั้งสองวิธีนี้ต่างก็ให้ผลที่ดีแม้ว่าค่าสหสัมพันธ์ข้าม (cross correlation) ของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้จะมีค่ามากก็ตาม แต่ก็ใช้ความซับซ้อนในการคำนวณสูงมากตามไปด้วย โดยมีค่าแปรผันตามสองยกกำลังจำนวนผู้ใช้ในระบบ ทำให้เครื่องรับดังกล่าวนี้ไม่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [5] ยังได้เสนอวิธีการดีเทกต์สำหรับผู้ใช้หลายคนอีกวิธีหนึ่งขึ้นมาเพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณลง โดยนำเทคนิค M อัลกอริทึมมาประยุกต์ใช้ในส่วนของการคำนวณค่าความน่าจะเป็นของช่องสัญญาณ ทำให้ความซับซ้อนที่ใช้ในการคำนวณมีค่าลดลง แต่ก็ยังคงมีค่าสูง โดยมีค่าแปรผันตามจำนวนผู้ใช้ในระบบยกกำลังสอง รวมทั้งทำให้สมรรถนะของระบบลดลงด้วย

งานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [7-8] สนใจการทำงานของดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนแบบไม่เชิงเส้น โดยงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [7] เสนอให้นำดีเทกเตอร์ชนิดนำข้อมูลที่ตัดสินแล้วมาป้อนกลับ (decorrelating decision-feedback detector : DDFD) มาประยุกต์ใช้งาน โดยในส่วนของการประมาณค่าบิตของผู้ใช้แต่ละคนนั้น เดิมทีบิตประมาณจะคำนวณได้มาจากการนำสัญญาณที่ได้จากการผ่านวงจรกรองสัญญาณรบกวนสีขาว (whitening filter) มาทำการตัดสินบิตแบบฮาร์ด (hard decision) ซึ่งพบว่าการประมาณบิตวิธีนี้ ทำให้เครื่องรับไม่มีการแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่างดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนกับตัวถอดรหัสเทอร์โบ เครื่องรับจึงไม่เกิดการทำงานแบบวนซ้ำ ในงานวิจัยดังกล่าวจึงได้มีการดัดแปลงให้การตัดสินค่าของบิตข้อมูลได้มาจากการหาบิตข้อมูลที่ทำให้ค่าความน่าจะเป็นร่วม (joint probability) ระหว่างบิตข้อมูลกับสัญญาณรับที่ได้จากวงจรกรองมีค่าสูงสุด ซึ่งในการคำนวณค่าความน่าจะเป็นร่วมดังกล่าวนี้ จะต้องใช้ข่าวสารเบื้องหลังที่ได้จากตัวถอดรหัสเทอร์โบมาทำงานเป็นข่าวสารเบื้องแรก ทำให้เครื่องรับเกิดการวนซ้ำขึ้น และพบว่าระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้นตามจำนวนรอบการวนซ้ำที่เพิ่มขึ้น ส่วนงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [8] เสนอให้นำดีเทกเตอร์ชนิดขจัดสัญญาณแทรกสอดแบบขนาน (parallel interference cancellation : PIC) มาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งมีลักษณะการทำงานคล้ายกับเครื่องรับแบบที่ลดความซับซ้อนในการคำนวณลงดังงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [4] แต่แตกต่างกันในส่วนของการประมาณค่าบิต โดยงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [8] จะนำสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์มาช่วยในการประมาณค่าบิตด้วย และ

เครื่องรับในงานวิจัยดังกล่าวนี้ ไม่มีการนำวงจรกรองแบบที่ทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด (MMSE filter) มาใช้งาน ความซับซ้อนในการคำนวณของเครื่องรับที่เสนอในเอกสารอ้างอิง [7-8] นี้ มีค่าแปรผันตามจำนวนผู้ใช้ในระบบ

เมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยที่อ้างอิงทั้งหมด พบว่า เครื่องรับที่เสนอให้ใช้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนแบบไม่เชิงเส้นดังงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [7-8] นั้น มีความซับซ้อนในการคำนวณต่ำกว่าเครื่องรับที่เสนอโดยงานวิจัยในเอกสารอ้างอิงอื่น ๆ แต่มีข้อเสีย คือ ระบบสามารถทำงานได้ดีเฉพาะเมื่อค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้มีค่าไม่สูงมากนัก (≤ 0.5)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเสนอการปรับปรุงเครื่องรับแบบวนซ้ำ โดยใช้โครงสร้างการทำงานเช่นเดียวกับงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [8] เนื่องจากความซับซ้อนในการคำนวณมีค่าไม่สูงมากนัก และง่ายที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งในงานวิจัยจะพยายามปรับปรุงให้ระบบมีสมรรถนะในการทำงานดีขึ้นหรือเทียบเท่ากับงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [8] เมื่อสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้มีค่าใด ๆ

1.2 แนวความคิดของงานวิจัยนี้

งานวิจัยนี้จะปรับปรุงการทำงานของเครื่องรับที่เสนอในเอกสารอ้างอิง [8] เพื่อทำให้ระบบมีสมรรถนะดีขึ้น โดยที่ความซับซ้อนในการคำนวณยังมีค่าไม่แตกต่างจากเดิมมากนัก โครงสร้างการทำงานของเครื่องรับยังเหมือนเดิม แต่จะดัดแปลงในส่วนของการประมาณค่าบิตแบบซอฟต์ (soft estimation) ซึ่งจากเดิมนั้นงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [8] เสนอให้การประมาณค่าบิตของผู้ใช้แต่ละคนได้มาจากการนำสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนนั้น มาช่วยในการประมาณค่า และมองสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทาง (MAI) เป็นเสมือนสัญญาณรบกวนเช่นเดียวกับสัญญาณรบกวนจากช่องสัญญาณ โดยมีการคำนวณค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนขึ้นมาใหม่ ซึ่งวิธีนี้เมื่อค่าสหสัมพันธ์ของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้มีค่าไม่สูงมากนัก ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนใหม่ก็ยังไม่สูงมาก เครื่องรับยังสามารถทำงานได้ดี แต่เมื่อค่าสหสัมพันธ์ของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้มีค่าสูง ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนใหม่ก็จะสูงตามมา เครื่องรับจะมองว่าระบบถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนที่มีค่าความแปรปรวนสูงมาก การประมาณค่าจึงขึ้นกับข่าวสารเบื้องแรกที่ได้จากการถอดรหัสเทอร์โบเท่านั้น ทำให้เครื่องรับทำงานด้อยลง

ส่วนการประมาณค่าบิตในงานวิจัยนี้ เนื่องจากเครื่องรับมีการทำงานแบบวนซ้ำ ในแต่ละรอบของการทำงานก็มีการประมาณค่าบิตขึ้นมาใหม่ โดยเมื่อจำนวนรอบในการวนซ้ำเพิ่มขึ้น ค่าบิตประมาณก็มีความถูกต้องมากขึ้น ดังนั้น ในการประมาณค่าบิตนอกจากการนำสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนนั้นมาช่วยในการประมาณค่าบิตแล้ว งานวิจัยนี้เสนอให้นำบิตประมาณที่

คำนวณได้ในรอบที่แล้วของผู้ใช้คนอื่น ๆ มาช่วยในการประมาณด้วย ซึ่งเสมือนกับการนำค่าบิตประมาณในรอบที่แล้วมาประมาณค่าสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทาง เมื่อจำนวนรอบในการทำงานเพิ่มขึ้น การประมาณค่าสัญญาณแทรกสอดก็น่าจะเข้าใกล้ค่าที่แท้จริงมากขึ้น ทำให้การประมาณค่าบิตวิธีนี้ น่าจะให้ความถูกต้องมากกว่าการที่มองสัญญาณแทรกสอดเป็นสัญญาณรบกวน นอกจากนี้การประมาณค่าบิตที่เสนอในงานวิจัยนี้ อาจมองได้อีกแง่หนึ่งว่า เป็นการนำสัญญาณรับที่ได้จากการขจัดสัญญาณแทรกสอดของผู้ใช้คนนั้นในการทำงานรอบที่แล้ว มาช่วยในการประมาณค่าบิตแทนสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้รหัสเทอร์โบในระบบซีดีเอ็มเอชนิดไดเรกต์ซีเควนซ์ โดยเฉพาะในส่วนของการทำงานร่วมกันระหว่างดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนกับตัวถอดรหัสเทอร์โบ
2. เพื่อเสนอวิธีการปรับปรุงสมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ สำหรับช่องสัญญาณที่มีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก (additive white Gaussian noise : AWGN) โดยใช้เครื่องรับแบบวนซ้ำที่มีค่าความซับซ้อนในการคำนวณไม่สูงมากนัก

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1. วิเคราะห์และหาวิธีการปรับปรุงเครื่องรับแบบวนซ้ำ เพื่อทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น โดยปรับปรุงในส่วนของดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนชนิดขจัดสัญญาณแทรกสอดแบบขนานให้สามารถทำงานร่วมกับตัวถอดรหัสเทอร์โบได้ดียิ่งขึ้น และความซับซ้อนในการคำนวณมีค่าไม่สูงมากนัก ทำให้สามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานได้ ซึ่งในที่นี้พิจารณาในระบบซีดีเอ็มเอชนิดไดเรกต์ซีเควนซ์แบบซิงโครนัสที่ใช้รหัสเทอร์โบ กรณีข่ายเชื่อมโยงขาขึ้น กำหนดให้ช่องสัญญาณมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก
2. ทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำ ที่ใช้ดีเทกเตอร์ชนิดขจัดสัญญาณแทรกสอดแบบขนานในระบบที่กำหนดดังข้อ 1 โดยการจำลองระบบด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้กรรมวิธีใหม่ ๆ สำหรับเครื่องรับแบบวนซ้ำในระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้น เมื่อค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้มีค่าต่าง ๆ

2. ได้โปรแกรมจำลองระบบซีดีเอ็มเอชนิดไดเรกต์ซีเควนซ์ที่ใช้รหัสเทอร์โบ สำหรับช่องสัญญาณที่มีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก (AWGN)

1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาความรู้พื้นฐานของหลักการเทอร์โบ (turbo principle) และระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้การเข้ารหัส (coded CDMA system)

2. ศึกษาและวิเคราะห์การทำงานของเครื่องรับแบบวนซ้ำในงานวิจัยต่าง ๆ ซึ่งประกอบด้วยการทำงานของดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนกับตัวถอดรหัสเทอร์โบเป็นหลัก

3. หาวิธีการปรับปรุงเครื่องรับแบบวนซ้ำ เพื่อทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้น โดยที่ค่าความซับซ้อนในการคำนวณสามารถนำไปใช้งานได้

4. เขียนโปรแกรมจำลองระบบซีดีเอ็มเอชนิดไดเรกต์ซีเควนซ์ที่ใช้รหัสเทอร์โบ และให้ทางภาครับใช้เครื่องรับแบบวนซ้ำที่มีการทำงานตามวิธีที่นำเสนอและตามวิธีในงานวิจัยที่อ้างถึง โดยใช้ภาษาซี

5. เปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลจากการจำลองระบบ

6. จัดทำวิทยานิพนธ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

บทนี้กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่นำมาใช้สำหรับงานวิจัย โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็นสองหัวข้อ ในหัวข้อแรกกล่าวถึงระบบซีดีเอ็มเอที่มีการนำรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้ามาใช้งาน ซึ่งอธิบายหลักการทำงานของระบบทั้งในส่วนของภาคส่งและภาครับ ในหัวข้อที่สองกล่าวถึงรหัสเทอร์โบ ซึ่งนำมาใช้เป็นรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้าสำหรับระบบซีดีเอ็มเอ โดยอธิบายการทำงานของตัวเข้ารหัสและตัวถอดรหัสเทอร์โบ

2.1 ระบบซีดีเอ็มเอที่มีการเข้ารหัส (Coded CDMA System)

ในการสื่อสารไร้สาย ระบบซีดีเอ็มเอชนิดไดเรกต์ซีเควนซ์ได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากสามารถส่งข้อมูลของผู้ใช้จำนวนมาก ลงบนแถบความถี่เดียวกันและในช่วงเวลาเดียวกันได้ โดยอาศัยชุดของรหัสแผ่ที่แตกต่างกัน ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้แต่ละคนที่ใช้งานแถบความถี่ร่วมกันสามารถแยกความแตกต่างระหว่างกันได้ การแยกข้อแตกต่างโดยการใช้รหัสที่แตกต่างกันนี้เป็นสาเหตุให้เกิดสัญญาณแทรกสอดต่าง ๆ ขึ้น ซึ่งเกิดจากผู้ใช้คนอื่นที่ใช้ความถี่ร่วมกัน ทั้งที่มาจากเซลล์เดียวกันหรือเซลล์ข้างเคียงอื่น ๆ สัญญาณแทรกสอดที่เกิดขึ้นนี้ เรียกว่า สัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทาง (multiple access interference : MAI)

สัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทาง (MAI) ที่เกิดขึ้นนี้ จะส่งผลกระทบให้ระบบซีดีเอ็มเอถูกจำกัดความจุและมีสมรรถนะในการทำงานด้อยลง วิธีแก้ไขที่ทำให้ผลกระทบจากการเกิดสัญญาณแทรกสอดลดลงสามารถทำได้หลายวิธี [10] เช่น

- **การออกแบบชุดรหัสแผ่** จากทฤษฎี พบว่า การเลือกใช้ชุดรหัสแผ่ที่มีคุณสมบัติออร์โทกอนัล (orthogonal) จะทำให้ไม่เกิดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทางขึ้น แต่ในทางปฏิบัติแล้ว การส่งสัญญาณจะเป็นแบบอะซิงโครนัส (asynchronous) จึงทำให้เป็นไปไม่ได้ที่จะออกแบบชุดรหัสให้สามารถคงคุณสมบัติออร์โทกอนัลภายใต้เวลาประวิงที่แตกต่างกัน ดังนั้น ในการออกแบบชุดรหัสแผ่ ควรเลือกใช้ชุดรหัสแผ่ที่มีค่าสหสัมพันธ์ข้ามต่ำ ๆ แทน
- **การควบคุมกำลังส่ง** มีการนำมาใช้ เพื่อทำให้กำลังส่งของผู้ใช้ในระบบสามารถมาถึงภาครับด้วยขนาดที่เท่ากันทั้งหมด การแก้ไขวิธีนี้นอกจากจะช่วยลดผลกระทบของสัญญาณแทรกสอดแล้ว ยังถือว่าเป็นการช่วยขจัดปัญหาการเกิดปรากฏการณ์ใกล้-ไกลอีกด้วย

- **สายอากาศแบบปรับตัวได้** วิธีการประมวลผลสัญญาณแบบปรับตัวได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในสายอากาศ เพื่อทำให้สายอากาศอยู่ในทิศทางตรงกับผู้ใช้คนที่ต้องการมากที่สุด
- **รหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้า** รหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้าที่มีประสิทธิภาพนั้น จะสามารถจัดการกับปัญหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ ถึงแม้ว่าช่องสัญญาณจะมีค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ต่ำมากก็ตาม ดังนั้น จึงได้มีการนำรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้ามาประยุกต์ใช้ในงานต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง รวมทั้งในระบบซีดีเอ็มเอด้วย เพื่อช่วยในการปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้น
- **ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน** เนื่องจากข้อมูลของผู้ใช้แต่ละคนต่างก็มีความสัมพันธ์ระหว่างกัน ทั้งในเรื่องของเวลาและรหัสแผ่ ดังนั้น ทางภาครับควรเลือกใช้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน ซึ่งจะทำงานโดยอาศัยข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างผู้ใช้ดังกล่าวมาช่วยปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้น ทำให้สมรรถนะที่ได้ย่อมมีค่าดีกว่าการเลือกใช้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้แต่ละคนแยกจากกัน

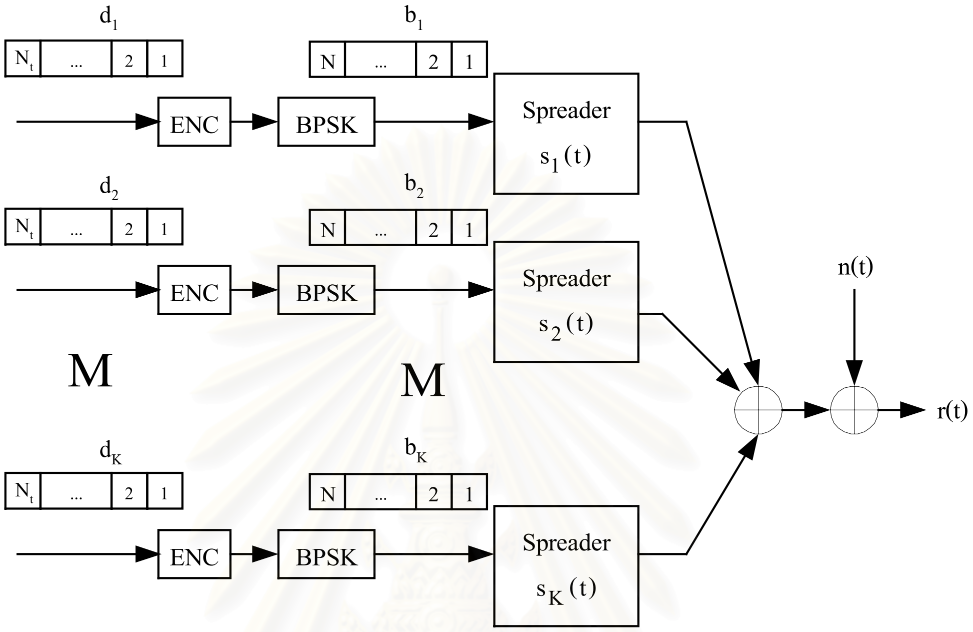
ในงานวิจัยนี้ สนใจศึกษาวิธีปรับปรุงสมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอด้วยดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนกับรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้าเท่านั้น

โดยทั่วไป ในทางปฏิบัติระบบซีดีเอ็มเอจะนำตัวเข้ารหัสควบคุมความผิดพลาดมาใช้งานด้วย ซึ่งอาศัยเทคนิคการเข้ารหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้า เพื่อปรับปรุงสมรรถนะในการส่งข้อมูลและช่วยปกป้องข้อมูลไม่ให้ถูกรบกวนจากการส่งผ่านช่องสัญญาณ ทำให้ระบบซีดีเอ็มเอสามารถแสดงขีดความสามารถได้อย่างเต็มที่ ตัวอย่างการเข้ารหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้าที่ถูกเสนอให้นำมาใช้ในระบบซีดีเอ็มเอ เช่น รหัสคอนโวลูชัน รหัสเทรลลิส และรหัสเทอร์โบ เป็นต้น

2.1.1 แบบจำลองระบบทางภาคส่ง

พิจารณาระบบซีดีเอ็มเอที่มีการเข้ารหัสควบคุมความผิดพลาด การส่งสัญญาณในกรณีข่ายเชื่อมโยงขาขึ้น สมมติให้สัญญาณจากผู้ใช้แต่ละคนมาถึงโดยซิงโครนัสกันอย่างสมบูรณ์ ระบบทางภาคส่งแสดงดังรูปที่ 2.1 กำหนดให้ ระบบมีผู้ใช้จำนวนทั้งสิ้น K คน การทำงานเริ่มต้นด้วยการเข้ารหัสข้อมูล ผู้ใช้แต่ละคนส่งบล็อกข้อมูลขนาด N_t บิต โดยส่งบิตข้อมูลชนิดไบนารีมีค่าเท่ากับ 0 หรือ 1 ผ่านตัวเข้ารหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้าที่มีลักษณะเหมือนกัน ซึ่งมีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ R ทำให้จำนวนบิตในแต่ละบล็อกหลังจากการเข้ารหัสเพิ่มขึ้นเป็น $N = N_t/R$ บิต จากนั้นนำข้อมูลไปทำการมอดูเลตแบบดิจิตอลทางเฟสชนิดไบนารี (binary phase-shift keying : BPSK) ทำให้บิตข้อมูลมีค่าเป็น -1 หรือ +1 แล้วส่งไปทำการแผ่สัญญาณด้วยชุดรหัสแผ่สำหรับผู้ใช้แต่ละคน จากนั้น

นำสัญญาณของผู้ใช้ทั้งหมดมารวมกันแล้วส่งผ่านช่องสัญญาณ กำหนดให้ ช่องสัญญาณมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก (additive white Gaussian noise : AWGN)



รูปที่ 2.1 แบบจำลองทางภาคส่งของระบบซีดีเอ็มเอที่มีการเข้ารหัส

รายละเอียดเกี่ยวกับสัญลักษณ์

ENC แทน ตัวเข้ารหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้า ย่อมาจาก encoder

BPSK แทน การมอดูเลตแบบดิจิตอลทางเฟสชนิดไบนารี ย่อมาจาก binary phase-shift keying

$d_k(j)$ คือ บิตข้อมูลที่ต้องการส่งของผู้ใช้คนที่ k ลำดับบิตที่ j มีค่าเป็น 0 หรือ 1

$\mathbf{d}(j) = \left[d_1(j) \quad d_2(j) \quad \Lambda \quad d_K(j)\right]^T$ คือ เวกเตอร์ของบิตข้อมูลลำดับที่ j ของผู้ใช้ทั้งหมด

$b_k(i)$ คือ บิตข้อมูลของผู้ใช้คนที่ k ลำดับบิตที่ i ที่ผ่านการเข้ารหัสและการมอดูเลต มีค่าเป็น -1 หรือ +1

$\mathbf{b}(i) = \left[b_1(i) \quad b_2(i) \quad \Lambda \quad b_K(i)\right]^T$ คือ เวกเตอร์ของบิตข้อมูลลำดับที่ i ของผู้ใช้ทั้งหมดที่ผ่านการเข้ารหัสและการมอดูเลต

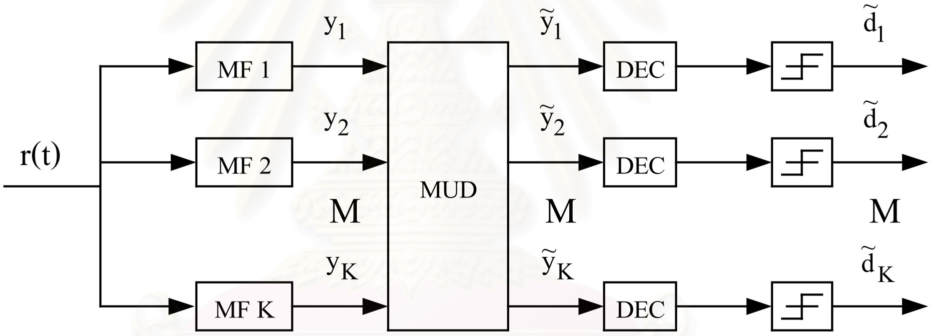
$s_k(t)$ คือ รหัสที่ใช้ในการแผ่ของผู้ใช้คนที่ k โดยสมมติว่า $s_k(t)$ ถูกรองรับเพียงช่วง [0, T] และมีพลังงานหนึ่งหน่วย

$n(t)$ คือ สัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก (AWGN) มีค่าเฉลี่ยเป็น 0 และค่าความแปรปรวนเท่ากับ σ^2

$r(t)$ คือ สัญญาณรับที่ได้จากช่องสัญญาณ

2.1.2 แบบจำลองระบบทางภาครับ

โครงสร้างทางภาครับแสดงดังรูปที่ 2.2 การทำงานเริ่มต้นด้วยระบบจะส่งสัญญาณรับที่ได้จากช่องสัญญาณไปผ่านเครื่องรับแบบดั้งเดิม ซึ่งก็คือแมตช์ฟิลเตอร์ เพื่อทำหน้าที่แยกแยะข้อมูลของผู้ใช้แต่ละคนออกจากกัน จากนั้นนำสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ไปส่งผ่านดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน ซึ่งจะทำหน้าที่ขจัดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทางออกไป สัญญาณรับที่ได้จากดีเทกเตอร์จะถูกส่งต่อไปยังตัวถอดรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้า เพื่อถอดรหัสข้อมูล ทำให้ได้รับบิตข้อมูลที่ส่งมา



รูปที่ 2.2 แบบจำลองทางภาครับของระบบซีดีเอ็มเอที่มีการเข้ารหัส

รายละเอียดเกี่ยวกับสัญลักษณ์

MF k แทน แมตช์ฟิลเตอร์สำหรับผู้ใช้คนที่ k ย่อมาจาก matched filter

MUD แทน ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน ย่อมาจาก multiuser detector

DEC แทน ตัวถอดรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้า ย่อมาจาก decoder

$y_k(i)$ คือ บิตข้อมูลลำดับที่ i ของผู้ใช้คนที่ k ที่ได้จากการส่งผ่านแมตช์ฟิลเตอร์

$\mathbf{y}(i) = \left[y_1(i) \quad y_2(i) \quad \Lambda \quad y_K(i) \right]^T$ คือ เวกเตอร์ของบิตข้อมูลลำดับที่ i ของผู้ใช้ทั้งหมดที่ได้จากการส่งผ่านแมตช์ฟิลเตอร์

$\tilde{y}_k(i)$ คือ บิตข้อมูลลำดับที่ i ของผู้ใช้คนที่ k ที่ได้จากการส่งผ่านดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน

$\tilde{\mathbf{y}}(i) = \left[\tilde{y}_1(i) \quad \tilde{y}_2(i) \quad \Lambda \quad \tilde{y}_K(i)\right]^T$ คือ เวกเตอร์ของบิตข้อมูลลำดับที่ i ของผู้ใช้ทั้งหมด ที่ได้จากการส่งผ่านดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน

$\tilde{d}_k(j)$ คือ บิตข้อมูลลำดับที่ j ของผู้ใช้คนที่ k ที่ได้จากการส่งผ่านตัวถอดรหัสแล้วนำมาทำการตัดสินค่าบิตแบบฮาร์ด

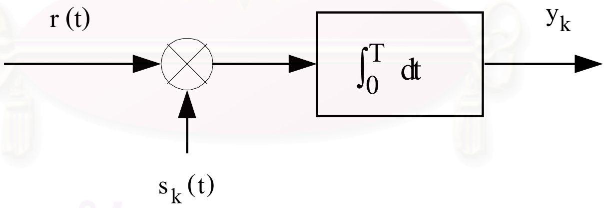
$\tilde{\mathbf{d}}(j) = \left[\tilde{d}_1(j) \quad \tilde{d}_2(j) \quad \Lambda \quad \tilde{d}_K(j)\right]^T$ คือ เวกเตอร์ของบิตข้อมูลลำดับที่ j ของผู้ใช้ทั้งหมด ที่ได้จากการส่งผ่านตัวถอดรหัสแล้วนำมาทำการตัดสินค่าบิตแบบฮาร์ด

รายละเอียดการทำงานในแต่ละส่วน

สัญญาณที่รับได้จากช่องสัญญาณ ประกอบด้วย ข้อมูลของผู้ใช้ทั้งหมดในระบบรวมกัน และมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนของช่องสัญญาณ ในที่นี้กำหนดให้ช่องสัญญาณมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก (AWGN) สามารถเขียนในรูปสมการได้ คือ

$$r(t) = \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=0}^{N-1} A_k b_k(i) s_k(t - iT) + n(t) \tag{2.1}$$

โดย A_k คือ แอมพลิจูดที่รับได้ของผู้ใช้คนที่ k



รูปที่ 2.3 โครงสร้างการทำงานของแมตช์ฟิลเตอร์สำหรับผู้ใช้คนที่ k

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แมตช์ฟิลเตอร์ คือ เครื่องรับแบบดั้งเดิม ทำหน้าที่แยกข้อมูลของผู้ใช้แต่ละคนออกจากสัญญาณรับที่ได้จากช่องสัญญาณ ซึ่งโครงสร้างการทำงานสำหรับผู้ใช้แต่ละคนมีลักษณะดังรูปที่ 2.3 การทำงานเริ่มต้นโดยการนำสัญญาณรับที่ได้มาคูณกับรหัสแผ่ของผู้ใช้คนนั้น จากนั้นทำการอินทิเกรตค่าในหนึ่งช่วงสัญลักษณ์ สามารถเขียนในรูปสมการได้เป็น

$$y_k(i) = \int_{iT}^{(i+1)T} s_k(t - iT) r(t) dt \tag{2.2}$$

นำสมการ (2.1) มาแทนลงในสมการข้างต้น จะได้

$$y_k(i) = A_k b_k(i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq k}}^{K} \rho_{k,j} A_j b_j(i) + \tilde{n}_k(i) \tag{2.3}$$

สามารถเขียนสมการข้างต้นได้ใหม่ในรูปของเวกเตอร์ นั่นคือ

$$\mathbf{y}(i) = \mathbf{RAb}(i) + \tilde{\mathbf{n}}(i) \tag{2.4}$$

กำหนดให้

R คือ เมตริกซ์สหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้แต่ละคน เมตริกซ์มีขนาด K*K

โดย $$R_{k,l} = \rho_{k,l} = \int_0^T s_k(t)s_l(t)dt = \rho_{l,k} \qquad k \neq l$$

$$R_{k,k} = \int_0^T s_k(t)s_k(t)dt = 1$$

A คือ เมตริกซ์ทแยงมุม ขนาด K*K สมาชิกในแนวทแยงประกอบด้วยค่าแอมพลิจูดที่รับได้ของผู้ใช้แต่ละคน นั่นคือ $\mathbf{A} = \text{diag}\ (A_1, \Lambda\ , A_K)$

$\tilde{\mathbf{n}}(i)$ คือ เวกเตอร์ของสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ที่มีค่าสหสัมพันธ์กัน ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากการส่งสัญญาณรับผ่านแมตช์ฟิลเตอร์ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ เมตริกซ์ความแปรปรวนเท่ากับ $\sigma^2\mathbf{R}$ และมีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น คือ

$$f(\tilde{\mathbf{n}}) = (2\pi)^{-K/2}|\Sigma|^{-1/2}\exp\left[-\frac{(\tilde{\mathbf{n}}-\mu)^T\Sigma^{-1}(\tilde{\mathbf{n}}-\mu)}{2}\right] \tag{2.5}$$

จากการทำงานของแมตช์ฟิลเตอร์ สังเกตว่า แมตช์ฟิลเตอร์จะใช้ข้อมูลจากชุดรหัสแผ่ของผู้ใช้คนที่ต้องการแยกสัญญาณออกมาเท่านั้น และไม่มีการนำข้อมูลของผู้ใช้คนอื่นในระบบมาช่วย โดยจะมองสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทาง (MAI) เป็นเหมือนสัญญาณรบกวน ทำให้เครื่องรับแบบดั้งเดิมนี้ ไม่สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทางออกไปได้ จึงจำเป็นต้องนำสัญญาณรับที่ได้ส่งต่อไปยังดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน

ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน ถูกเสนอขึ้นมาเพื่อลดการรบกวนจากสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทาง (MAI) เนื่องจากแมตช์ฟิลเตอร์ไม่สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้คนอื่นออกไปได้ ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี แบ่งได้เป็น [11]

1) ดีเทกเตอร์ที่เหมาะที่สุด (optimum detector) การดีเทกต์วิธีนี้จะใช้หลักการของการประมาณลำดับแบบความน่าเป็นจริงสูงสุด (maximum-likelihood sequence estimation : MLSE) การทำงานจะพิจารณาชุดของข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมด และถือว่าชุดของข้อมูลที่ทำให้ได้สัญญาณเหมือนกับลำดับของสัญญาณที่รับได้มากที่สุดเป็นข้อมูลที่ใช้ส่งมา ซึ่งถึงแม้ว่าเครื่องรับชนิดนี้จะมีสมรรถนะที่ดีมาก แต่มีข้อเสียที่สำคัญ คือ มีความซับซ้อนในการคำนวณสูงมาก โดยมีค่าเพิ่มขึ้นแปรตามจำนวนผู้ใช้ในระบบแบบเอกซ์โพเนนเชียล ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำมาประยุกต์ใช้งาน

2) ดีเทกเตอร์ที่เหมาะรองลงไป (sub-optimum detector) ถึงแม้ดีเทกเตอร์ประเภทนี้จะมีสมรรถนะด้อยกว่าดีเทกเตอร์ที่เหมาะที่สุด แต่ก็ใช้ความซับซ้อนในการคำนวณลดลงอย่างมาก

ดีเทกเตอร์ที่เหมาะรองลงไปสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ได้แก่

2.1) ดีเทกเตอร์แบบเชิงเส้น (linear detector) เช่น

- ดีเทกเตอร์ชนิดดีคอร์รีเลต (decorrelating detector : DD) การดีเทกต์วิธีนี้จะใช้กระบวนการแบบเชิงเส้นที่มีผลตอบเป็น ค่าเมตริกซ์ผกผันของเมตริกซ์สหสัมพันธ์ของรหัสแผ่ของผู้ใช้ในระบบ ถึงแม้การดีเทกต์ด้วยวิธีนี้สามารถกำจัดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทางออกไปได้ แต่ก็กลับทำให้สัญญาณรบกวนมีขนาดเพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้น เมื่อค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำ ดีเทกเตอร์ชนิดดีคอร์รีเลตนี้จะทำงานได้ผลไม่ดีนัก
- ดีเทกเตอร์ชนิดทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความผิดพลาดต่ำสุด (minimum mean square error detector : MMSE) การดีเทกต์วิธีนี้จะใช้กระบวนการแบบเชิงเส้นที่มีผลตอบเป็นค่าเมตริกซ์ผกผันของเมตริกซ์สหสัมพันธ์ของรหัสแผ่รวมกับเมตริกซ์สหสัมพันธ์ของสัญญาณรบกวนเนื่องจากการดีเทกต์ด้วยวิธีนี้มีการนำสัญญาณรบกวนมาร่วมพิจารณาด้วย จึงทำให้ดีเทกเตอร์ชนิดนี้สามารถทำงานได้ผลดีกว่าดีเทกเตอร์ชนิดดีคอร์รีเลต เมื่อค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าต่ำ และทำงานได้ผลดีใกล้เคียงกัน เมื่อค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าสูง

2.2) ดีเทกเตอร์แบบไม่เชิงเส้น (non-linear detector) เช่น

- ดีเทกเตอร์ชนิดขจัดสัญญาณแทรกสอดแบบขนาน (parallel interference cancellation : PIC) การดีเทกต์ด้วยวิธีนี้ การทำงานเริ่มต้นจากการนำสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้ทุกคนมาทำการตัดสินค่าบิตข้อมูล จากนั้นนำบิตข้อมูลเหล่านี้ไปทำการประมาณค่าสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทางของผู้ใช้แต่ละคนแล้วนำไปหักออกจากสัญญาณ

รับที่ได้ของผู้ใช้คนนั้น ผู้ใช้ทุกคนจะทำงานพร้อมกันทั้งระบบ การดีเทกต์วิธีนี้จะให้สมรรถนะที่ดีเมื่อมีการควบคุมกำลังแบบสมบูรณ์

- ดีเทกเตอร์ชนิดขจัดสัญญาณแทรกสอดแบบต่อเนื่อง (successive interference cancellation : SIC) การดีเทกต์ด้วยวิธีนี้ การทำงานเริ่มต้นจากการนำสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนที่มีกำลังแรงที่สุดมาทำการตัดสินค่าบิตข้อมูล ผู้ใช้คนที่มีกำลังรองลงไปก็จะนำบิตข้อมูลที่ตัดสินแล้วของผู้ใช้คนที่มีกำลังแรงกว่า ไปประมาณค่าสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทาง แล้วนำไปหักออกจากสัญญาณรับที่ได้ของผู้ใช้คนนั้น การทำงานจะเรียงลำดับไปเรื่อย ๆ ตามความแรงของกำลังของผู้ใช้แต่ละคน

- ดีเทกเตอร์ชนิดนำข้อมูลที่ตัดสินแล้วมาป้อนกลับ (decorrelating decision - feedback detector : DDFD) การดีเทกต์วิธีนี้ประกอบด้วยวงจรกรองป้อนไปหน้า และวงจรกรองป้อนกลับ วงจรกรองป้อนไปหน้าทำหน้าที่กำจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากผู้ใช้คนที่มีกำลังต่ำกว่าออกจากผู้ใช้คนที่มีกำลังสูงกว่า ส่วนวงจรกรองป้อนกลับมีหน้าที่ป้อนผลการตัดสินของผู้ใช้คนที่มีกำลังสูงกว่า เพื่อนำไปช่วยในการตัดสินค่าบิตของผู้ใช้คนที่มีกำลังต่ำกว่า

ตัวถอดรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้า ทำหน้าที่ถอดรหัสข้อมูล เพื่อให้บิตข้อมูลมีค่าตรงกับบิตข้อมูลที่ส่งมามากที่สุด ช่วยลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากสัญญาณรบกวนของช่องสัญญาณทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น

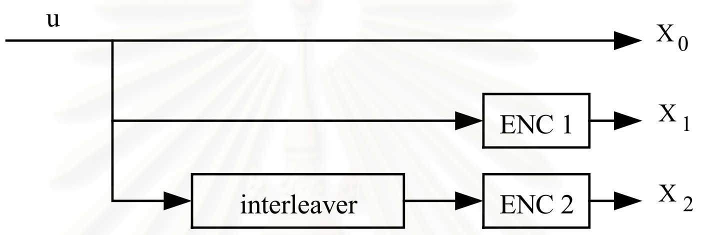
2.2 รหัสเทอร์โบ (Turbo code)

รหัสเทอร์โบได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสำหรับใช้ในการเข้ารหัสช่องสัญญาณ เนื่องจากมีคุณสมบัติที่น่าสนใจเป็นพิเศษ คือ สามารถจัดการกับปัญหาความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งข้อมูลผ่านช่องสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ จนสามารถทำให้สมรรถนะมีค่าเข้าใกล้ขีดจำกัดของแชนนอน (Shannon limit) โดยใช้วิธีการเข้ารหัสและถอดรหัสอย่างง่าย ๆ ไม่ซับซ้อน อาศัยเพียงกระบวนการแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่างตัวถอดรหัสย่อย ทำให้เกิดการถอดรหัสแบบวนซ้ำ (iterative decoding) ขึ้น

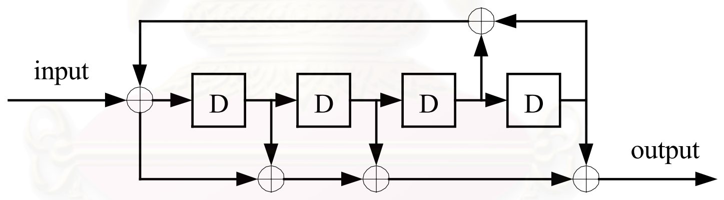
2.2.1 ตัวเข้ารหัสเทอร์โบ (Turbo Encoder)

โครงสร้างพื้นฐานของการเข้ารหัสเทอร์โบแสดงดังรูปที่ 2.4 การเข้ารหัสมีลักษณะเป็นแบบต่อขนาน ในที่นี้ กำหนดให้อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 u คือ บล็อกข้อมูลที่ต้องการเข้ารหัส ส่วน X_0 X_1 และ X_2 คือ บล็อกของคำรหัสที่ได้ โดย X_0 จะมีค่าเท่ากับบล็อกข้อมูลที่ส่งมา ซึ่งก็คือ u

ส่วน X_1 และ X_2 คือ บล็อกข้อมูลที่ได้จากตัวเข้ารหัสย่อย 1 และ 2 ตามลำดับ ตัววางสลับ (interleaver) ทำหน้าที่สลับลำดับบิตข้อมูล เพื่อทำให้ข้อมูลด้านเข้าของตัวเข้ารหัสย่อยทั้งสองตัวมีชุดข้อมูลที่แตกต่างกัน ตัวเข้ารหัสย่อยแต่ละตัวจะใช้ตัวเข้ารหัสคอนโวลูชันแบบมีระบบและมีการป้อนกลับ (recursive systematic convolution encoder) ซึ่งจะเลือกใช้แบบเดียวกันหรือต่างกันก็ได้ ตัวอย่างตัวเข้ารหัสคอนโวลูชันแบบมีระบบและมีการป้อนกลับแสดงดังรูปที่ 2.5 โดยกำหนดให้พหุนามป้อนไปหน้า (forward polynomial) คือ $1+D+D^2+D^4$ และพหุนามป้อนกลับ (backward polynomial) คือ $1+D^3+D^4$



รูปที่ 2.4 โครงสร้างพื้นฐานของการเข้ารหัสเทอร์โบ

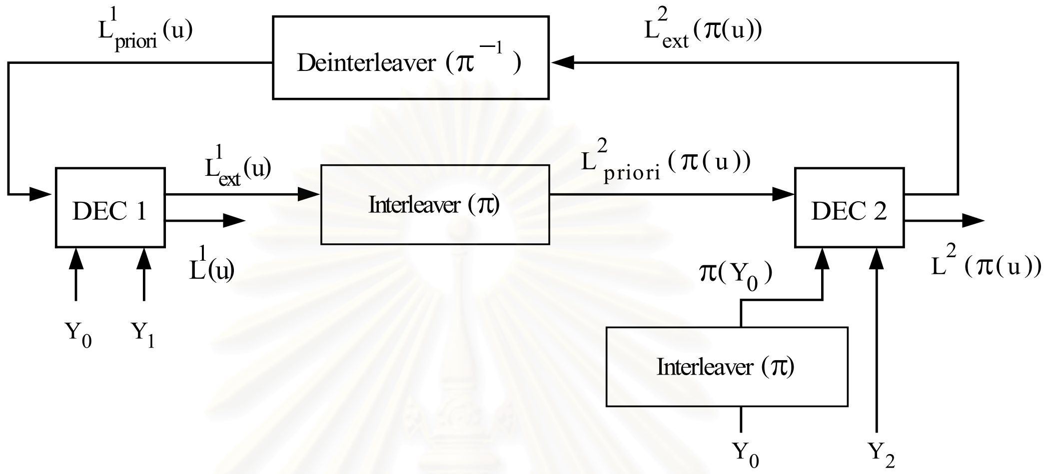


รูปที่ 2.5 ตัวอย่างตัวเข้ารหัสคอนโวลูชันแบบมีระบบและมีการป้อนกลับ

2.2.2 ตัวถอดรหัสเทอร์โบ (Turbo Decoder)

โครงสร้างพื้นฐานของการถอดรหัสเทอร์โบแสดงดังรูปที่ 2.6 ซึ่งมีลักษณะการทำงานแบบวนซ้ำ ตัวถอดรหัสย่อยจะต้องมีจำนวนเท่ากับตัวเข้ารหัสย่อยที่ใช้ในการเข้ารหัสเทอร์โบ และมีการทำงานที่สอดคล้องสัมพันธ์กัน ตัวถอดรหัสย่อยแต่ละตัวจะทำงานสลับกันไปมา นั่นคือ เมื่อตัวถอดรหัสย่อยตัวใดตัวหนึ่งอยู่ระหว่างการถอดรหัส ตัวถอดรหัสย่อยตัวที่เหลือจะหยุดการทำงาน ผลที่ได้จากการถอดรหัสจะถูกส่งต่อไปให้ตัวถอดรหัสย่อยตัวถัดไป เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการถอดรหัส การทำงานสลับกันไปมาระหว่างตัวถอดรหัสย่อย ทำให้เกิดการถอดรหัสแบบวนซ้ำขึ้น

และการวนซ้ำจะหยุดลงก็ต่อเมื่อผลที่ได้จากการถอดรหัสลู่เข้าสู่ค่าที่เหมาะสมหรือครบจำนวนรอบสูงสุดตามที่กำหนดไว้ จากนั้นนำผลที่ได้จากตัวถอดรหัสมาทำการตัดสินค่าบิตเพื่อให้ได้รับข้อมูลที่ส่งมาตามต้องการ



รูปที่ 2.6 โครงสร้างพื้นฐานของการถอดรหัสเทอร์โบ

จากรูปที่ 2.6 Y_0 Y_1 และ Y_2 เป็นสัญญาณรับที่ได้จากการส่งคำรหัส X_0 X_1 และ X_2 ผ่านช่องสัญญาณ ตามลำดับ การทำงานเริ่มต้นที่ตัวถอดรหัสย่อย 1 โดยการนำสัญญาณรับที่ได้จากข้อมูลส่วนที่ผ่านการเข้ารหัสด้วยตัวเข้ารหัสย่อย 1 (Y_1) กับสัญญาณรับที่ได้จากข้อมูลส่วนที่ไม่ผ่านการเข้ารหัส (Y_0) มาป้อนเข้าตัวถอดรหัสย่อย 1 จากนั้นตัวถอดรหัสย่อย 1 จะทำการถอดรหัส ผลที่ได้จะแบ่งเป็นสองส่วน ในส่วนแรก คือ ค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงของบิตข้อมูล ($L^1(u)$) ซึ่งเป็นค่าที่จะนำไปใช้ในการตัดสินบิตข้อมูลแต่ละบิตว่าน่าจะมีค่าเป็น 0 หรือ 1 และในส่วนที่สอง คือ ค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงของข่าวสารเอกซ์ทรินซิก ($L^1_{ext}(u)$) ซึ่งเป็นค่าที่จะนำไปป้อนให้ตัวถอดรหัสย่อย 2 เพื่อใช้งานในรูปของข่าวสารเบื้องแรก ($L^2_{priori}(\pi(u))$) จากนั้นตัวถอดรหัสย่อย 2 จะเริ่มทำงาน ซึ่งมีลักษณะการทำงานเช่นเดียวกับตัวถอดรหัสย่อย 1 โดยที่สัญญาณด้านเข้า คือ สัญญาณรับที่ได้จากข้อมูลส่วนที่ผ่านการเข้ารหัสด้วยตัวเข้ารหัสย่อย 2 (Y_2) กับสัญญาณรับที่ได้จากข้อมูลส่วนที่ไม่ผ่านการเข้ารหัส (Y_0) นอกจากนี้ ตัวถอดรหัสย่อย 2 ยังมีการนำตัววางสลับ ($\pi(u)$) มาวางก่อนการป้อน Y_0 เข้าสู่ตัวถอดรหัสย่อย 2 และวางอยู่ระหว่างตัวถอดรหัสย่อย 1 และ 2 เพื่อทำหน้าที่สลับลำดับบิตข้อมูลให้สอดคล้องตรงกับลำดับบิตที่ใช้ในตัวเข้ารหัสย่อย 2 และค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงของข่าวสารเอกซ์ทรินซิก ($L^2_{ext}(\pi(u))$) ที่ได้จากตัวถอดรหัสย่อย 2 จะถูกนำกลับไปป้อนให้ตัวถอดรหัสย่อย 1 เพื่อใช้งานในรูปของข่าวสารเบื้องแรก ($L^1_{priori}(u)$) เช่น

กัน ในรอบแรกของการทำงานนั้น กำหนดให้ ค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงของข่าวสารเบื้องแรกมีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายความว่า โอกาสที่บิตข้อมูลมีค่าเป็น 0 หรือ 1 มีความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นเท่ากัน

การคำนวณค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริง

ในการคำนวณจะใช้อัลกอริทึมที่เสนอโดย Bahl, Cocke, Jelinek and Raviv ในเอกสารอ้างอิง [9] มาช่วยในการคำนวณค่าความน่าจะเป็นเบื้องหลังเพื่อใช้สำหรับการตัดสินค่าบิตข้อมูล ในที่นี้ กำหนดให้การรับส่งสัญญาณเป็นแบบไบนารี

ค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริง (likelihood ratio) คือ

$$L(u_n) = \log \frac{P(u_n = 1 \mid \text{observation})}{P(u_n = 0 \mid \text{observation})} \tag{2.6}$$

โดย

$P(u_n = 1 \mid \text{observation})$ คือ ความน่าจะเป็นที่บิตข้อมูลลำดับที่ n มีค่าเป็น 1 เมื่อได้รับข้อมูลทั้งหมดจากการส่งผ่านช่องสัญญาณ

$P(u_n = 0 \mid \text{observation})$ คือ ความน่าจะเป็นที่บิตข้อมูลลำดับที่ n มีค่าเป็น 0 เมื่อได้รับข้อมูลทั้งหมดจากการส่งผ่านช่องสัญญาณ

observation คือ ข้อมูลทั้งหมดที่ได้รับ ในกรณีของตัวถอดรหัสย่อย 1 ข้อมูลทั้งหมดที่ได้รับจะประกอบด้วย Y_0 และ Y_1 ส่วนตัวถอดรหัสย่อย 2 จะประกอบด้วย $\pi(Y_0)$ และ Y_2

จากสมการ (2.6) สังเกตว่า อัตราส่วนความน่าเป็นจริง ($L(u_n)$) มีค่าอยู่ระหว่าง -∞ ถึง ∞ ดังนั้น เงื่อนไขที่ใช้ในการตัดสินบิตข้อมูล u_n คือ

$$\begin{aligned} u_n &= 0 \quad \text{ถ้า} \quad L(u_n) \le 0 \\ u_n &= 1 \quad \text{ถ้า} \quad L(u_n) > 0 \end{aligned} \tag{2.7}$$

ค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงในสมการ (2.6) สามารถนำมาเขียนในลักษณะของผลรวมคู่สเตตที่ใช้ในการเข้ารหัสได้เป็น

$$L(u_n) = \log \frac{\sum\limits_{(s',s):u_n=1} P(S_{n-1} = s', S_n = s, O_1^N)}{\sum\limits_{(s',s):u_n=0} P(S_{n-1} = s', S_n = s, O_1^N)} \tag{2.8}$$

โดย

S_n คือ สเตตของตัวเข้ารหัส ณ ลำดับบิตที่ n

O_1^N คือ ข้อมูลทั้งหมดที่ได้รับของตัวถอดรหัสย่อย ตั้งแต่ลำดับบิตที่ 1 ถึง N

N คือ จำนวนบิตใน 1 บล็อกข้อมูล

s', s คือ ค่าสเตตของตัวเข้ารหัสที่เป็นไปได้

จากสมการ (2.8) สามารถนำอัลกอริทึมของ BCJR [9] มาช่วยในการคำนวณ จะได้ สมการข้างต้นในรูปใหม่ คือ

$$L(u_n) = \log \frac{\sum_{(s',s):u_n=1} \alpha_{n-1}(s') \cdot \gamma_n(s',s) \cdot \beta_n(s)}{\sum_{(s',s):u_n=0} \alpha_{n-1}(s') \cdot \gamma_n(s',s) \cdot \beta_n(s)} \tag{2.9}$$

กำหนดให้

$$\begin{aligned} \alpha_n(s) &= P(S_n = s, O_1^n) \\ &= \sum_{\text{all } s'} \alpha_{n-1}(s') \cdot \gamma_n(s',s) \end{aligned} \tag{2.10}$$

$$\begin{aligned} \beta_n(s) &= P(O_{n+1}^N \mid S_n = s) \\ &= \sum_{\text{all } s'} \gamma_{n+1}(s \;\; , s') \cdot \beta_{n+1}(s') \end{aligned} \tag{2.11}$$

$$\begin{aligned} \gamma_n(s',s) &= P(S_n = s, O_n \mid S_{n-1} = s') \\ &= P(S_n = s \mid S_{n-1} = s') \cdot P(O_n \mid S_n = s, S_{n-1} = s') \end{aligned} \tag{2.12}$$

เงื่อนไขขอบเขต

ที่ $n = 0$ $\alpha_0(0) = 1$ และ $\alpha_0(s) = 0$ เมื่อ $s \neq 0$

ที่ $n = N$ $\beta_N(0) = 1$ และ $\beta_N(s) = 0$ เมื่อ $s \neq 0$

การพิสูจน์สมการต่าง ๆ ของอัลกอริทึม BCJR สามารถดูได้ในภาคผนวก ก

ในกรณีของตัวถอดรหัสย่อย 1

จากสมการ (2.12) สังเกตว่า $\gamma_{1,n}(s',s)$ จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อตัวเข้ารหัสย่อยไม่สามารถเปลี่ยนค่าสเตตจาก s' ไปเป็น s ได้ และถ้าการเปลี่ยนค่าสเตตดังกล่าวนี้มีความเป็นไปได้แล้ว ค่า $\gamma_{1,n}(s',s)$ จะมีค่าเท่ากับ

$$\gamma_{1,n}(s',s) = P(u_n)\cdot P(Y_{0,n} \mid X_{0,n})\Big|_{X_{0,n}=\text{data of } (S_{0,n-1}=s',S_{0,n}=s)} \cdot P(Y_{1,n} \mid X_{1,n})\Big|_{X_{1,n}=\text{parity of } (S_{1,n-1}=s',S_{1,n}=s)} \quad (2.13)$$

จากสมการข้างต้นนำไปแทนค่าลงในสมการ (2.9) จะได้ อัตราส่วนความน่าเป็นจริงที่ใช้ในตัวถอดรหัสย่อย 1 คือ

$$L^1(u_n) = \log \frac{\sum_{(s',s):u_n=1} \alpha_{1,n-1}(s')\cdot\gamma_{1,n}(s',s)\cdot\beta_{1,n}(s)}{\sum_{(s',s):u_n=0} \alpha_{1,n-1}(s')\cdot\gamma_{1,n}(s',s)\cdot\beta_{1,n}(s)}$$

$$= \log\frac{P(u_n=1)}{P(u_n=0)} + \log\frac{P(Y_{0,n} \mid X_{0,n}=1)}{P(Y_{0,n} \mid X_{0,n}=0)} + \log\frac{\sum_{(s',s):u_n=1}[\alpha_{1,n-1}(s')\cdot P(Y_{1,n} \mid X_{1,n})\cdot\beta_{1,n}(s)]}{\sum_{(s',s):u_n=0}[\alpha_{1,n-1}(s')\cdot P(Y_{1,n} \mid X_{1,n})\cdot\beta_{1,n}(s)]}$$

$$= L^1_{priori}(u_n) + L^1_{channel}(u_n) + L^1_{ext}(u_n) \quad (2.14)$$

จากสมการ (2.14) สังเกตว่า ค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงเกิดจากข่าวสาร 3 ชนิดรวมกัน ได้แก่ ข่าวสารเบื้องแรก (priori information) ข่าวสารจากช่องสัญญาณ (channel information) และข่าวสารเอกซ์ทรินซิก (extrinsic information) ซึ่งข่าวสารเอกซ์ทรินซิกที่คำนวณได้นี้จะถูกส่งต่อให้ตัวถอดรหัสย่อย 2 เพื่อใช้งานเป็นข่าวสารเบื้องแรกต่อไป

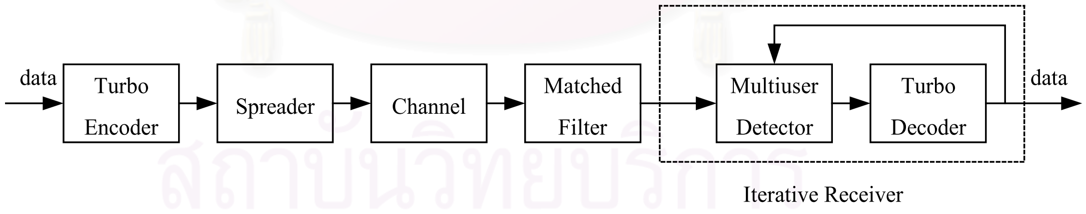
ค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงในตัวถอดรหัสย่อย 2 สามารถคำนวณได้ด้วยวิธีเช่นเดียวกับตัวถอดรหัสย่อย 1

บทที่ 3
ระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ

บทนี้กล่าวถึงระบบซีดีเอ็มเอที่มีการเข้ารหัส โดยนำรหัสเทอร์โบมาทำหน้าที่เป็นรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้าให้กับระบบ และในส่วนของภาครับ จะอธิบายวิธีการดัดแปลงเครื่องรับให้มีการแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่างดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนกับตัวถอดรหัสเทอร์โบ ทำให้การทำงานมีลักษณะแบบวนซ้ำ เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้น

3.1 หลักการทำงาน

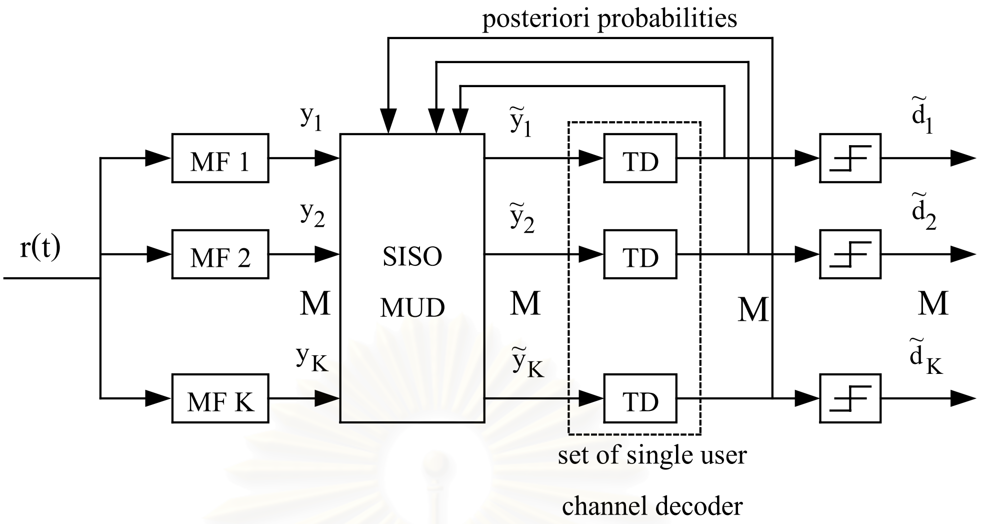
โครงสร้างการทำงานในระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบแสดงดังรูปที่ 3.1 การทำงานเริ่มต้นจากการนำข้อมูลของผู้ใช้ทุกคนในระบบมาทำการเข้ารหัสเทอร์โบ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากตัวเข้ารหัสไปทำการแผ่สัญญาณ แล้วนำสัญญาณของผู้ใช้ทั้งหมดรวมกันส่งผ่านช่องสัญญาณ ทางด้านรับนำสัญญาณรับที่ได้ส่งผ่านแมตช์ฟิลเตอร์ เพื่อทำการแยกข้อมูลของผู้ใช้แต่ละคนกลับคืนมา จากนั้นนำสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ส่งผ่านเครื่องรับแบบวนซ้ำ (iterative receiver) ซึ่งประกอบด้วย ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนกับตัวถอดรหัสเทอร์โบ โดยให้มีการแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่างกัน ทำให้เครื่องรับเกิดการทำงานแบบวนซ้ำขึ้น



รูปที่ 3.1 โครงสร้างการทำงานของระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ

ทางภาครับของระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ มีโครงสร้างการทำงานดังรูปที่ 3.2 ซึ่งในส่วนของเครื่องรับแบบวนซ้ำสามารถแบ่งขั้นตอนการทำงานออกเป็น 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่

- ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนชนิดซอฟต์อินพุตซอฟต์เอาต์พุต
- ชุดของตัวถอดรหัสช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้คนเดียว



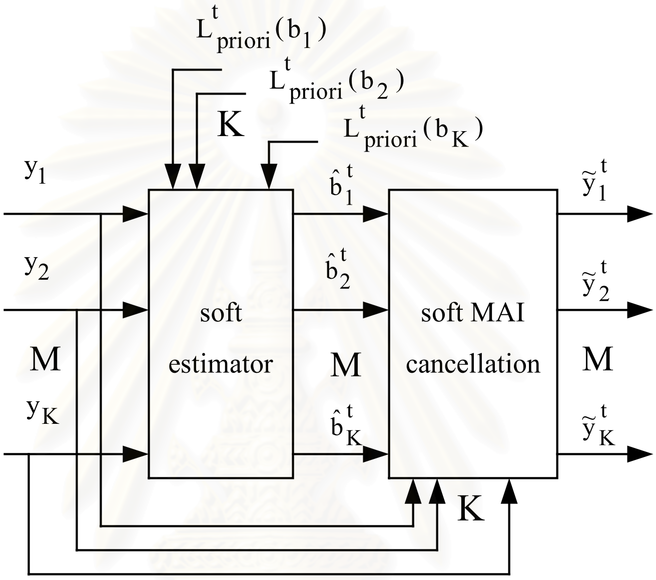
รูปที่ 3.2 โครงสร้างการทำงานของเครื่องรับแบบวนซ้ำ

การทำงานเริ่มต้น โดยเครื่องรับจะนำสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์มาส่งผ่านดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน เพื่อทำการขจัดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทาง (MAI) ออกไป ซึ่งในการประมาณค่าสัญญาณแทรกสอดนั้น จะใช้ประโยชน์จากข่าวสารที่ได้จากตัวถอดรหัสมาปรับปรุงการประมาณค่าเพื่อให้มีความถูกต้องมากขึ้น จากนั้นนำสัญญาณที่ได้ทำการขจัดสัญญาณแทรกสอดแล้วส่งต่อไปยังตัวถอดรหัสช่องสัญญาณ ข่าวสารที่ได้จากตัวถอดรหัสก็จะถูกป้อนกลับไปใช้ในการประมาณค่าสัญญาณแทรกสอดอีกครั้ง ลักษณะการทำงานแบบวนซ้ำจึงเกิดขึ้น ซึ่งเมื่อครบจำนวนรอบการทำงานตามต้องการ เครื่องรับจะนำค่าความน่าจะเป็นเบื้องหลังของตัวถอดรหัสช่องสัญญาณที่คำนวณได้ในรอบสุดท้าย มาทำการตัดสินค่าบิตแบบฮาร์ดเพื่อให้ได้รับข้อมูลที่ส่งมาตามต้องการ

3.2 ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนชนิดซอฟต์อินพุตซอฟต์เอาต์พุต (soft input soft output multiuser detector : SISO MUD)

ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนสามารถทำได้หลายวิธีดังกล่าวไว้ในหัวข้อ 2.1.2 ซึ่งการทำงานในที่นี้จะเลือกใช้ดีเทกเตอร์ชนิดขจัดสัญญาณแทรกสอดแบบขนาน เนื่องจากดีเทกเตอร์ชนิดนี้เป็นวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณต่ำและง่ายที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน โดยมีโครงสร้างการทำงานแสดงดังรูปที่ 3.3 หลักการทำงานอย่างคร่าว ๆ คือ เริ่มต้นด้วยการประมาณค่าบิตของผู้ใช้แต่ละคน ซึ่งได้มาจากการนำสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์และข่าวสารเบื้องแรกของผู้ใช้มาเป็น

ความรู้ช่วยในการประมาณ เมื่อประมาณค่าบิตของผู้ใช้ได้ครบทุกคนแล้ว จากนั้นจะนำค่าบิตประมาณเหล่านี้ไปทำการประมาณค่าสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทาง (MAI) ของผู้ใช้แต่ละคน แล้วนำไปหักล้างออกจากสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ สัญญาณรับที่ได้ทำการขจัดสัญญาณแทรกสอดแล้วจะถูกส่งต่อไปยังตัวถอดรหัสช่องสัญญาณ เพื่อทำการถอดรหัสข้อมูลต่อไป การทำงานในส่วนนี้ผู้ใช้ในระบบจะทำงานพร้อมกันทั้งหมด



รูปที่ 3.3 โครงสร้างการทำงานของดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน
ในการวนซ้ำรอบที่ t

รายละเอียดเกี่ยวกับสัญลักษณ์

$y_k(i)$ คือ บิตข้อมูลลำดับที่ i ของผู้ใช้คนที่ k ที่ได้จากการผ่านแมตช์ฟิลเตอร์

$\mathbf{y}(i)=\left[y_1(i) \quad y_2(i) \quad \Lambda \quad y_K(i)\right]^T$ คือ เวกเตอร์ของบิตข้อมูลลำดับที่ i ของผู้ใช้ทั้งหมดที่ได้จากการผ่านแมตช์ฟิลเตอร์

$L^t_{priori}\left(b_k(i)\right)$ คือ ค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงเบื้องแรกของบิตข้อมูลลำดับที่ i ของผู้ใช้คนที่ k ในการวนซ้ำรอบที่ t มีค่าเป็น

$$L^t_{priori}\left(b_k(i)\right) = \log \frac{P\left(b_k(i)=+1\right)}{P\left(b_k(i)=-1\right)} \tag{3.1}$$

$b_k^{t}(i)$ คือ บิตข้อมูลลำดับที่ i ของผู้ใช้คนที่ k ที่ได้จากการประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์ ในการวนซ้ำรอบที่ t

$\mathbf{b}^{t}(i) = \left[b_1^{t}(i) \quad b_2^{t}(i) \quad \Lambda \quad b_K^{t}(i) \right]^T$ คือ เวกเตอร์ของบิตข้อมูลลำดับที่ i ของผู้ใช้ทั้งหมดที่ได้จากการประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์ในการวนซ้ำรอบที่ t

$\tilde{y}_k^{t}(i)$ คือ บิตข้อมูลลำดับที่ i ของผู้ใช้คนที่ k ที่ได้จากการผ่านดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน ในการวนซ้ำรอบที่ t

$\tilde{\mathbf{y}}^{t}(i) = \left[\tilde{y}_1^{t}(i) \quad \tilde{y}_2^{t}(i) \quad \Lambda \quad \tilde{y}_K^{t}(i) \right]^T$ คือ เวกเตอร์ของบิตข้อมูลลำดับที่ i ของผู้ใช้ทั้งหมดที่ได้จากการผ่านดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน ในการวนซ้ำรอบที่ t

จากโครงสร้างการทำงานของดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนในรูปที่ 3.3 สามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์ และการขจัดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทางชนิดซอฟต์

3.2.1 ตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์ (soft estimator)

ตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์ทำหน้าที่ประมาณค่าบิตข้อมูลที่ส่งมาของผู้ใช้แต่ละคน โดยใช้ประโยชน์จากสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์กับค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงเบื้องแรก ซึ่งการทำงานในรอบแรกนั้นเครื่องรับยังไม่มีข้อมูลของข่าวสารเบื้องแรก จึงกำหนดให้ค่าความน่าจะเป็นที่บิตข้อมูลมีค่าเป็น -1 หรือ +1 เท่ากัน ส่วนในรอบต่อ ๆ มานั้นจะใช้ความรู้ที่ได้จากการถอดรหัสช่องสัญญาณ ซึ่งในที่นี้ก็คือ ตัวถอดรหัสเทอร์โบทำหน้าที่คำนวณค่าอัตราส่วนความน่าจะเป็นเบื้องหลังส่งออกมา ข่าวสารดังกล่าวจะถูกนำมาใช้เป็นข่าวสารเบื้องแรกในการประมาณค่าบิต ทำให้เกิดการปรับปรุงค่าบิตประมาณให้ถูกต้องมากขึ้นตามจำนวนรอบการวนซ้ำที่เพิ่มขึ้น

3.2.2 การขจัดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทางชนิดซอฟต์ (soft MAI cancellation)

ภาครับในที่นี้เลือกใช้ดีเทกเตอร์ชนิดขจัดสัญญาณแทรกสอดแบบขนาน เนื่องจากวิธีนี้เป็นวิธีที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่ายและมีความซับซ้อนในการคำนวณต่ำ หลักการทำงานของดีเทกเตอร์ชนิดนี้ คือ เริ่มต้นจากการนำบิตข้อมูลของผู้ใช้แต่ละคนที่ประมาณได้ในแต่ละรอบมาคำนวณค่าประมาณของสัญญาณแทรกสอดระหว่างผู้ใช้เนื่องจากการเข้าถึงหลายทาง จากนั้นนำไป

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หักออกจากสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ ขั้นตอนการทำงานสามารถเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

หลักการคำนวณ จากสมการ (2.3) สัญญาณรับที่ได้จากการผ่านแมตช์ฟิลเตอร์ คือ

$$y_k(i) = A_k b_k(i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{K} \rho_{k,j} A_j b_j(i) + \tilde{n}_k(i) \tag{3.2}$$

สังเกตว่า สัญญาณรับที่ได้จากการผ่านแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้แต่ละคนนั้นประกอบด้วยสัญญาณ 3 ชนิดรวมกัน ได้แก่

1. สัญญาณที่ผู้ใช้คนนั้นต้องการ
2. สัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทาง (MAI) ซึ่งก็คือสัญญาณรบกวนจากผู้ใช้คนอื่น ๆ ในระบบ โดยเกิดขึ้นเนื่องจากการตั้งฉากกันอย่างไม่สมบูรณ์ของรหัสแผ่ของผู้ใช้คนอื่น ๆ ต่อผู้ใช้คนนั้น
3. สัญญาณรบกวนเนื่องจากช่องสัญญาณ ในที่นี้ให้ช่องสัญญาณมีสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก

นำค่าบิตประมาณที่ได้จากการประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์ มาทำการประมาณค่าในส่วนของสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทาง (MAI) แล้วนำไปหักออกจากสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์

ดังนั้น สัญญาณรับที่ได้จากการส่งข้อมูลผ่านดีเทกเตอร์ชนิดขจัดสัญญาณแทรกสอดแบบขนานในรอบการวนซ้ำที่ t คือ

$$\tilde{y}_k^{t}(i) = y_k(i) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{K} \rho_{k,j} A_j b_j^{t}(i) \tag{3.3}$$

ซึ่งสามารถแจกแจงสมการข้างต้น โดยแทนค่าสมการ (3.2) ลงในสมการ (3.3) จะได้

$$\tilde{y}_k^{t}(i) = A_k b_k(i) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{K} \rho_{k,j} A_j \left(b_j(i) - b_j^{t}(i) \right) + \tilde{n}_k(i) \tag{3.4}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 ชุดของตัวถอดช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้คนเดียว (set of single user channel decoders)

ตัวถอดรหัสช่องสัญญาณ ในที่นี้ก็คือตัวถอดรหัสเทอร์โบ ซึ่งได้แสดงรายละเอียดขั้นตอนการถอดรหัสไว้ในหัวข้อ 2.2.2 แล้ว หลักการทำงานอย่างคร่าว ๆ คือ เริ่มต้นจากผู้ใช้แต่ละคนจะนำข้อมูลที่ได้จากการขจัดสัญญาณแทรกสอดระหว่างผู้ใช้มาทำการถอดรหัสช่องสัญญาณ เอาต์พุตที่ได้จะอยู่ในรูปของค่าอัตราส่วนความน่าจะเป็นเบื้องหลัง โดยค่าดังกล่าวนี้จะถูกนำไปป้อนกลับให้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนเพื่อใช้เป็นข่าวสารเบื้องแรกสำหรับการประมาณค่าบิต สังเกตว่าในตัวประมาณค่าบิตนั้นจะทำการประมาณค่าบิตข้อมูลครบทุกบิตที่ส่งมา แต่ในตัวถอดรหัสเทอร์โบจะผลิตค่าความน่าจะเป็นเบื้องหลังเฉพาะบิตข้อมูลซิสเต็มเมติกเท่านั้น ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้มีการดัดแปลงให้ตัวถอดรหัสเทอร์โบสามารถผลิตค่าอัตราส่วนความน่าจะเป็นเบื้องหลังในส่วนของบิตข้อมูลพาริตีออกมาด้วยเพื่อสำหรับใช้ในการประมาณค่าบิต โดยกำหนดให้ค่าอัตราส่วนความน่าจะเป็นเบื้องหลังของบิตข้อมูลพาริตีมีค่าเป็น

$$L(p_n) = \log \frac{\sum_{(s',s):p_n=1} \alpha_{n-1}(s') \cdot \gamma_n(s',s) \cdot \beta_n(s)}{\sum_{(s',s):p_n=0} \alpha_{n-1}(s') \cdot \gamma_n(s',s) \cdot \beta_n(s)} \tag{3.5}$$

จากสมการข้างต้นหมายความว่า ค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงของบิตข้อมูลพาริตีเกิดจากผลรวมของทุกคู่สเตตในการเข้ารหัสที่ทำให้เอาต์พุตเท่ากับ 1 หารด้วยผลรวมของทุกคู่สเตตในการเข้ารหัสที่ทำให้เอาต์พุตเท่ากับ 0

บทที่ 4
การประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์

บทนี้กล่าวถึงหลักการคำนวณที่ใช้สำหรับการประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์วิธีต่าง ๆ และวิธีที่นำเสนอขึ้นเพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบ รวมทั้งเปรียบเทียบความซับซ้อนในการคำนวณของแต่ละวิธี

วิธีการคำนวณในตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์ สามารถคำนวณได้หลายวิธี โดยในวิธีการคำนวณแต่ละวิธี ผู้ใช้ทุกคนในระบบและทุกบิตข้อมูลจะใช้การคำนวณในลักษณะเดียวกัน ดังนั้นในที่นี้จะแสดงการคำนวณเฉพาะกรณีของผู้ใช้คนที่ k เท่านั้น และขอละสัญลักษณ์แสดงตำแหน่งของบิตข้อมูล

4.1 การประมาณค่าบิตโดยนำข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้ทุกคนมาช่วยในการประมาณ

การคำนวณวิธีนี้ จะอาศัยข้อมูลจากสัญญาณรับที่ได้จากการส่งผ่านแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้ทุกคนในระบบมาเป็นข่าวสารช่วยในการประมาณค่าบิตของผู้ใช้คนที่ k ซึ่งเมื่อสังเกตสมการ (2.4) จะพบว่า สัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้ทุกคนในระบบจะมีข่าวสารของบิตข้อมูลของผู้ใช้คนที่ k รวมอยู่ด้วยเสมอ ดังนั้น ในการประมาณค่าบิตข้อมูลของผู้ใช้คนที่ k จึงมีการนำข้อมูลที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้ทั้งหมดมาเป็นข่าวสารช่วยในการประมาณ ซึ่งสามารถเขียนในรูปของสมการได้ คือ

$$b_k^{t} = E\left[b_k \middle| y_1, \Lambda\ , y_K\right] \tag{4.1}$$

จากสมการข้างต้น สามารถเขียนสมการใหม่ในรูปของค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริง จะได้

$$b_k^{t} = \tanh\left[\left(L^{t}_{channel}(b_k) + L^{t}_{priori}(b_k)\right)\Big/ 2\right] \tag{4.2}$$

กำหนดให้

$$L^{t}_{channel}(b_k) = \log\frac{P(\mathbf{y} \mid b_k = +1)}{P(\mathbf{y} \mid b_k = -1)} \tag{4.3}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$L^{t}_{priori}(b_k) = \log \frac{P(b_k = +1)}{P(b_k = -1)} \quad (4.4)$$

โดย

$$L^{1}_{priori}(b_k) = 0 \qquad , \quad L^{t}_{priori}(b_k) = L^{t-1}_{posteriori}(b_k) \quad \text{เมื่อ } t > 1 \quad (4.5)$$

ในที่นี้ ให้ช่องสัญญาณมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และค่าความแปรปรวนเท่ากับ σ^2

กำหนดให้

$$B^{+}_{k} = \left\{(b_1, \ldots, b_{k-1}, +1, b_{k+1}, \ldots, b_K) : b_j \in \{+1, -1\}, j \neq k\right\}$$

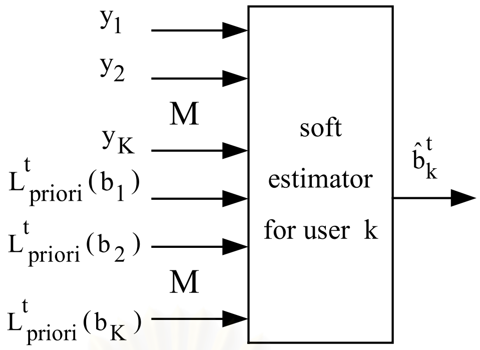
$$B^{-}_{k} = \left\{(b_1, \ldots, b_{k-1}, -1, b_{k+1}, \ldots, b_K) : b_j \in \{+1, -1\}, j \neq k\right\}$$

ค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงของช่องสัญญาณ มีค่าเป็น

$$L^{t}_{channel}(b_k) = \frac{2A_k b_k y_k}{\sigma^2} + \log \frac{\sum\limits_{\mathbf{b} \in B^{+}_{k}} \exp\left[-\mathbf{b}^T \mathbf{ARAb} \big/ (2\sigma^2)\right] \prod\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{K} \exp\left(A_j b_j y_j \big/ \sigma^2\right) * \left[1 + b_j * \tanh\left(L^{t}_{priori}(b_j)/2\right)\right]}{\sum\limits_{\mathbf{b} \in B^{-}_{k}} \exp\left[-\mathbf{b}^T \mathbf{ARAb} \big/ (2\sigma^2)\right] \prod\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{K} \exp\left(A_j b_j y_j \big/ \sigma^2\right) * \left[1 + b_j * \tanh\left(L^{t}_{priori}(b_j)/2\right)\right]} \quad (4.6)$$

จากสมการ (4.6) สังเกตว่า ในการคำนวณค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงของช่องสัญญาณ ($L^{t}_{channel}$) ด้วยวิธีนี้จะมีค่าความซับซ้อนในการคำนวณสูงมาก ทำให้การประมาณค่าบิตวิธีนี้ไม่เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน

โครงสร้างการทำงานของตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์ ในการวนซ้ำรอบที่ t โดยใช้ข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้ทุกคนมาช่วยในการประมาณค่า แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างการทำงานของตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์
โดยใช้การคำนวณด้วยวิธีที่มีความซับซ้อนมากที่สุด

4.2 การประมาณค่าบิตโดยนำเฉพาะข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนที่ต้องการมาช่วยในการประมาณ

การคำนวณวิธีนี้เป็นวิธีที่เสนอโดย Y. Zhang และ R. S. Blum ในเอกสารอ้างอิง [8] เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณลง ซึ่งจากเดิมในการประมาณค่าบิตของผู้ใช้คนที่ k นั้น จะใช้ข้อมูลจากสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้ทั้งหมดในระบบ แต่การประมาณค่าบิตในวิธีนี้จะใช้ข้อมูลในการประมาณลดลง เหลือเพียงข้อมูลจากสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์เฉพาะของผู้ใช้คนที่ k เท่านั้น เนื่องจากในสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนที่ k ค่ากำลังของสัญญาณบิตข้อมูลของผู้ใช้คนที่ k จะมีค่าสูงสุด เมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนอื่น ๆ นอกจากนี้จะกำหนดให้สัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนอื่น ๆ จะมองบิตข้อมูลของผู้ใช้คนที่ k เป็นเหมือนสัญญาณรบกวน

ในการประมาณค่าบิตของผู้ใช้คนที่ k นั้น สามารถเขียนในรูปสมการได้ คือ

$$\hat{b}_k^t = E\left[b_k \middle| y_k\right] \tag{4.7}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการข้างต้น สามารถเขียนในรูปของค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงได้เช่นเดียวกับการประมาณค่าบิตในวิธีแรก นั่นคือ

$$\hat{b}_k^t = \tanh\left[\left(L^t_{channel}(b_k) + L^t_{priori}(b_k)\right)/2\right]$$

กำหนดให้

$$L^{t}_{channel}(b_k) = \log \frac{P(y_k \mid b_k = +1)}{P(y_k \mid b_k = -1)} \tag{4.8}$$

ส่วนค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงของข่าวสารเบื้องแรก มีค่าเช่นเดียวกับสมการ (4.4) และ (4.5) นั่นคือ

$$L^{t}_{priori}(b_k) = \log \frac{P(b_k = +1)}{P(b_k = -1)}$$

โดย

$$L^{1}_{priori}(b_k) = 0 \qquad , \quad L^{t}_{priori}(b_k) = L^{t-1}_{posteriori}(b_k) \quad \text{เมื่อ } t > 1$$

ในที่นี้ ให้ช่องสัญญาณมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และค่าความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 การประมาณค่าบิตวิธีนี้จะมองสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทาง (MAI) เป็นเหมือนสัญญาณรบกวน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการประมาณค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนขึ้นมาใหม่ นั่นคือ

$$\sigma^2_{all,k} = \sigma^2 + \sigma^2_{MAI,k} \tag{4.9}$$

โดย

$$\sigma^2_{MAI,k} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{K} \left(\rho_{k,j} A_j\right)^2 \tag{4.10}$$

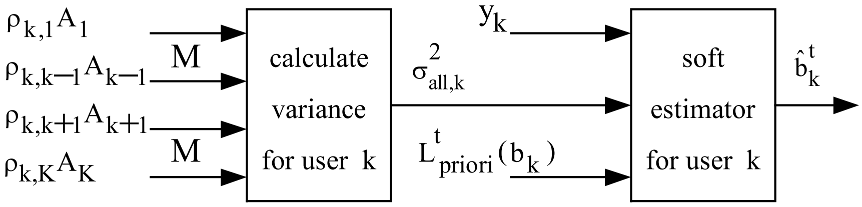
จะได้ว่า ค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงของช่องสัญญาณ คือ

$$L^{t}_{channel}(b_k) = 2 y_k A_k \Big/ \sigma^2_{all,k} \tag{4.11}$$

จากสมการข้างต้น สังเกตว่า การคำนวณค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงของช่องสัญญาณจะไม่ขึ้นกับจำนวนรอบในการวนซ้ำ และความซับซ้อนในการคำนวณมีค่าลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับการประมาณค่าบิตในวิธีแรก

โครงสร้างการทำงานของตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์ ในการวนซ้ำรอบที่ t โดยใช้เฉพาะข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนที่ต้องการเท่านั้นมาช่วยในการประมาณค่า แสดงดังรูปที่ 4.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2 โครงสร้างการทำงานของตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์
โดยใช้การคำนวณด้วยวิธีที่เสนอโดย Zhang ดังเอกสารอ้างอิง [8]

4.3 การประมาณค่าบิตโดยนำข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนที่ต้องการและค่าบิตประมาณของผู้ใช้คนอื่น ๆ ในรอบที่แล้วมาช่วยในการประมาณ

การคำนวณวิธีนี้เป็นวิธีที่นำเสนอขึ้นมาสำหรับใช้ในงานวิจัย โดยในการประมาณค่าบิตของผู้ใช้คนที่ k นั้น สามารถประมาณได้จากสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์เฉพาะผู้ใช้คนที่ k เช่นเดียวกับวิธีที่เสนอในเอกสารอ้างอิง [8] แต่เนื่องจากสัญญาณรับที่ได้จากผู้ใช้คนที่ k มีสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้คนอื่นรบกวนอยู่ ซึ่งแทนที่จะมองสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนอื่น ๆ เป็นสัญญาณรบกวน ในงานวิจัยนี้จะนำบิตประมาณในรอบที่แล้วมาเป็นความรู้เพิ่มเติมช่วยให้การประมาณมีความถูกต้องมากขึ้น

ในการประมาณค่าบิตนั้น สามารถเขียนในรูปสมการได้ คือ

$$\hat{b}_k^t = E\left[b_k \middle| y_k, \hat{b}_1^{t-1}, \ldots, \hat{b}_{k-1}^{t-1}, \hat{b}_{k+1}^{t-1}, \ldots, \hat{b}_K^{t-1}\right] \tag{4.12}$$

จากสมการข้างต้น สามารถจัดให้อยู่ในรูปของค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงเช่นเดียวกับการประมาณค่าบิตในสองวิธีแรก จะได้

$$\tilde{b}_k^t = \tanh\left[\left(L^t_{channel}(b_k) + L^t_{priori}(b_k)\right)\big/2\right]$$

กำหนดให้

$$L^t_{channel}(b_k) = \log \frac{P(y_k \mid \hat{b}_1^{t-1}, \ldots, \hat{b}_{k-1}^{t-1}, b_k = +1, \hat{b}_{k+1}^{t-1}, \ldots, \hat{b}_K^{t-1})}{P(y_k \mid \hat{b}_1^{t-1}, \ldots, \hat{b}_{k-1}^{t-1}, b_k = -1, \hat{b}_{k+1}^{t-1}, \ldots, \hat{b}_K^{t-1})} \tag{4.13}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ส่วนค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงของข่าวสารเบื้องแรก มีค่าเช่นเดียวกับสมการ (4.4) และ (4.5) นั่นคือ

$$L^{t}_{priori}(b_k) = \log \frac{P(b_k = +1)}{P(b_k = -1)}$$

โดย

$$L^{1}_{priori}(b_k) = 0 \qquad , \quad L^{t}_{priori}(b_k) = L^{t-1}_{posteriori}(b_k) \quad \text{เมื่อ } t > 1$$

ในที่นี้ ให้ช่องสัญญาณมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และค่าความแปรปรวนเท่ากับ σ^2

ค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงของช่องสัญญาณ มีค่าเป็น

$$L^{t}_{channel}(b_k) = \frac{2}{\sigma^2} A_k \Big(y_k - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{K} \rho_{k,j} A_j \hat{b}_j^{t-1}\Big) \tag{4.14}$$

จากสมการข้างต้น สังเกตว่า ค่าที่อยู่ในวงเล็บทางด้านขวาของสมการมีค่าเท่ากับสัญญาณรับที่ได้จากดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนชนิดขจัดสัญญาณแทรกสอดแบบขนาน ดังสมการ (3.3) นั่นคือ

$$\tilde{y}_k^{t} = y_k - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{K} \rho_{k,j} A_j \hat{b}_j^{t}$$

นำสมการข้างต้น ไปแทนค่าลงในสมการ (4.14) จะได้เป็น

$$L^{t}_{channel}(b_k) = \frac{2}{\sigma^2} A_k \tilde{y}_k^{t-1} \tag{4.15}$$

ดังนั้น การประมาณค่าบิตด้วยวิธีนี้ก็เปรียบเหมือนกับการนำข้อมูลที่ได้รับจากดีเทกเตอร์ของผู้ใช้คนที่ต้องการในรอบที่แล้วมาช่วยในการประมาณ สามารถเขียนในรูปสมการได้เป็น

$$\hat{b}_k^{t} = E\left[b_k \middle| \tilde{y}_k^{t-1}\right] \tag{4.16}$$

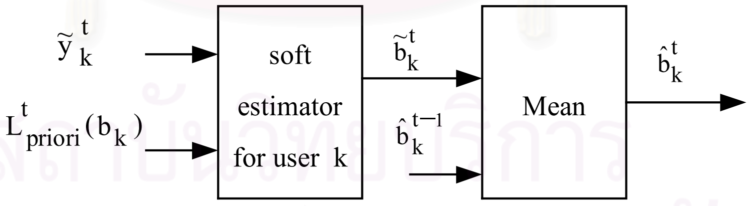
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอนี้ สังเกตว่า ถ้าค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้มีค่าสูง การประมาณค่าในรอบแรกจะมีความผิดพลาดอย่างมากและจะส่งผลต่อรอบถัดไปด้วย ทำให้การประมาณค่าบิตยิ่งมีความผิดพลาดมากขึ้น ซึ่งถึงแม้การทำงานจะเพิ่มการวนซ้ำอีกกี่รอบก็ตามผลที่ได้ก็คงไม่ดีขึ้น และการค่าประมาณที่ได้ในแต่ละรอบจะมีลักษณะแกว่ง นั่นคือ เมื่อค่าบิตประมาณในรอบปัจจุบันมีค่าเป็นบวกค่าบิตประมาณในรอบถัดไปจะมีค่าเป็นลบ หรือ เมื่อค่าบิตประมาณในรอบปัจจุบันมีค่าเป็นลบค่าบิตประมาณในรอบถัดไปจะมีค่าเป็นบวก ดังนั้น จึงมีการปรับปรุงการประมาณค่าบิตวิธีนี้โดยให้ค่าบิตประมาณได้มาจาก ค่าเฉลี่ยระหว่างค่าที่ประมาณได้ในรอบที่แล้วกับค่าที่ประมาณในรอบปัจจุบัน เพื่อลดผลของการแกว่งที่จะเกิดขึ้น ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการได้ คือ

$$\hat{b}_k^t = \frac{1}{2} * (\hat{b}_k^{t-1} + \tilde{b}_k^t) \qquad (4.17)$$

การเฉลี่ยค่าบิตประมาณนี้ อาจส่งผลให้การประมาณค่าบิตลู่เข้าช้าลงเมื่อค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้มีค่าต่ำ แต่ทำให้การประมาณค่าบิตดีขึ้นกว่าเดิมเมื่อค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้มีค่าสูง

โครงสร้างการทำงานของตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์ ในการวนซ้ำรอบที่ t โดยใช้ข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนที่ต้องการและค่าบิตประมาณในรอบที่แล้วของผู้ใช้คนอื่น ๆ มาช่วยในการประมาณค่า แสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โครงสร้างการทำงานของตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์
โดยใช้การคำนวณด้วยวิธีที่นำเสนอ

การพิสูจน์สมการต่าง ๆ ที่ใช้ในแต่ละวิธีการคำนวณในตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์นั้น ได้แสดงรายละเอียดไว้ในภาคผนวก ข

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4 ความซับซ้อนในการคำนวณที่ใช้ในการประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์แต่ละวิธี

ความซับซ้อนในการคำนวณ ในที่นี้วัดจากจำนวนครั้งในการใช้ตัวดำเนินการ (opterator) ต่าง ๆ ได้แก่ การคูณ การหาร การบวก การลบ รวมทั้งการใช้ฟังก์ชันลอการิทึมและฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล

ตารางที่ 4.1 ความซับซ้อนในการคำนวณค่าบิตชนิดซอฟต์แต่ละวิธี

การประมาณค่าบิต	จำนวนการคูณ / หาร	จำนวนการบวก / ลบ	จำนวนฟังก์ชันลอการิทึม / ฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล
หัวข้อ 4.1	$2^K(K^2+11K-7)T + 8T$	$2^K(K^2+3K-3)T + 2T$	$2^K(2K-1)T + 2T$
หัวข้อ 4.2	2*(K-1) + 3T + 3	(K–1) + 3T	T
หัวข้อ 4.3	7T	4T	T

โดย จำนวนความซับซ้อนในการคำนวณ มีหน่วยเป็น ต่อคนต่อบิต

K คือ จำนวนผู้ใช้ทั้งหมดในระบบ

T คือ จำนวนรอบที่ใช้ในการวนซ้ำของเครื่องรับ จนผลที่ได้มีการลู่เข้า

จากตารางที่ 4.1 แสดงความซับซ้อนในการคำนวณของการประมาณค่าบิตในแต่ละวิธี พบว่า การประมาณค่าบิตด้วยวิธีในหัวข้อ 4.1 ซึ่งเป็นการประมาณค่าบิตโดยนำข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้ทุกคนมาช่วยในการประมาณค่า เป็นวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับสองวิธีที่เหลือ ความซับซ้อนในการคำนวณจะมีค่าแปรตามสองยกกำลังจำนวนผู้ใช้ทั้งหมดในระบบ ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้งาน ส่วนการประมาณค่าบิตด้วยวิธีในหัวข้อ 4.2 เป็นวิธีที่เสนอโดย Zhang ซึ่งทำการประมาณค่าบิตโดยการนำข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์เฉพาะของผู้ใช้คนที่ต้องการเท่านั้นมาช่วยในการประมาณค่า ความซับซ้อนในการคำนวณจะมีค่าแปรตามจำนวนผู้ใช้ทั้งหมดในระบบและจำนวนรอบที่ใช้ในการวนซ้ำ ซึ่งความซับซ้อนในส่วนแรกที่แปรตามจำนวนผู้ใช้นั้น เกิดจากในส่วนของการประมาณค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนขึ้นมาใหม่ และการประมาณค่าบิตด้วยวิธีในหัวข้อ 4.3 คือ วิธีที่นำเสนอขึ้นสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งทำการประมาณค่าบิตโดยการนำข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนที่ต้องการ และค่าบิตประมาณในรอบที่แล้วของผู้ใช้คนอื่น ๆ มาช่วยในการประมาณค่า พบว่า ความซับซ้อนในการคำนวณมีค่าแปรตามจำนวนรอบในการวนซ้ำเท่านั้น ไม่ขึ้นกับจำนวนผู้ใช้ในระบบ

บทที่ 5
ผลการทดสอบ

ในบทนี้กล่าวถึงการทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำสำหรับระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 3 หัวข้อหลัก หัวข้อแรกเป็นการทดสอบการทำงานทั่วไปของทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย หัวข้อที่สองเป็นการทดสอบการทำงานของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีต่าง ๆ รวมทั้งเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้ในแต่ละวิธี ส่วนหัวข้อสุดท้าย เป็นการทดสอบการทำงานของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ โดยให้เงื่อนไขบางอย่างในการจำลองระบบเปลี่ยนแปลงไป

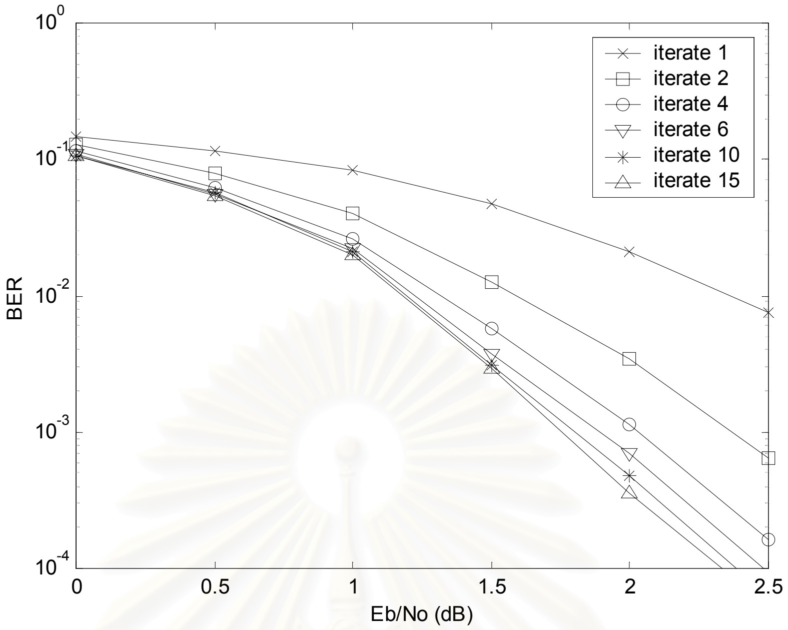
5.1 การทดสอบการทำงานทั่วไป

หัวข้อนี้จะทำการทดสอบการทำงานของทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย โดยแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกแสดงผลการทดสอบสมรรถนะในการทำงานของตัวถอดรหัสเทอร์โบ และในส่วนที่สองแสดงผลการทดสอบสมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ

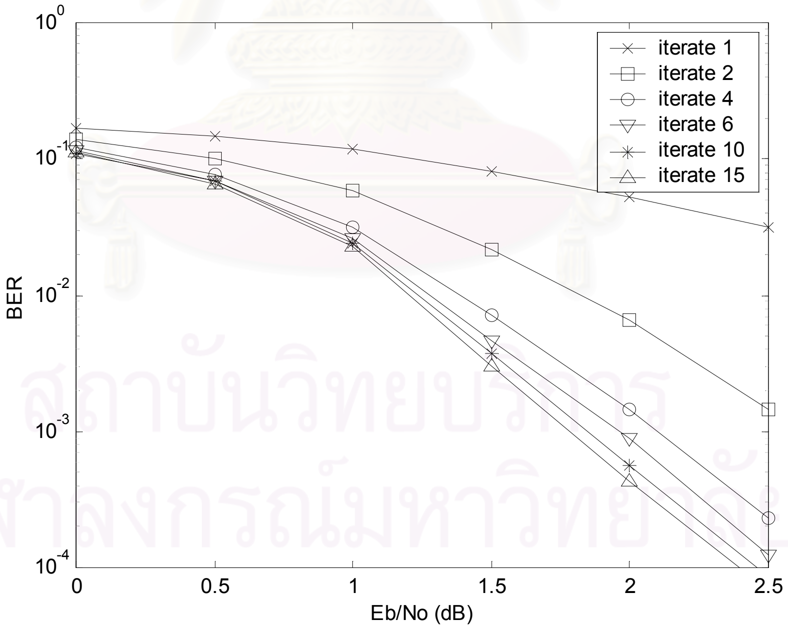
5.1.1 การทดสอบสมรรถนะของรหัสเทอร์โบ

จากบทที่ 3 การทำงานของดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนในเครื่องรับแบบวนซ้ำต้องการข้อมูลจากตัวถอดรหัสเทอร์โบทั้งในส่วนของบิตข้อมูลซิสเต็มเมติกและในส่วนของบิตข้อมูลพาริตี ซึ่งในหัวข้อ 3.3 ได้มีการดัดแปลงให้ตัวถอดรหัสเทอร์โบสามารถถอดรหัสบิตข้อมูลได้ทั้งสองส่วน ดังนั้น การทดสอบในที่นี้จะแสดงผลการทดสอบความสามารถในการทำงานของตัวถอดรหัสเทอร์โบที่ดัดแปลงไว้ดังหัวข้อ 3.3

ในการทดสอบ กำหนดให้ตัวเข้ารหัสเทอร์โบมีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 โดยตัวเข้ารหัสย่อยทุกตัวมีพหุนามป้อนไปหน้าเป็น $1+D+D^2+D^4$ และพหุนามป้อนกลับเป็น $1+D^3+D^4$ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 บล็อกข้อมูลที่ใช้ทดสอบมีขนาด 128 บิต ตัววางสลับเป็นแบบสุ่ม ช่องสัญญาณมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก จำนวนบล็อกข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบขึ้นอยู่กับจำนวนบิตผิดพลาด ซึ่งในที่นี้กำหนดให้บิตผิดพลาดในการทดสอบต้องมีจำนวนไม่ต่ำกว่า 100 บิต



(ก) บิตข้อมูลซิสเต็มเมติก



(ก) บิตข้อมูลพาริตี

รูปที่ 5.1 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของตัวถอดรหัสเทอร์โบ

รูปที่ 5.1 แสดงสมรรถนะในการทำงานของตัวถอดรหัสเทอร์โบ ทั้งในส่วนของบิตข้อมูลซิสเต็มเมติกและบิตข้อมูลพาริตี ดังรูปที่ 5.1(ก) และ 5.1(ข) ตามลำดับ ซึ่งตรวจวัดจากค่าอัตราความผิดพลาดบิตข้อมูลที่ถอดรหัสได้ เมื่อค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเปลี่ยนไป โดยกำหนดให้จำนวนรอบในการวนซ้ำของตัวถอดรหัสมีค่าเป็น 1, 2, 4, 6, 10 และ 15 รอบ

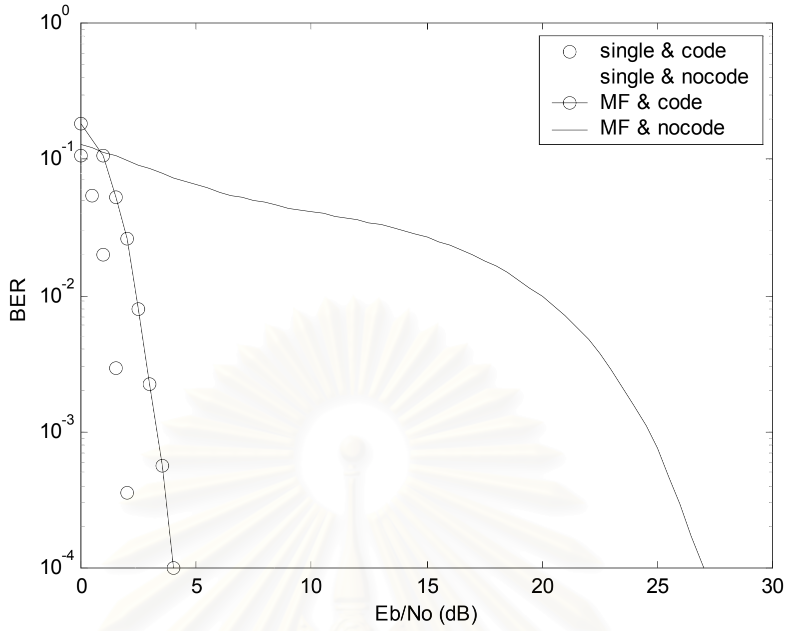
จากรูปที่ 5.1 พบว่า ในการถอดรหัสบิตข้อมูลทั้งบิตข้อมูลซิสเต็มเมติกและบิตข้อมูลพาริตีนั้น ตัวถอดรหัสเทอร์โบสามารถทำให้อัตราความผิดพลาดบิตของบิตข้อมูลทั้ง 2 ส่วนมีค่าลดลงเมื่อจำนวนรอบในการวนซ้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องตามความสามารถในการทำงานของตัวถอดรหัสเทอร์โบทั่วไป

5.1.2 การทดสอบสมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ

ในงานวิจัยฉบับนี้ ศึกษาเกี่ยวกับการนำรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้ามาประยุกต์ใช้งานในระบบซีดีเอ็มเอ เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้นและเพื่อให้ระบบมีความจุเพิ่มขึ้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการทดสอบสมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอที่มีการเข้ารหัส และนำมาเปรียบเทียบกับระบบที่ไม่มีการเข้ารหัส โดยให้โครงสร้างทางภาคส่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.1 และโครงสร้างทางภาครับมีลักษณะดังรูปที่ 2.2 ในที่นี้จะนำรหัสเทอร์โบมาใช้เป็นรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้าและใช้เครื่องรับแบบดั้งเดิม นั่นคือไม่มีการนำดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนมาใช้งาน

ในการจำลองระบบซีดีเอ็มเอสำหรับการทดสอบ กำหนดให้ ระบบมีผู้ใช้จำนวน 4 คน การส่งสัญญาณเป็นแบบซิงโครนัส ช่องสัญญาณมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก มีการควบคุมกำลังส่งแบบสมบูรณ์ นั่นคือ สัญญาณของผู้ใช้ทุกคนสามารถมาถึงภาครับด้วยขนาดของสัญญาณที่เท่ากันหมด รหัสแผ่มีค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างผู้ใช้เท่ากับ 0.3 ตัวเข้ารหัสเทอร์โบมีลักษณะดังหัวข้อ 5.1.1 ตัวถอดรหัสเทอร์โบมีจำนวนรอบในการวนซ้ำทั้งหมด 15 รอบ บล็อกข้อมูลมีขนาด 128 บิต จำนวนบล็อกข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบขึ้นอยู่กับจำนวนบิตผิดพลาด ในที่นี้กำหนดให้บิตผิดพลาดในการทดสอบต้องมีจำนวนไม่ต่ำกว่า 100 บิต

รูปที่ 5.2 แสดงสมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอที่นำรหัสเทอร์โบมาใช้เป็นรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้า ซึ่งตรวจวัดจากค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ในระบบเมื่อค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเปลี่ยนไป และเปรียบเทียบสมรรถนะในการทำงานกับระบบซีดีเอ็มเอที่ไม่มีการเข้ารหัส



รูปที่ 5.2 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของระบบซีดีเอ็มเอ
ที่มีการเข้ารหัสเทอร์โบและไม่มีการเข้ารหัส

รายละเอียดสัญลักษณ์ในกราฟ

single & code แทน สมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ และระบบมีผู้ใช้คนเดียว

single & nocode แทน สมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอที่ไม่มีการเข้ารหัส และระบบมีผู้ใช้คนเดียว

matched & code แทน สมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ

matched & nocode แทน สมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอที่ไม่มีการเข้ารหัส

จากรูปที่ 5.2 พบว่า สมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอที่มีการนำรหัสเทอร์โบมาใช้เป็นรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้าให้ผลดีกว่าสมรรถนะของระบบซีดีเอ็มเอที่ไม่มีการเข้ารหัสอย่างมาก โดยในกรณีที่ระบบมีผู้ใช้เพียงคนเดียวนั้น อัตราขยายการเข้ารหัส (coding gain) มีค่าประมาณ 6 dB และเมื่อผู้ใช้ในระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งในที่นี้ทดสอบในกรณีที่ระบบมีผู้ใช้จำนวน 4 คน พบว่า อัตราขยายการเข้ารหัสเพิ่มขึ้นเป็น 23 dB ทั้งที่ทางภาครับใช้เพียงเครื่องรับแบบดั้งเดิมเท่านั้น

5.2 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้การประมาณค่าบิตวิธีต่าง ๆ

ในหัวข้อนี้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกแสดงผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้การประมาณค่าบิตในแต่ละวิธี และส่วนที่สองเป็นการนำผลการทดสอบสมรรถนะของแต่ละวิธีในส่วนแรกมาเปรียบเทียบกัน

ในการจำลองระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบสำหรับการทดสอบนั้น กำหนดให้ ระบบมีผู้ใช้จำนวน 4 คน การส่งสัญญาณเป็นแบบซิงโครนัส ช่องสัญญาณมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก มีการควบคุมกำลังส่งแบบสมบูรณ์ เครื่องรับมีจำนวนรอบในการวนซ้ำไม่เกิน 15 รอบ ซึ่งในแต่ละรอบการวนซ้ำนั้นจะให้ตัวถอดรหัสเทอร์โบมีการวนซ้ำเพียง 1 รอบ ตัวเข้ารหัสเทอร์โบมีลักษณะเช่นเดียวกับที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของตัวถอดรหัสเทอร์โบดังหัวข้อ 5.1.1 บล็อกข้อมูลมีขนาด 128 บิต จำนวนบล็อกที่ใช้ในการทดสอบขึ้นอยู่กับจำนวนบิตผิดพลาด ในที่นี้กำหนดให้บิตผิดพลาดในการทดสอบต้องมีจำนวนไม่ต่ำกว่า 100 บิต

5.2.1 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้การประมาณค่าบิตในแต่ละวิธี

ในหัวข้อนี้ แสดงผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้การประมาณค่าบิตในแต่ละวิธี โดยมีโครงสร้างการทำงานดังรูปที่ 3.2 สมรรถนะของระบบสามารถวัดได้จากอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ทั้งหมดในระบบ เมื่อค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนเปลี่ยนไป ในที่นี้แสดงผลการทดสอบเฉพาะกรณีที่จำนวนรอบในการวนซ้ำของเครื่องรับมีค่าเป็น 1, 2, 4, 6, 10 และ 15 รอบ

รูปที่ 5.3, 5.4 และ 5.5 แสดงสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำ เมื่อค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้แต่ละคนมีค่าเป็น 0.3, 0.5 และ 0.7 ตามลำดับ ซึ่งในแต่ละรูปต่างมีรูปย่อย (ก) (ข) และ (ค) โดยรูปย่อย (ก) แสดงสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูง ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานดังหัวข้อ 4.1 ส่วนรูปย่อย (ข) แสดงสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่เสนอโดย Y. Zhang และ R. S. Blum ดังงานวิจัยในเอกสารอ้างอิง [8] ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานดังหัวข้อ 4.2 และรูปย่อย (ค) แสดงสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่เสนอในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานดังหัวข้อ 4.3

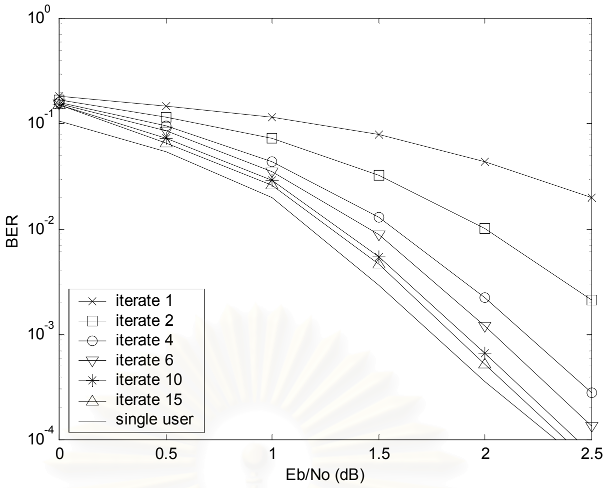
จากรูปที่ 5.3, 5.4 และ 5.5 พบว่า สมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้การประมาณค่าบิตทั้ง 3 วิธีนั้น ต่างก็มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยลดลงตามจำนวนรอบการวนซ้ำของเครื่องรับที่เพิ่มขึ้น โดยเมื่อค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้แต่ละคนมีค่าเป็น 0.3 สมรรถนะที่ได้มีค่าเข้าใกล้สมรรถนะของระบบที่มีผู้ใช้เพียงคนเดียวอย่างมาก และเมื่อค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัส

แผ่ระหว่างผู้ใช้มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.5 และ 0.7 สมรรถนะที่ได้ก็มีค่าออกห่างจากสมรรถนะของระบบที่มีผู้ใช้เพียงคนเดียวมากขึ้นตามลำดับ

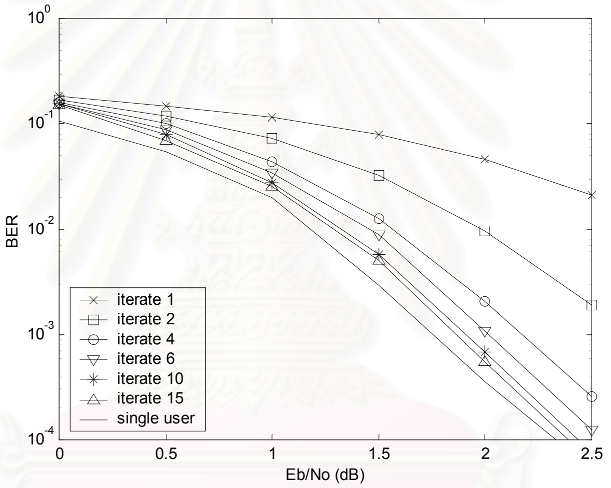
กรณีที่ค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้ในระบบมีค่าไม่เกิน 0.5 ($\rho \le 0.5$) ในแต่ละรอบการวนซ้ำของเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูง (รูปที่ 5.3(ก) และ 5.4(ก)) และเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่เสนอโดย Zhang (รูปที่ 5.3(ข) และ 5.4(ข)) อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกันในทุกรอบของการทำงาน ส่วนเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ (รูปที่ 5.3(ค) และ 5.4(ค)) ในการวนซ้ำ 4 รอบแรกนั้น อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยจะมีค่าสูงกว่าเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยสองวิธีแรก และเมื่อจำนวนรอบในการวนซ้ำเพิ่มขึ้น อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยจะมีค่าใกล้เคียงกับเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยสองวิธีแรก

ส่วนกรณีที่ค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้มีค่ามากกว่า 0.5 ($\rho > 0.5$) นั้น ในการวนซ้ำ 6 รอบแรก เครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูง (รูปที่ 5.5(ก)) และเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่เสนอโดย Zhang (รูปที่ 5.5(ข)) ต่างก็ยังคงมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน เมื่อจำนวนรอบในการวนซ้ำเพิ่มขึ้น เครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่เสนอโดย Zhang นั้น ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยที่ได้ยังคงมีค่าไม่แตกต่างจากการวนซ้ำในรอบที่ 6 แต่เครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูง ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยยังคงสามารถลดลงได้อีก ส่วนเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ (รูปที่ 5.5(ค)) ในการวนซ้ำ 4 รอบแรกนั้น ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยยังคงมีค่าสูงกว่าเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยสองวิธีแรก และเมื่อจำนวนรอบในการวนซ้ำเพิ่มขึ้น อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยจะเริ่มมีค่าน้อยกว่าเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยสองวิธีแรก

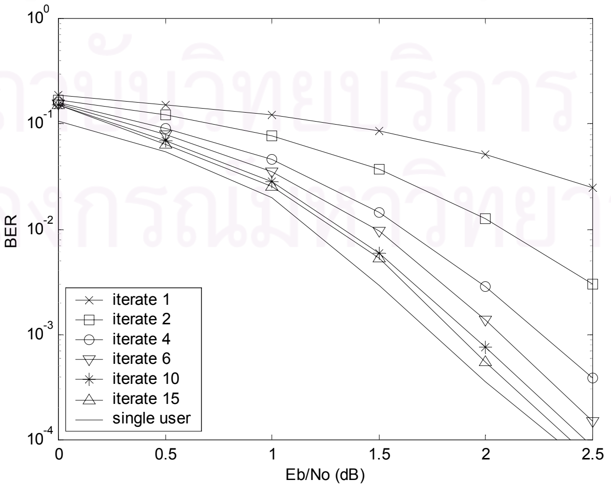
สาเหตุที่การวนซ้ำในรอบแรก ๆ ของเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้มีสมรรถนะด้อยกว่าเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยสองวิธีแรก เนื่องจากเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอจะกำหนดให้บิตประมาณมีค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ ซึ่งหมายความว่า ในรอบแรกของการทำงาน การประมาณค่าบิตจะได้มาจากข้อมูลของสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนที่ต้องการเท่านั้น ซึ่งสัญญาณดังกล่าวนี้จะยังไม่มีการขจัดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทางออกไปเลย ทำให้บิตประมาณที่ได้มีความผิดพลาดสูง ดังนั้น เครื่องรับจึงจำเป็นต้องอาศัยจำนวนรอบในการวนซ้ำจำนวนหนึ่ง เพื่อให้การประมาณค่าบิตมีค่าเข้าใกล้ค่าที่แท้จริง ซึ่งจะส่งผลให้รอบถัดไปมีการประมาณค่าที่ดียิ่งขึ้นอีกด้วย



(ก) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูง

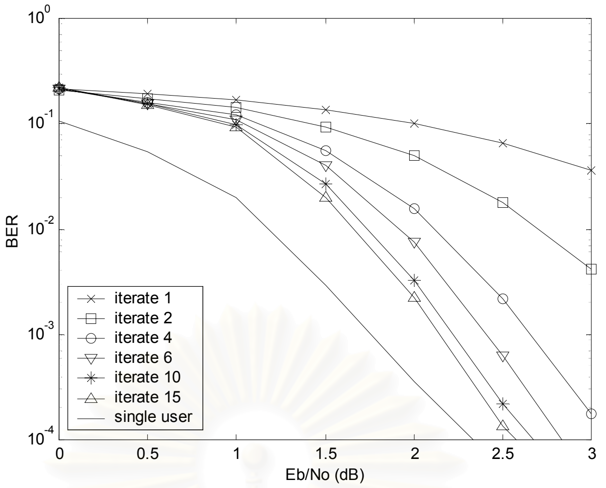


(ข) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่เสนอโดย Zhang

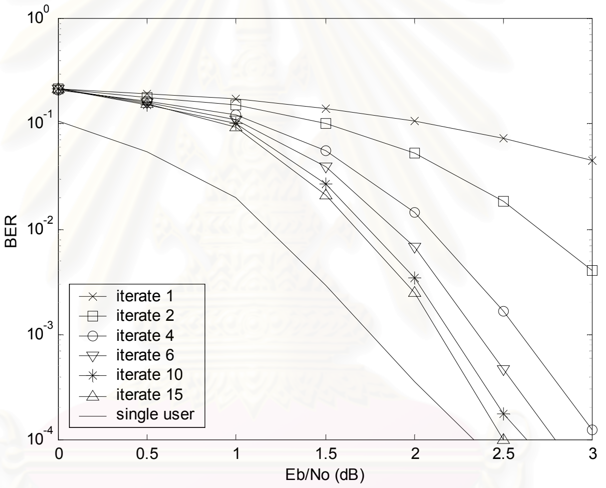


(ค) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัย

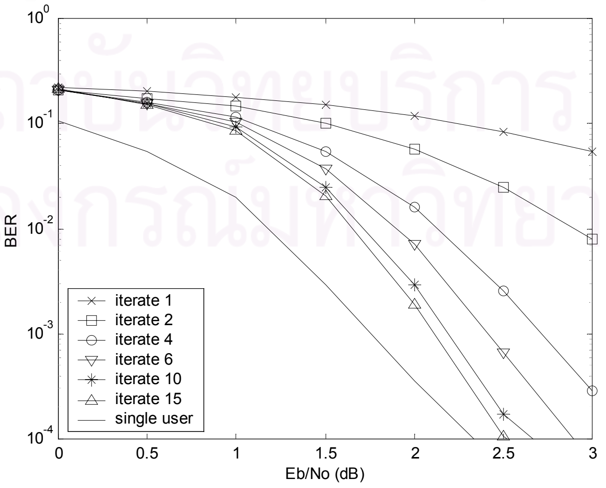
รูปที่ 5.3 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ย เมื่อสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่มีค่าเป็น 0.3



(ก) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูง



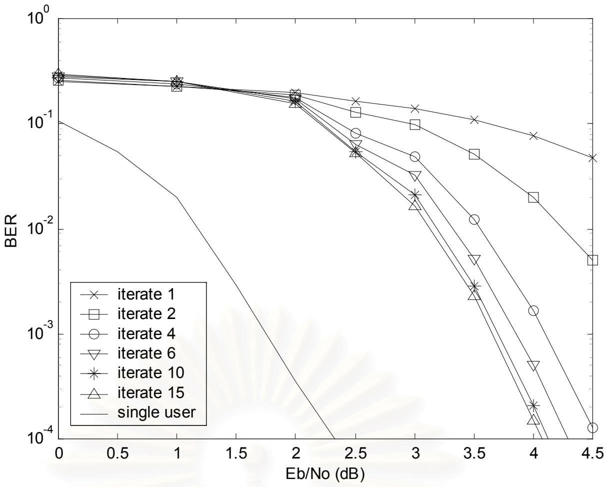
(ข) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่เสนอโดย Zhang



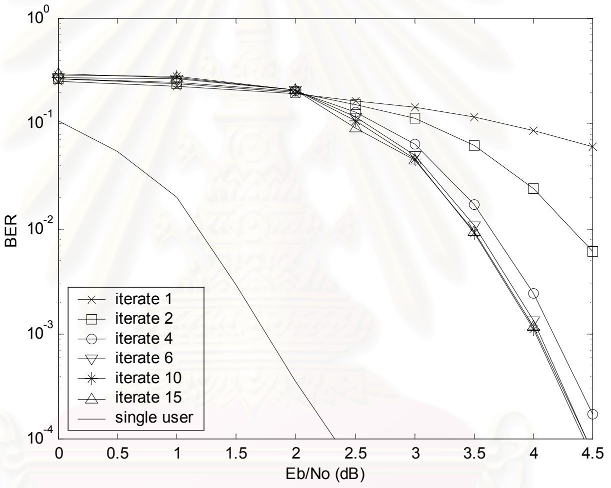
(ค) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัย

รูปที่ 5.4 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ย เมื่อสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่มีค่าเป็น 0.5

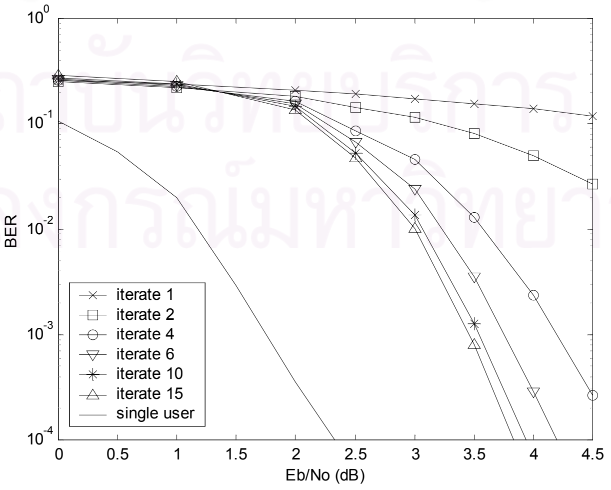
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูง



(ข) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่เสนอโดย Zhang



(ค) การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัย

รูปที่ 5.5 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ย เมื่อสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่มีค่าเป็น 0.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.2.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้การประมาณค่าบิตวิธีต่าง ๆ

เพื่อแสดงการเปรียบเทียบการทำงานของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้การประมาณค่าบิตทั้ง 3 วิธีให้ชัดเจนขึ้น ในหัวข้อนี้จึงนำค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของการประมาณค่าบิตทั้ง 3 วิธีที่ได้จากการจำลองระบบในหัวข้อ 5.2.1 มาวาดกราฟรวมกัน ดังรูปที่ 5.6 โดยรูปย่อย (ก) (ข) และ (ค) แสดงสมรรถนะของระบบ เมื่อรหัสแผ่สำหรับผู้ใช้แต่ละคนมีค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างผู้ใช้เป็น 0.3, 0.5 และ 0.7 ตามลำดับ กำหนดให้เครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตในแต่ละวิธีมีจำนวนรอบในการวนซ้ำทั้งหมด 15 รอบ

รายละเอียดสัญลักษณ์ในกราฟ

Max comp. แทน สมรรถนะของระบบ โดยให้เครื่องรับแบบวนซ้ำใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูง ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานดังหัวข้อ 4.1

Zhang แทน สมรรถนะของระบบ โดยให้เครื่องรับแบบวนซ้ำใช้การประมาณค่าด้วยวิธีที่นำเสนอโดย Zhang ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานดังหัวข้อ 4.2

Propose แทน สมรรถนะของระบบ โดยให้เครื่องรับแบบวนซ้ำใช้การประมาณค่าด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานดังหัวข้อ 4.3

Single user แทน สมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำ เมื่อระบบมีผู้ใช้เพียงคนเดียว

MF แทน สมรรถนะของเครื่องรับ ซึ่งจะนำสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์มาผ่านตัวถอดรหัสเทอร์โบทันที โดยไม่มีการส่งผ่านดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน กำหนดให้ตัวถอดรหัสเทอร์โบมีการวนซ้ำทั้งหมด 15 รอบ

Separate แทน สมรรถนะของเครื่องรับที่ไม่มีการวนซ้ำ นั่นคือ ไม่มีการส่งสัญญาณที่ได้รับจากตัวถอดรหัสเทอร์โบมาป้อนกลับให้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน โดยมีโครงสร้างการทำงานดังรูปที่ 2.2 กำหนดให้ตัวถอดรหัสเทอร์โบมีการวนซ้ำทั้งหมด 15 รอบ เนื่องจากเครื่องรับไม่มีการวนซ้ำ ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนในที่นี้จึงเลือกใช้การประมาณค่าบิตวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูง เพราะน่าจะให้สมรรถนะดีที่สุด

จากรูปที่ 5.6 สังเกตว่า อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของ Max comp. มีค่าต่ำกว่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของ Separate หมายความว่า การปรับปรุงเครื่องรับให้มีการทำงานแบบวนซ้ำ ซึ่งเกิดจากการแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่าง ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน กับตัวถอดรหัสเทอร์โบนั้น ทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น

นอกจากนี้ จากรูปที่ 5.6(ก) กรณีที่ระบบมีค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้เท่ากับ 0.3 สมรรถนะของเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตทั้ง 3 วิธี จะมีค่าเข้าใกล้กรณีที่ระบบมีผู้ใช้

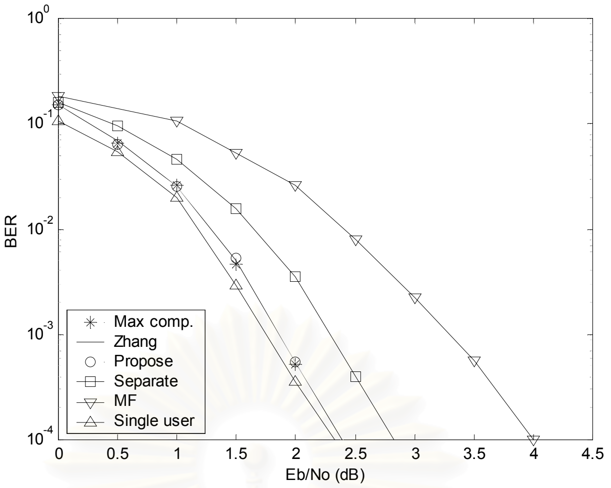
เพียงคนเดียวอย่างมาก โดยที่อัตราความความผิดพลาดบิตเฉลี่ยมีค่าเป็น 10^{-4} ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนห่างจากกรณีที่ระบบมีผู้ใช้เพียงคนเดียวไม่เกิน 0.1 dB และรูปที่ 5.6(ข) แสดงการทำงานกรณีที่ระบบมีค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้เท่ากับ 0.5 เครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตทั้ง 3 วิธีจะมีค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนห่างจากกรณีที่ระบบมีผู้ใช้คนเดียวเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งมีค่าไม่เกิน 0.2 dB ส่วนรูปที่ 4.5(ค) แสดงการทำงานกรณีที่ระบบมีค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้เท่ากับ 0.7 สมรรถนะของเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตทั้ง 3 วิธีก็ยิ่งมีค่าห่างจากกรณีที่ระบบมีผู้ใช้เพียงคนเดียวมากขึ้น โดยที่อัตราความความผิดพลาดบิตเฉลี่ยมีค่าเป็น 10^{-4} เครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยให้สมรรถนะดีที่สุด โดยมีค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนห่างจากกรณีที่ระบบมีผู้ใช้เพียงคนเดียวประมาณ 1.5 dB เครื่องรับที่ให้สมรรถนะดีรองลงมา คือ เครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูง และตามด้วยเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอโดย Zhang ซึ่งมีสมรรถนะแย่สุด โดยมีค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนห่างจากกรณีที่ระบบมีผู้ใช้เพียงคนเดียวประมาณ 1.8 และ 2.1 dB ตามลำดับ

ตารางที่ 5.1 เวลาที่ใช้ในการรันโปรแกรมจำลองระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ

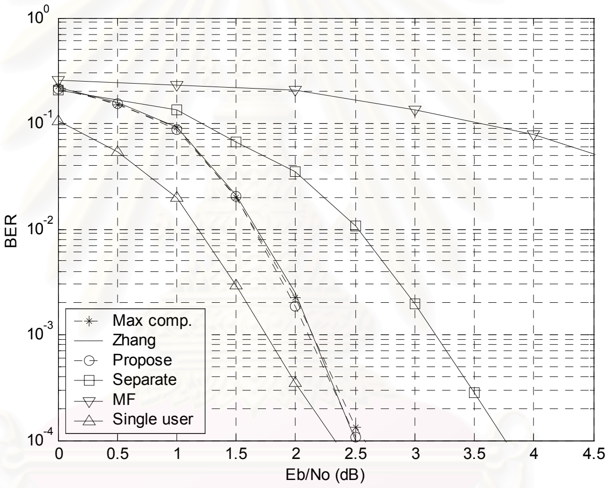
การประมาณค่าบิต	เวลาในการรันโปรแกรม (วินาที / บล็อกข้อมูล)
Max comp.	2.90
Zhang	1.18
Propose	1.22

จากตารางที่ 5.1 คอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดสอบ คือ AMD Athlon 700 MHz และ RAM 128 MB จำนวนบล็อกข้อมูลที่ใช้ทดสอบ 100 บล็อก

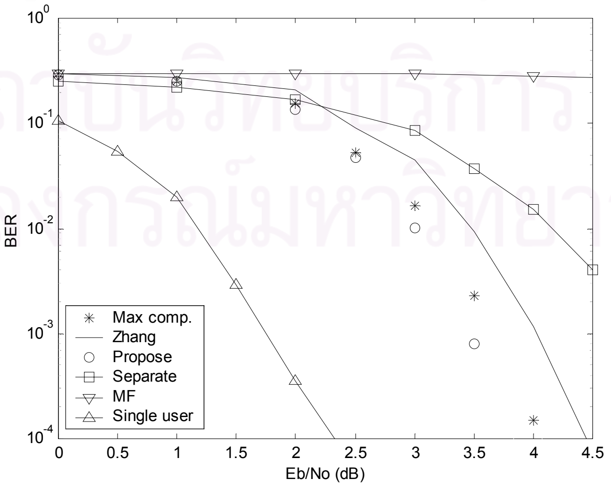
การวัดความซับซ้อนในการทำงานของเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตในแต่ละวิธี ในที่นี้สังเกตได้จากเวลาที่ใช้ในการรันโปรแกรมดังตารางที่ 5.1 พบว่า การประมาณบิตด้วยวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูงจะใช้เวลาในการรันโปรแกรมมากที่สุด ส่วนการประมาณค่าบิตอีกสองวิธีที่เหลือใช้เวลาในการรันโปรแกรมใกล้เคียงกัน ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการวัดความซับซ้อนในการคำนวณโดยการนับจำนวนครั้งในการใช้ตัวดำเนินการดังตารางที่ 4.1



(ก) ρ = 0.3



(ข) ρ = 0.5



(ค) ρ = 0.7

รูปที่ 5.6 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับที่ใช้การประมาณบิตวิธีต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ ในงานวิจัย

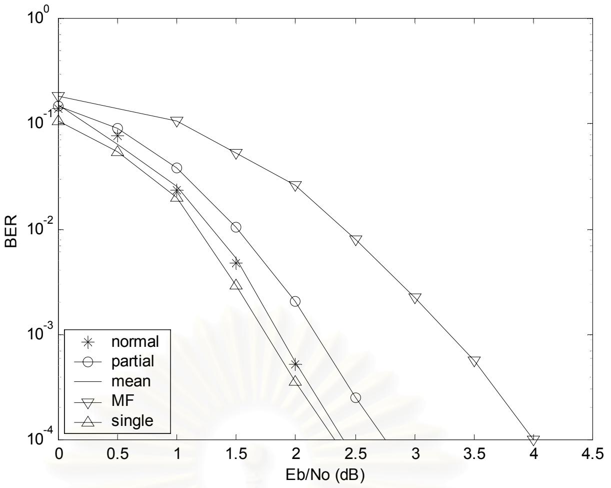
การทดสอบในหัวข้อนี้แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ในส่วนแรกแสดงผลการทดสอบการดัดแปลงเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ เพื่อให้สมรรถนะของระบบดีขึ้น ในส่วนที่สองเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องรับที่นำเสนอกับสมรรถนะของเครื่องรับแบบอื่นที่มีความซับซ้อนในการคำนวณไม่แตกต่างกันมากนัก และส่วนสุดท้ายแสดงผลการทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับเมื่อระบบมีพารามิเตอร์บางอย่างเปลี่ยนไป

5.3.1 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับ เมื่อใช้วิธีการดัดแปลงต่าง ๆ

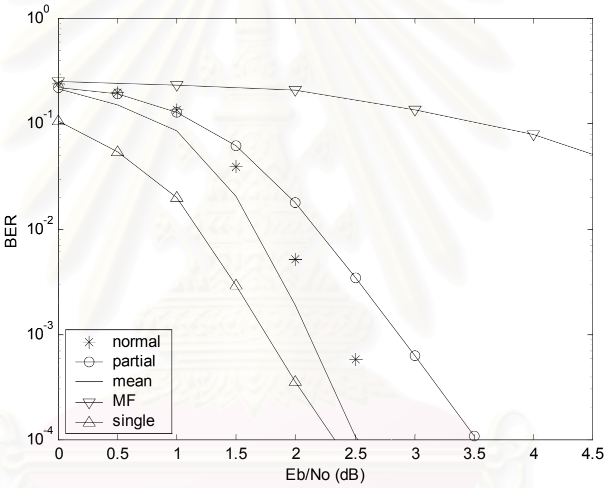
เครื่องรับแบบวนซ้ำที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ สามารถประมาณค่าบิตได้โดยการนำข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนที่ต้องการและค่าบิตประมาณของผู้ใช้คนอื่น ๆ ในรอบที่แล้วมาช่วยในการประมาณ ดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.3 ซึ่งเมื่อระบบมีค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้มีค่าสูง การประมาณค่าบิตในรอบแรกจะมีความผิดพลาดอย่างมากและยังส่งผลต่อการทำงานรอบถัดไป ดังนั้น จึงมีการดัดแปลงเพิ่มเติม โดยหลังจากการประมาณค่าบิตแล้ว เครื่องรับจะนำค่าบิตที่ประมาณได้ในรอบปัจจุบันมาเฉลี่ยกับบิตที่ประมาณได้ในรอบที่แล้ว เพื่อลดความผิดพลาดลงในกรณีที่ค่าบิตประมาณในแต่ละรอบเกิดการแกว่งขึ้น

หัวข้อนี้แสดงผลการทดสอบการทำงานของเครื่องรับแบบวนซ้ำ ซึ่งใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ ในแง่ของความจำเป็นที่ต้องมีการเฉลี่ยค่าของบิตประมาณหลังจากการประมาณค่าแล้ว โดยเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องรับดังกล่าวกับเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอแบบธรรมดาซึ่งไม่มีการหาค่าเฉลี่ยของบิตประมาณและเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอตามด้วยการขจัดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทางบางส่วน (partial interference cancellation)

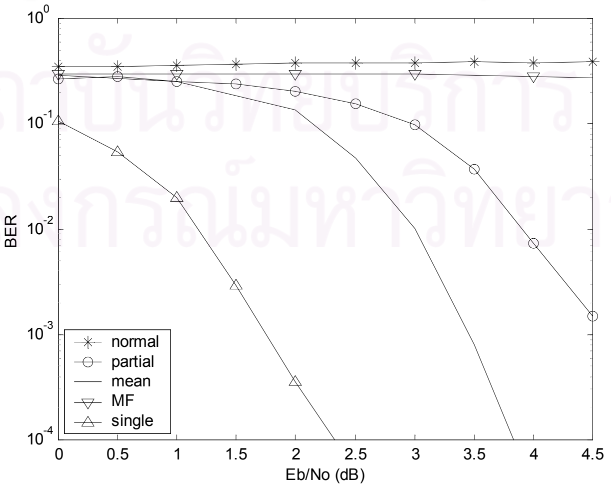
ในการจำลองระบบสำหรับการทดสอบ กำหนดให้ ระบบมีผู้ใช้จำนวน 4 คน การส่งสัญญาณเป็นแบบซิงโครนัส ช่องสัญญาณมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก มีการควบคุมกำลังส่งแบบสมบูรณ์ เครื่องรับมีจำนวนรอบในการวนซ้ำทั้งหมด 15 รอบ ซึ่งในแต่ละรอบการวนซ้ำนั้น ให้ตัวถอดรหัสเทอร์โบมีการวนซ้ำเพียง 1 รอบ ตัวเข้ารหัสเทอร์โบมีลักษณะการทำงานดังหัวข้อ 5.1.1 บล็อกข้อมูลมีขนาด 128 บิต จำนวนบล็อกที่ใช้ในการทดสอบขึ้นอยู่กับจำนวนบิตผิดพลาด ในที่นี้กำหนดให้บิตผิดพลาดในการทดสอบต้องมีจำนวนไม่ต่ำกว่า 100 บิต



(ก) $\rho = 0.3$



(ข) $\rho = 0.5$



(ค) $\rho = 0.7$

รูปที่ 5.7 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับที่ใช้การประมาณบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ

รายละเอียดสัญลักษณ์ในกราฟ

normal แทน สมรรถนะของเครื่องรับแบบธรรมดา ซึ่งไม่มีการเฉลี่ยค่าบิตประมาณ

partial แทน สมรรถนะของเครื่องรับ โดยนำบิตประมาณในแต่ละรอบมาลดความน่าเชื่อถือลงครึ่งหนึ่ง นั่นคือ $b_k^{t} = 0.5 * b_k^{t}$

mean แทน สมรรถนะของเครื่องรับ ที่มีการเฉลี่ยค่าบิตประมาณในรอบก่อนหน้ากับรอบปัจจุบัน นั่นคือ $b_k^{t} = 0.5 * (b_k^{t-1} + b_k^{t})$ ซึ่งมีรายละเอียดการทำงานดังหัวข้อ 4.3

Single แทน สมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำ เมื่อระบบมีผู้ใช้เพียงคนเดียว

MF แทน สมรรถนะของเครื่องรับ ซึ่งจะนำสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์มาผ่านตัวถอดรหัสเทอร์โบทันที กำหนดให้ตัวถอดรหัสเทอร์โบมีการวนซ้ำทั้งหมด 15 รอบ

จากรูปที่ 5.7 เครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยเมื่อไม่มีการเฉลี่ยค่าของบิตประมาณนั้น สมรรถนะของระบบจะให้ผลดีเฉพาะกรณีที่ค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้มีค่าน้อย ($\rho = 0.3$) แต่เมื่อค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่เพิ่มขึ้นสมรรถนะที่ได้เริ่มมีค่าแย่ลงมาก จนกระทั่งอาจแย่กว่าสมรรถนะของเครื่องรับแบบดั้งเดิม เนื่องจากเมื่อค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้มีค่าสูง ในการทำงานรอบแรก ๆ ของเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอนี้ มีความผิดพลาดในการประมาณสูงมากจนตัวถอดรหัสเทอร์โบไม่สามารถจะแก้ไขความผิดพลาดดังกล่าวให้กลับคืนมาได้ ดังนั้น จึงได้มีการดัดแปลงให้มีการหาค่าเฉลี่ยของบิตประมาณในรอบก่อนหน้ากับรอบปัจจุบัน เพื่อเป็นการชะลอความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในรอบถัดไป และเป็นการลดความผิดพลาดในกรณีที่บิตประมาณที่คำนวณได้ในแต่ละรอบเกิดการแกว่งขึ้น

ส่วนเครื่องรับที่นำการขจัดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทางบางส่วน มาใช้งานนั้น เมื่อค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่มีค่าต่ำ ($\rho \leq 0.5$) สมรรถนะของระบบที่ได้จะมีค่าแย่กว่าเครื่องรับที่ไม่มีการหาค่าเฉลี่ยของบิตประมาณ แต่เมื่อค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่มีค่าสูงขึ้น ($\rho = 0.7$) สมรรถนะของระบบที่ได้กลับมีค่าดีขึ้นกว่าเครื่องรับดังกล่าว แต่ก็ยังแย่กว่าเครื่องรับแบบวนซ้ำที่มีการเฉลี่ยค่าบิตประมาณ เนื่องจากเครื่องรับแบบนี้มีการขจัดสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทางเพียงครึ่งหนึ่งของสัญญาณแทรกสอดที่ปะปนอยู่ โดยในกรณีที่ระบบใช้รหัสแผ่ที่มีค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างผู้ใช้ต่ำ บิตประมาณที่คำนวณได้ย่อมมีความถูกต้องสูง แต่เครื่องรับกลับลดสัญญาณแทรกสอดลงเพียงครึ่งเดียว ทำให้สมรรถนะที่ได้จึงแย่กว่าเครื่องรับแบบธรรมดา

5.3.2 การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องรับที่นำเสนอกับเครื่องรับแบบอื่น

การเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องรับที่นำเสนอกับเครื่องรับแบบอื่น ในที่นี้ เครื่องรับแบบอื่นที่สนใจนำมาทดสอบ คือเครื่องรับที่เสนอในเอกสารอ้างอิง [7] เนื่องจากเครื่องรับแบบนี้มีความซับซ้อนในการคำนวณต่ำ ซึ่งไม่แตกต่างกับเครื่องรับที่ใช้ในงานวิจัยมากนัก รวมทั้งเครื่องรับดังกล่าวยังใช้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนแบบไม่เชิงเส้นเช่นเดียวกับเครื่องรับที่ใช้ในงานวิจัย

ในการจำลองระบบสำหรับการทดสอบ มีลักษณะเช่นเดียวกับระบบที่ใช้ทดสอบในหัวข้อ 5.3.1

รายละเอียดสัญลักษณ์ในกราฟ

PIC แทน สมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยใช้ดีเทกเตอร์ชนิดขจัดสัญญาณแทรกสอดแบบขนาน เครื่องรับมีการวนซ้ำทั้งหมด 15 รอบ ซึ่งในแต่ละรอบการวนซ้ำให้ตัวถอดรหัสเทอร์โบมีการวนซ้ำเพียง 1 รอบ

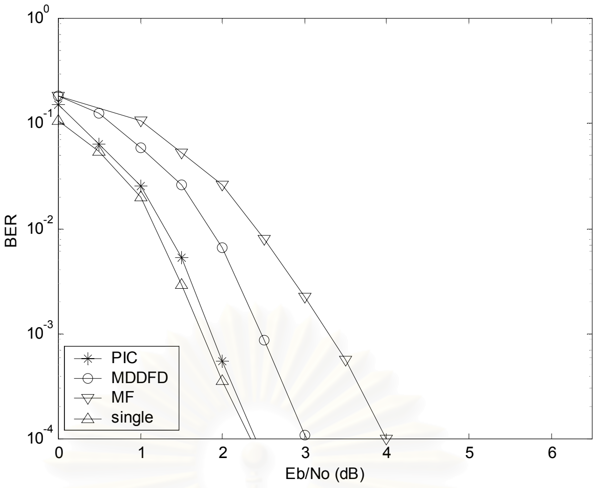
MDDFD แทน สมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้ในเอกสารอ้างอิง [7] โดยใช้ดีเทกเตอร์ชนิดนำข้อมูลที่ตัดสินแล้วมาป้อนกลับ เครื่องรับมีการวนซ้ำทั้งหมด 5 รอบ ซึ่งในแต่ละรอบการวนซ้ำให้ตัวถอดรหัสเทอร์โบมีการวนซ้ำ 3 รอบ ดังนั้น ตัวถอดรหัสเทอร์โบมีการวนซ้ำทั้งหมด 15 รอบ

Single แทน สมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำ เมื่อระบบมีผู้ใช้เพียงคนเดียว

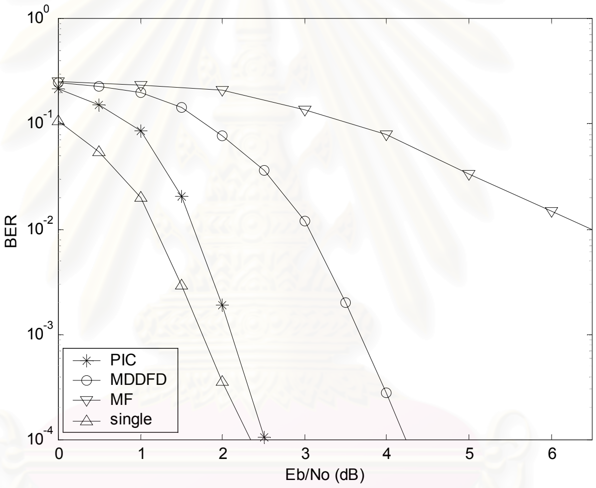
MF แทน สมรรถนะของเครื่องรับ ซึ่งจะนำสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์มาผ่านตัวถอดรหัสเทอร์โบทันที กำหนดให้ตัวถอดรหัสเทอร์โบมีการวนซ้ำทั้งหมด 15 รอบ

จากรูปที่ 5.8 เครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งใช้ดีเทกเตอร์ชนิดขจัดสัญญาณแทรกสอดแบบขนานให้สมรรถนะที่ดีกว่าเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้ในเอกสารอ้างอิง [7] ซึ่งใช้ดีเทกเตอร์ชนิดนำข้อมูลที่ตัดสินแล้วมาป้อนกลับ สำหรับทุกกรณีที่ระบบใช้รหัสแผ่ที่มีค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างผู้ใช้ค่าใด ๆ

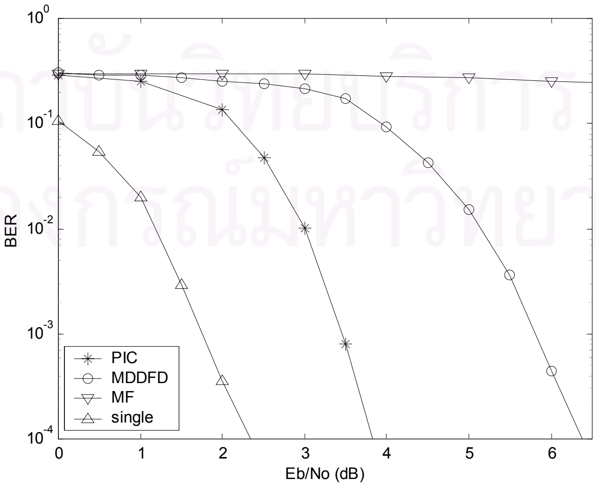
แม้ว่าเครื่องรับที่ใช้ดีเทกเตอร์ชนิดนำข้อมูลที่ตัดสินแล้วมาป้อนกลับ จะมีการลดสัญญาณแทรกสอดลงครึ่งหนึ่งด้วยการผ่านวงจรกรองสัญญาณรบกวนสีขาว แต่ในการขจัดสัญญาณแทรกสอดส่วนที่เหลือนั้น เครื่องรับดังกล่าวใช้การประมาณค่าบิตแบบฮาร์ด ซึ่งในการทำงานรอบแรก ๆ นั้น การประมาณค่าย่อมมีความผิดพลาดสูง เมื่อนำบิตประมาณไปประมาณค่าสัญญาณแทรกสอดแล้วนำไปหักออกจากสัญญาณรับที่ได้ การทำเช่นนี้แทนที่จะเป็นการลดสัญญาณแทรกสอดลง แต่อาจกลับทำให้สัญญาณแทรกสอดมีขนาดเพิ่มขึ้นแทน ดังนั้น เครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้ในงานวิจัยนี้ซึ่งใช้การประมาณค่าบิตแบบซอฟต์ย่อมให้ผลดีกว่าเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้ในเอกสารอ้างอิง [7]



(ก) ρ = 0.3



(ข) ρ = 0.5



(ค) ρ = 0.7

รูปที่ 5.8 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับแบบที่นำเสนอกับเครื่องรับแบบอื่น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3.3 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับเมื่อพารามิเตอร์บางอย่างเปลี่ยนไป

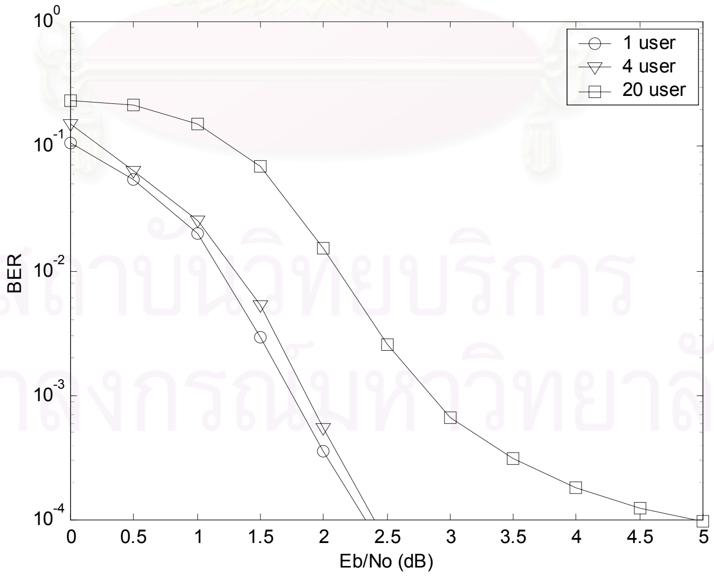
เงื่อนไขต่าง ๆ ที่นำมาทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอในงานวิจัย ได้แก่

- จำนวนผู้ใช้ในระบบ
- ขนาดของบล็อกข้อมูล
- การควบคุมกำลังไม่สมบูรณ์
- ความถี่ในการใช้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน
- จำนวนรอบในการวนซ้ำของตัวถอดรหัสเทอร์โบ

ในที่นี้ ทำการทดสอบเฉพาะกรณีที่รหัสแผ่ของผู้ใช้แต่ละคนมีค่าสหสัมพันธ์ข้ามเป็น 0.3

1) จำนวนผู้ใช้ในระบบ

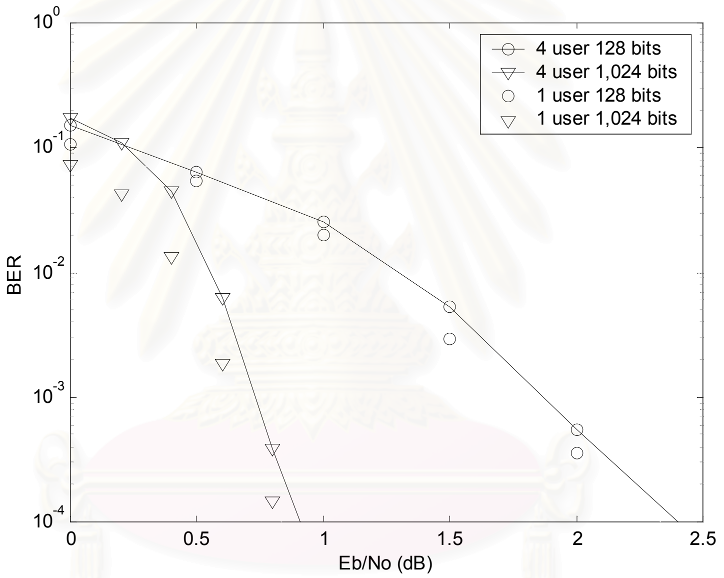
การทดสอบการทำงานของเครื่องรับ กรณีที่จำนวนผู้ใช้ในระบบมีขนาดเปลี่ยนไป ในที่นี้กำหนดให้ระบบมีจำนวนผู้ใช้ทั้งหมด 1 คน , 4 คน และ 20 คน โดยเครื่องรับมีการวนซ้ำทั้งหมด 15 รอบ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.9 พบว่า อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของผู้ใช้ทั้งหมดในระบบจะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อจำนวนผู้ใช้ในระบบมีขนาดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.9 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับที่ใช้การประมาณบิตด้วยวิธีที่นำเสนอเมื่อจำนวนผู้ใช้ในระบบเปลี่ยนไป

2) ขนาดของบล็อกข้อมูล

การทดสอบการทำงานของเครื่องรับกรณีที่บล็อกข้อมูลมีขนาดเปลี่ยนไป ในที่นี้กำหนดให้บล็อกข้อมูลที่ใช้มีขนาด 128 บิต และ 1,024 บิต โดยเครื่องรับมีการวนซ้ำทั้งหมด 15 รอบ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.10 พบว่า อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยมีค่าลดลง เมื่อขนาดของบล็อกข้อมูลเพิ่มขึ้น ทั้งกรณีที่ระบบมีผู้ใช้เพียงคนเดียวและกรณีที่ระบบมีผู้ใช้ 4 คน ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับหลักการถอดรหัสเทอร์โบ นั่นคือ เมื่อบล็อกข้อมูลมีขนาดใหญ่ขึ้น อัตราขยายการเข้ารหัสย่อมมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยเท่ากับ 10^{-4} อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมีค่าลดลงประมาณ 1.5 dB เมื่อขนาดของบล็อกข้อมูลเพิ่มจาก 128 บิตเป็น 1,024 บิต

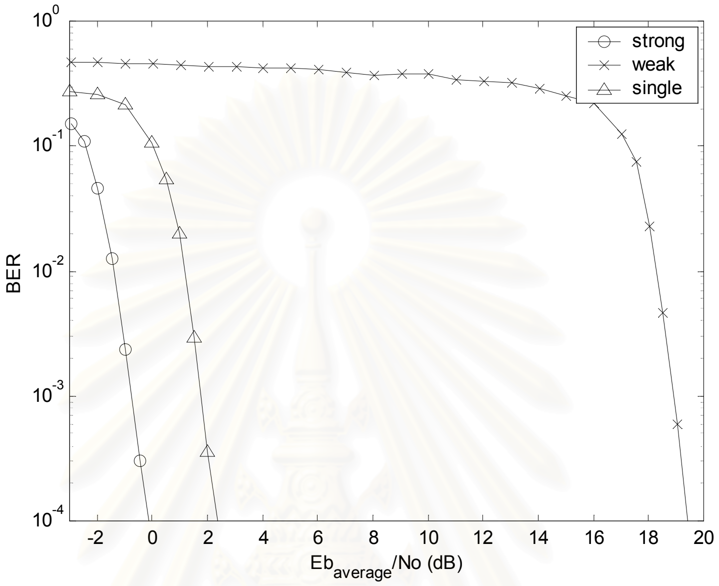


รูปที่ 5.10 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับที่ใช้การประมาณบิตด้วยวิธีที่นำเสนอเมื่อขนาดของบล็อกข้อมูลเปลี่ยนไป

3) การควบคุมกำลังไม่สมบูรณ์

การทดสอบการทำงานของเครื่องรับ กรณีที่การควบคุมกำลังไม่สมบูรณ์ นั่นคือ สัญญาณของผู้ใช้แต่ละคนมาถึงภาครับด้วยขนาดของสัญญาณที่ต่างกัน เหตุการณ์เช่นนี้อาจเกิดจากผลของการเกิดปรากฏการณ์ใกล้-ไกล ในที่นี้กำหนดให้ระบบมีจำนวนผู้ใช้ทั้งหมด 4 คน ผู้ใช้คนที่ 2 และ 4 มีกำลังที่รับได้สูงกว่าคนที่ 1 และ 3 ประมาณ 20 dB โดยเครื่องรับมีการวนซ้ำทั้งหมด 15 รอบ ในแต่ละรอบการวนซ้ำ ตัวถอดรหัสเทอร์โบมีการวนซ้ำเพียง 1 รอบ

รูปที่ 5.11 แสดงสมรรถนะของเครื่องรับสำหรับผู้ใช้คนที่มีกำลังสูงและผู้ใช้คนที่มีกำลังต่ำ โดยวัดจากค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ย เมื่อค่าอัตราส่วนของกำลังเฉลี่ยของสัญญาณรับต่อกำลังของสัญญาณรบกวนเปลี่ยนไป



รูปที่ 5.11 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับที่ใช้การประมาณบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ เมื่อการควบคุมกำลังไม่สมบูรณ์

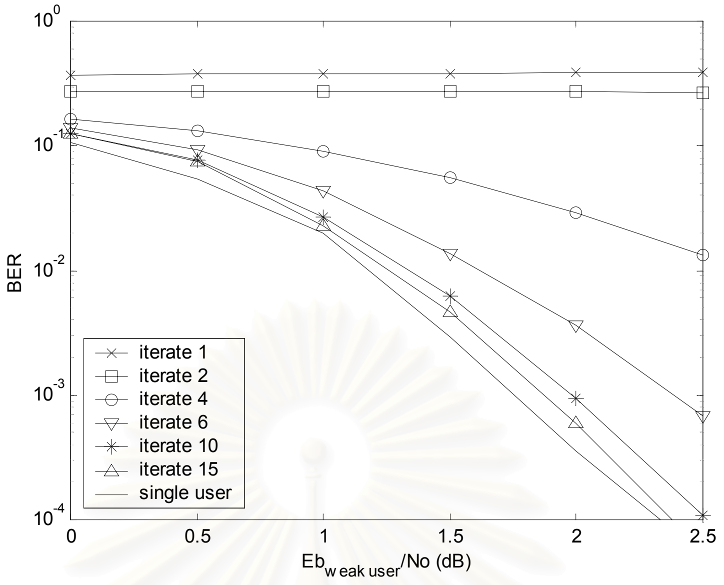
รายละเอียดสัญลักษณ์ในกราฟ

strong แทน สมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำ สำหรับผู้ใช้คนที่มีกำลังสูง

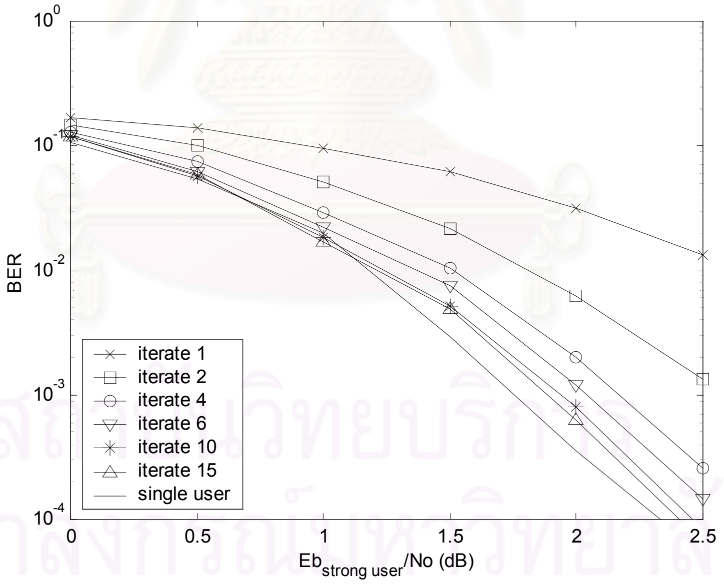
weak แทน สมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำ สำหรับผู้ใช้คนที่มีกำลังต่ำ

single แทน สมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำ เมื่อระบบมีผู้ใช้เพียงคนเดียว

รูปที่ 5.12 แสดงสมรรถนะของผู้ใช้คนที่มีกำลังต่ำและผู้ใช้คนที่มีกำลังสูงในการทำงานแต่ละรอบ โดยแสดงสมรรถนะของเครื่องรับในการวนซ้ำรอบที่ 1, 2, 4, 6, 10 และ 15 เปรียบเทียบกับสมรรถนะของระบบที่มีผู้ใช้เพียงคนเดียว ผลของสมรรถนะในที่นี้วัดจากค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ย เมื่อค่าอัตราส่วนของสัญญาณของผู้ใช้ต่อสัญญาณรบกวนเปลี่ยนไป จากรูปพบว่า เมื่อจำนวนรอบในการทำงานเพิ่มขึ้น ทั้งผู้ใช้คนที่มีกำลังสูงและผู้ใช้คนที่มีกำลังต่ำ ต่างก็ให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยเข้าใกล้กรณีที่ระบบมีผู้ใช้เพียงคนเดียวมากขึ้น โดยที่อัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 10^{-4} ค่าอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจะมีค่าห่างจากกรณีที่ระบบมีผู้ใช้เพียงคนเดียวไม่เกิน 0.1 dB



(ก) ผู้ใช้คนที่มีกำลังต่ำ

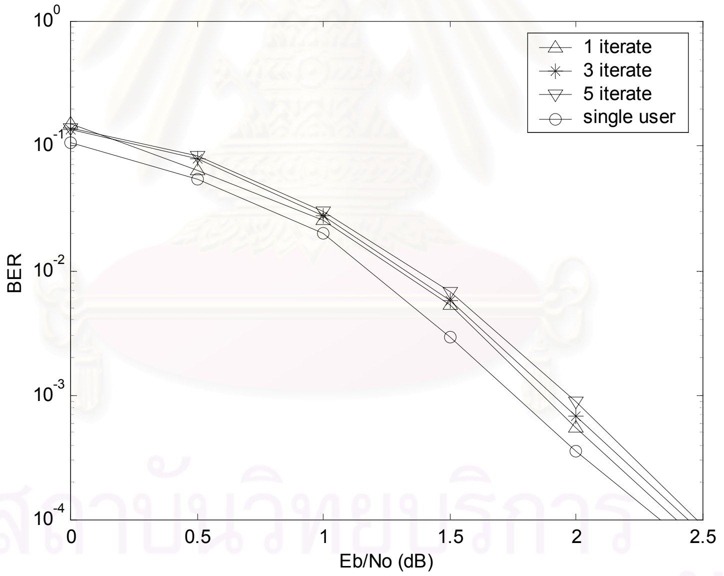


(ข) ผู้ใช้คนที่มีกำลังสูง

รูปที่ 5.12 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับที่ใช้การประมาณบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ เมื่อการควบคุมกำลังไม่สมบูรณ์ ในกรณีของผู้ใช้แต่ละคน

4) ความถี่ในการใช้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน

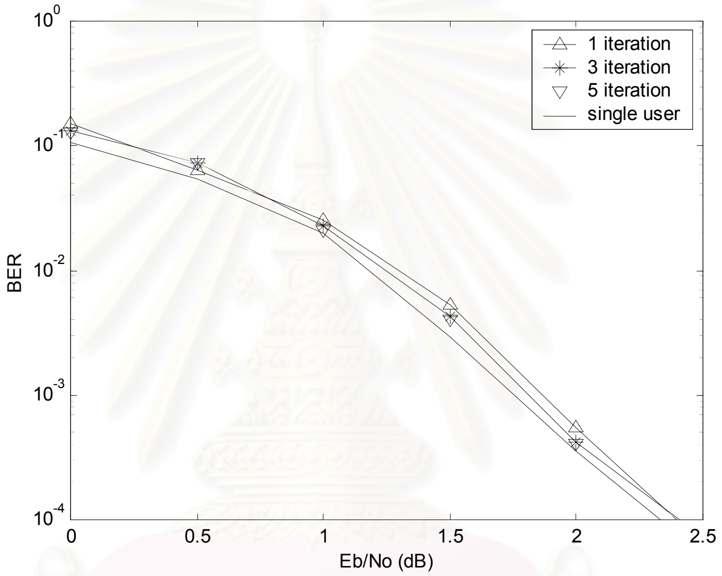
การทดสอบการทำงานของเครื่องรับ กรณีที่ความถี่ในการใช้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนในเครื่องรับแบบวนซ้ำเปลี่ยนไป ในที่นี้กำหนดให้เครื่องรับมีการใช้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน 1 ครั้ง ต่อการถอดรหัสเทอร์โบ 1 รอบ 3 รอบ และ 5 รอบ ตามลำดับ โดยให้เครื่องรับมีการวนซ้ำสำหรับตัวถอดรหัสเทอร์โบทั้งหมด 15 รอบ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.13 พบว่า ความถี่ในการใช้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน 1 ครั้ง ต่อการถอดรหัสเทอร์โบ 1 รอบ 3 รอบ และ 5 รอบ ให้สมรรถนะที่ใกล้เคียงกัน โดยเครื่องรับที่ใช้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน 1 ครั้งต่อการถอดรหัสเทอร์โบ 1 รอบ จะให้ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยน้อยที่สุด รองลงมา คือ เครื่องรับที่ใช้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน 1 ครั้ง ต่อการถอดรหัสเทอร์โบ 3 รอบ และ 5 รอบ ตามลำดับ ดังนั้นเพื่อเป็นการลดความซับซ้อนให้กับเครื่องรับ ในการทำงานจึงไม่จำเป็นต้องทำการดีเทกต์สำหรับผู้ใช้หลายคนในทุกรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 5.13 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับที่ใช้การประมาณบิตด้วยวิธีที่นำเสนอเมื่อความถี่ในการใช้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนเปลี่ยนไป

5) จำนวนรอบในการวนซ้ำของตัวถอดรหัสเทอร์โบ

การทดสอบการทำงานของเครื่องรับ กรณีที่ในการทำงานแต่ละรอบของเครื่องรับแบบวนซ้ำมีจำนวนรอบในการถอดรหัสเทอร์โบไม่เท่ากัน ในที่นี้ กำหนดให้ตัวถอดรหัสเทอร์โบมีจำนวนรอบในการวนซ้ำเป็น 1 รอบ 3 รอบ และ 5 รอบ ตามลำดับ โดยให้เครื่องรับมีการวนซ้ำทั้งหมด 15 รอบ ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.14 พบว่า เครื่องรับที่ใช้จำนวนรอบในการถอดรหัสเทอร์โบมากกว่าย่อมสามารถทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น



รูปที่ 5.14 ค่าอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยของเครื่องรับที่ใช้การประมาณบิตด้วยวิธีที่นำเสนอ เมื่อจำนวนรอบในการวนซ้ำของตัวถอดรหัสเทอร์โบเปลี่ยนไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ศึกษาการทำงานของเครื่องรับแบบวนซ้ำสำหรับระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบ โครงสร้างการทำงานแบบวนซ้ำเกิดขึ้นจากการแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่างดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนกับตัวถอดรหัสเทอร์โบ ซึ่งในที่นี้สนใจการทำงานของดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนชนิดขจัดสัญญาณแทรกสอดแบบขนาน เนื่องจากดีเทกเตอร์ชนิดนี้มีความซับซ้อนในการคำนวณต่ำและสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ง่าย ข่าวสารที่ได้จากตัวถอดรหัสจะถูกส่งมาให้ดีเทกเตอร์ เพื่อใช้งานในส่วนของการประมาณค่าบิต สำหรับนำไปใช้ประมาณค่าสัญญาณแทรกสอด จากนั้น จะส่งค่าประมาณสัญญาณแทรกสอดไปหักล้างออกจากสัญญาณรับที่ได้จากแมตช์ฟิลเตอร์ ทำให้สัญญาณรับที่ได้จากดีเทกเตอร์มีคุณภาพดีขึ้น ซึ่งจะส่งสัญญาณที่ได้นี้กลับไปทำการถอดรหัสต่อไป โครงสร้างของเครื่องรับดังกล่าวนี้ถูกเสนอขึ้นในงานวิจัยดังเอกสารอ้างอิง [8]

จากผลการทดสอบ พบว่า เครื่องรับที่เสนอขึ้นในเอกสารอ้างอิง [8] นั้น สามารถทำงานได้ดีเฉพาะกรณีที่รหัสแผ่มีค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างผู้ใช้แต่ละคนไม่สูงมากนัก (≤ 0.5) ในงานวิจัยนี้จึงหาวิธีการดัดแปลงเครื่องรับดังกล่าวเพื่อให้ระบบมีสมรรถนะที่ดีขึ้น โดยในการประมาณค่าบิตแบบเดิมนั้น เครื่องรับที่เสนอขึ้นในเอกสารอ้างอิง [8] สามารถประมาณค่าบิตได้จากการนำข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์เฉพาะผู้ใช้คนที่ต้องการมาช่วยในการประมาณ และมองสัญญาณแทรกสอดเป็นเสมือนสัญญาณรบกวน จึงทำให้ต้องมีการประมาณค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนขึ้นมาใหม่ งานวิจัยนี้จึงปรับปรุงโดยการลดการทำงานในส่วนของการคำนวณความแปรปรวนลง และเนื่องจากเครื่องรับมีการทำงานแบบวนซ้ำ ในแต่ละรอบของการวนซ้ำก็จะสร้างค่าบิตประมาณของผู้ใช้แต่ละคนออกมา ดังนั้น ค่าบิตประมาณของผู้ใช้คนอื่น ๆ ที่คำนวณในรอบที่แล้ว สามารถนำมาเป็นข้อมูลเพิ่มสำหรับช่วยในการประมาณในส่วนของค่าสัญญาณแทรกสอด เพื่อให้มีความถูกต้องมากขึ้น

การทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำโดยจำลองระบบซีดีเอ็มเอที่ใช้รหัสเทอร์โบกรณีข่ายเชื่อมโยงขาขึ้น สำหรับการส่งสัญญาณแบบซิงโครนัสผ่านช่องสัญญาณที่มีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก

พิจารณาผลการจำลองระบบ โดยใช้เครื่องรับที่มีการประมาณค่าบิตดังวิธีที่นำเสนอนั้น พบว่า สามารถทำงานได้ดีเฉพาะกรณีที่รหัสแผ่มีค่าสหสัมพันธ์ข้ามระหว่างผู้ใช้แต่ละคนไม่สูงมาก

นัก ($\rho \leq 0.5$) และเมื่อรหัสแผ่มีค่าสหสัมพันธ์ข้ามสูง ($\rho = 0.7$) สมรรถนะที่ได้มีค่าแย่มาก จนกระทั่งแย่กว่าการใช้เครื่องรับแบบดั้งเดิม เนื่องจากในการทำงานรอบแรกนั้น การประมาณค่าบิตจะมีความผิดพลาดสูงมาก และตัวถอดรหัสเทอร์โบไม่สามารถแก้ไขความผิดพลาดดังกล่าวได้ ทำให้ส่งผลต่อการทำงานในรอบถัดไป รวมทั้งค่าบิตที่ประมาณได้จะมีลักษณะแกว่งไปมาระหว่างค่าบวกกับค่าลบ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ทำการปรับปรุงเพิ่มเติม โดยหลังจากการประมาณค่าบิตแล้วจะทำการเฉลี่ยค่าบิตประมาณที่คำนวณได้ในรอบที่แล้วกับค่าที่คำนวณได้ในรอบปัจจุบัน เพื่อลดปัญหาการแกว่งของค่าบิตประมาณในแต่ละรอบ จากการทดสอบ พบว่า เครื่องรับสามารถทำงานได้ดีขึ้นมากในกรณีที่รหัสแผ่มีค่าสหสัมพันธ์ข้ามสูง และกรณีที่รหัสแผ่มีค่าสหสัมพันธ์ข้ามต่ำถึงปานกลาง เครื่องรับสามารถทำให้ระบบยังคงสมรรถนะที่ดีเช่นเดิม

พิจารณาเปรียบเทียบระหว่าง ระบบซีดีเอ็มเอที่มีการเข้ารหัสเทอร์โบ กับระบบซีดีเอ็มเอที่ไม่มีการเข้ารหัส พบว่า การนำรหัสเทอร์โบมาใช้เป็นรหัสแก้ความผิดพลาดไปหน้า สามารถทำให้ระบบมีสมรรถนะดีขึ้นอย่างมาก โดยเฉพาะเมื่อจำนวนผู้ใช้เพิ่มขึ้น อัตราขยายการเข้ารหัสยิ่งมีค่าเพิ่มขึ้น รวมทั้งยังเพิ่มความจุให้กับระบบอีกด้วย แต่มีข้อเสียในแง่ของการที่ต้องส่งข้อมูลของผู้ใช้แต่ละคนเพิ่มมากขึ้นและเวลาที่ใช้ในการทำงานที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งเสียไปกับการรอการลู่เข้าในการวนซ้ำของตัวถอดรหัส นอกจากนี้ ในการรับส่งข้อมูลนั้น จะต้องรอรับส่งข้อมูลทั้งบล็อกข้อมูล ไม่สามารถรับส่งข้อมูลแยกทีละบิตได้

ในกรณีการควบคุมกำลังส่งสมบูรณ์ พิจารณาอัตราความผิดพลาดบิตเฉลี่ยเมื่อกำลังของสัญญาณรบกวนเปลี่ยนไป โดยเปรียบเทียบกับการประมาณค่าบิตแบบอื่น ๆ ได้แก่ การประมาณค่าบิตโดยนำข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้ทุกคนในระบบมาช่วยในการประมาณ ซึ่งเป็นวิธีที่มีความซับซ้อนในการคำนวณสูงมาก และการประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่ลดความซับซ้อนลง ซึ่งเสนอโดย Zhang ดังแสดงในเอกสารอ้างอิง [8] จากผลการจำลองระบบ พบว่า เมื่อค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่ระหว่างผู้ใช้มีค่าไม่สูงมากนัก เครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตทั้ง 3 วิธีสามารถทำงานได้ดี จนกระทั่งสามารถทำให้สมรรถนะของระบบมีค่าเข้าใกล้กรณีที่ระบบมีผู้ใช้เพียงคนเดียว แต่เมื่อค่าสหสัมพันธ์ข้ามของรหัสแผ่มีค่าสูง เครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตทั้ง 3 วิธี ต่างก็ทำให้ระบบมีสมรรถนะแย่ลง แต่เครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอนั้น ทำให้ระบบมีสมรรถนะแย่ลงน้อยที่สุด นอกจากนี้ สังเกตว่า ข้อเสียของเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอนี้ คือ จำเป็นต้องใช้จำนวนรอบในการทำงานจำนวนหนึ่งถึงจะสามารถทำให้สมรรถนะที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตวิธีอื่น เนื่องจากในรอบแรกของการทำงานนั้นกำหนดให้ค่าบิตประมาณของผู้ใช้แต่ละคนมีค่าเท่ากับศูนย์

ในกรณีการควบคุมกำลังส่งไม่สมบูรณ์ ซึ่งเป็นการพิจารณาความทนทานต่อปรากฏการณ์ใกล้-ไกล พบว่า เครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอสามารถทำให้สมรรถนะของผู้

ใช้ที่มีกำลังสูงและผู้ใช้ที่มีกำลังต่ำมีค่าเข้าใกล้ระบบที่มีผู้ใช้เพียงคนเดียวได้ ดังนั้น เครื่องรับแบบวนซ้ำที่นำเสนอนี้สามารถทนต่อการเกิดปรากฏการณ์ใกล้-ไกลได้

การพิจารณาในแง่ของความซับซ้อนในการคำนวณ พบว่า เครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอนั้น ความซับซ้อนในส่วนของตัวประมาณค่าจะไม่ขึ้นกับจำนวนผู้ใช้ในระบบ แต่จะมีค่าขึ้นกับจำนวนรอบของเครื่องรับที่ใช้ในการวนซ้ำ

นอกจากนี้ ยังมีการทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำที่ใช้การประมาณค่าบิตด้วยวิธีที่นำเสนอนี้ในกรณีต่าง ๆ อีก เช่น กรณีที่จำนวนผู้ใช้ในระบบเพิ่มขึ้นแล้วทำให้สมรรถนะของระบบแย่ลง หรือ กรณีที่จำนวนบล็อกข้อมูลเพิ่มขึ้นกลับทำให้สมรรถนะของระบบดีขึ้น ซึ่งตรงตามคุณสมบัติของรหัสเทอร์โบ เป็นต้น

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต

สำหรับงานที่ควรได้รับการศึกษาหรือพัฒนาต่อไป คือ

1) ศึกษา และวิเคราะห์สมรรถนะของเครื่องรับแบบวนซ้ำในกรณีช่องสัญญาณที่มีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบอื่น ๆ เช่น ช่องสัญญาณที่มีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบอิมพัลส์ ช่องสัญญาณที่มีผลของเฟดดิงหลายวิถี เป็นต้น
2) พัฒนาเครื่องรับแบบวนซ้ำนี้สำหรับใช้ในระบบที่มีการส่งสัญญาณแบบอะซิงโครนัส
3) ปรับปรุงการทำงานของเครื่องรับแบบวนซ้ำ เช่น ในส่วนของตัวถอดรหัสเทอร์โบ อาจนำการถอดรหัสแบบขนานมาประยุกต์ใช้งาน และในส่วนของสัญญาณแทรกสอดส่วนที่ยังเหลืออยู่ในสัญญาณรับที่ได้จากดีเทกเตอร์ ในที่นี้สามารถมองสัญญาณดังกล่าวเป็นเหมือนสัญญาณรบกวน ซึ่งต้องมีการคำนวณค่าความแปรปรวนขึ้นมาใหม่ เพื่อนำไปใช้ในตัวประมาณค่าบิต หรือตัวถอดรหัสเทอร์โบ เป็นต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Li, J., and Imai, H. An Overview of Forward Error-Correction Coding for Spread Spectrum. Proceeding 1996 IEEE 4^{th} International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications Vol. 3 (September 1996) : 1193 - 1197.

2. Berrou, C., and Glavieux, A. Near Optimum Error Correcting Coding and Decoding : Turbo-Codes. IEEE Transaction on Communications Vol. 44 No. 10 (October 1996) : 1261 - 1271.

3. Hagenauer, J. The Turbo Principle : Tutorial Introduction and State of the Art. Proceeding International Symposium on Turbo Codes and Related Topics (September 1997) : 1-11.

4. Wang, X., and Poor, H. V. Iterative (Turbo) Soft Interference Cancellation and Decoding for Coded CDMA. IEEE Transactions on Communications Vol. 47 No. 7 (July 1999) : 1046 - 1061.

5. Reed, M. C., Schlegel, C. B., Alexander, P. D., and Asenstorfer, A. J. Iterative Multiuser Detection for CDMA with FEC : Near-Single-User Performance. IEEE Transactions on Communications Vol. 46 No. 12 (December 1998) : 1693 - 1699.

6. Damnjanovic, A. D., and Vojcic, B. R. Iterative Multiuser Detection / Decoding for Turbo Coded CDMA Systems. IEEE Communications Letters Vol. 5 No. 3 (March 2001) : 104 - 106.

7. Hsu, J. M., and Wang, C. L. A Low-Complexity Iterative Multiuser Receiver for Turbo-Coded DS-CDMA Systems. IEEE Journal on Selected Areas in Communications Vol. 19 No. 9 (September 2001) : 1775 - 1783.

8. Zhang, Y., and Blum, R.S. Iterative Multiuser Detection for Turbo-Code Synchornous CDMA in Gaussian and Non-Gaussian Impulsive Noise. IEEE Transactions on Communications Vol. 49 No. 3 (March 2001) : 397 - 400.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

9. Bahl, L. R., Cocke, J., Jelinek, F., and Raviv, J. Optimal Decoding of Linear Codes for Minimizing Symbol Error Rate. IEEE Transaction on Information Theory Vol. IT-20 (March 1974) : 284 - 287.

10. Moshavi, S. Multi-user Detection for DS-CDMA Communications. IEEE Communications Magazine Vol. 34 (October 1996) : 124 - 136.

11. เพียรพร หลินประเสริฐ. มัลติยูสเซอร์ดีเทกชันแบบป้อนกลับที่ใช้กระบวนการปรับอัตโนมัติชนิดบอดสำหรับระบบการสื่อสารแบบแบ่งแยกด้วยรหัสชนิดไดเรกต์ซีเควนซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การคำนวณอัตราส่วนความน่าเป็นจริง

กำหนดให้ ค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริง คือ ฟังก์ชันลอการิทึมของอัตราส่วนระหว่างค่าความน่าจะเป็นเบื้องหลังที่บิตข้อมูลมีค่าเป็น 1 หารด้วยค่าความน่าจะเป็นเบื้องหลังที่บิตข้อมูลมีค่าเป็น 0 ดังสมการ

$$L(u_n) = \log \frac{P(u_n = 1 \mid U_1^N, P_1^N)}{P(u_n = 0 \mid U_1^N, P_1^N)} \qquad \text{(ก-1)}$$

โดยกำหนดให้

u_n คือ ข้อมูลอินพุตของตัวเข้ารหัสเทอร์โบ บิตลำดับที่ n

u_n, p_n คือ ข้อมูลเอาต์พุตที่ได้จากตัวเข้ารหัสย่อยในการเข้ารหัสเทอร์โบ บิตลำดับที่ n โดย u_n คือ บิตข้อมูลซิสเต็มเมติก ส่วน p_n คือบิตข้อมูลพาริตี

U_n, P_n คือ ข้อมูลอินพุตของตัวถอดรหัสย่อยบิตลำดับที่ n ซึ่งได้มาจากการส่งข้อมูล u_n, p_n ผ่านช่องสัญญาณ

u_1^N คือ ข้อมูลอินพุตของตัวเข้ารหัสเทอร์โบ บิตลำดับที่ 1 ถึง N ส่วนตัวแปรอื่น ๆ สามารถนิยามได้ในทำนองเดียวกัน

N คือ จำนวนบิตใน 1 บล็อกข้อมูล

S_n คือ ค่าสเตตของตัวเข้ารหัสย่อย บิตลำดับที่ n

กฎของเบย์ คือ

$$P(A,B) = P(A \mid B) * P(B) \qquad \text{(ก-2)}$$

นำกฎของเบย์มาใช้ในสมการ (ก-1) จะได้

$$L(u_n) = \log \frac{P(u_n = 1, U_1^N, P_1^N)}{P(u_n = 0, U_1^N, P_1^N)}$$

เปลี่ยนค่าความน่าจะเป็นของบิตข้อมูลให้เขียนในรูปผลรวมความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนสเตต ซึ่งดูได้จากเทรลลิสไดอะแกรมในการเข้ารหัส จะได้

$$L(u_n) = \log \frac{\sum_{(s',s):u_n=1} P(S_{n-1}=s', S_n=s, U_1^N, P_1^N)}{\sum_{(s',s):u_n=0} P(S_{n-1}=s', S_n=s, U_1^N, P_1^N)} \quad \text{(ก-3)}$$

โดย

$$\begin{aligned} & P(S_{n-1}=s', S_n=s, U_1^N, P_1^N) \\ &= P(S_{n-1}=s', U_1^{n-1}, P_1^{n-1}) * P(S_n=s, U_n^N, P_n^N \mid S_{n-1}=s', U_1^{n-1}, P_1^{n-1}) \\ &= P(S_{n-1}=s', U_1^{n-1}, P_1^{n-1}) * P(S_n=s, U_n^N, P_n^N \mid S_{n-1}=s') \\ &= P(S_{n-1}=s', U_1^{n-1}, P_1^{n-1}) * P(S_n=s, U_n, P_n \mid S_{n-1}=s') \\ &\qquad * P(U_{n+1}^N, P_{n+1}^N \mid S_{n-1}=s', S_n=s, U_n, P_n) \\ &= P(S_{n-1}=s', U_1^{n-1}, P_1^{n-1}) * P(S_n=s, U_n, P_n \mid S_{n-1}=s') * P(U_{n+1}^N, P_{n+1}^N \mid S_n=s) \end{aligned}$$

(ก-4)

กำหนดให้

$$\alpha_n(s) = P(S_n=s, U_1^n, P_1^n) \quad \text{(ก-5)}$$

$$\beta_n(s) = P(U_{n+1}^N, P_{n+1}^N \mid S_n=s) \quad \text{(ก-6)}$$

$$\gamma_n(s',s) = P(S_n=s, U_n, P_n \mid S_{n-1}=s') \quad \text{(ก-7)}$$

นำสมการ (ก-5) (ก-6) และ (ก-7) ไปแทนค่าลงในสมการ (ก-4) จะได้

$$P(S_{n-1}=s', S_n=s, U_1^N, P_1^N) = \alpha_{n-1}(s') * \gamma_n(s',s) * \beta_n(s) \quad \text{(ก-8)}$$

นำสมการข้างต้นไปแทนค่าลงในสมการ (ก-3) จะได้ ค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริง คือ

$$L(u_n) = \log \frac{\sum\limits_{(s',s):u_n=1} \alpha_{n-1}(s') \cdot \gamma_n(s',s) \cdot \beta_n(s)}{\sum\limits_{(s',s):u_n=0} \alpha_{n-1}(s') \cdot \gamma_n(s',s) \cdot \beta_n(s)} \quad \text{(ก-9)}$$

นอกจากนี้ ค่า α_n, β_n สามารถเขียนสมการให้อยู่ในรูปแบบรีเคอร์ซีฟได้ นั่นคือ

$$\begin{aligned}
\alpha_n(s) &= P(S_n = s, U_1^n, P_1^n) \\
&= \sum_{\text{all } s'} P(S_{n-1} = s', S_n = s, U_1^n, P_1^n) \\
&= \sum_{\text{all } s'} P(S_{n-1} = s', U_1^{n-1}, P_1^{n-1}) * P(S_n = s, U_n, P_n \mid S_{n-1} = s', U_1^{n-1}, P_1^{n-1}) \\
&= \sum_{\text{all } s'} P(S_{n-1} = s', U_1^{n-1}, P_1^{n-1}) * P(S_n = s, U_n, P_n \mid S_{n-1} = s') \\
&= \sum_{\text{all } s'} \alpha_{n-1}(s') \cdot \gamma_n(s', s) \qquad \text{(ก-10)}
\end{aligned}$$

$$\beta_n(s) = P(U_{n+1}^N, P_{n+1}^N \mid S_n = s)$$

$$= \sum_{\text{all } s'} P(S_{n+1} = s', U_{n+1}^N, P_{n+1}^N \mid S_n = s)$$

$$= \sum_{\text{all } s'} P(S_{n+1} = s', U_{n+1}, P_{n+1} \mid S_n = s) * P(U_{n+2}^N, P_{n+2}^N \mid S_n = s, S_{n+1} = s', U_{n+1}, P_{n+1})$$

$$= \sum_{\text{all } s'} P(S_{n+1} = s', U_{n+1}, P_{n+1} \mid S_n = s) * P(U_{n+2}^N, P_{n+2}^N \mid S_{n+1} = s')$$

$$= \sum_{\text{all } s'} \gamma_{n+1}(s, s') \cdot \beta_{n+1}(s') \qquad \text{(ก-11)}$$

โดยให้เงื่อนไขขอบเขต คือ

ที่ $n = 0$ $\quad \alpha_0(0) = 1$ และ $\alpha_0(s) = 0$ เมื่อ $s \neq 0$

ที่ $n = N$ $\quad \beta_N(0) = 1$ และ $\beta_N(s) = 0$ เมื่อ $s \neq 0$ (ก-12)

จากสมการ (ก-7) สามารถแจกแจงค่า $\gamma_n(s',s)$ ได้ นั่นคือ

$$\begin{aligned}\gamma_n(s',s) &= P(S_n = s, U_n, P_n \mid S_{n-1} = s') \\ &= P(S_n = s \mid S_{n-1} = s') * P(U_n, P_n \mid S_{n-1} = s', S_n = s) \\ &= P(S_n = s \mid S_{n-1} = s') * P(U_n \mid S_{n-1} = s', S_n = s) * P(P_n \mid S_{n-1} = s', S_n = s)\end{aligned} \tag{ก-13}$$

สรุปขั้นตอนในการคำนวณค่าความน่าเป็นจริง รายละเอียดดังนี้

1. จากเงื่อนไขขอบเขต กำหนดค่าเริ่มต้นของ $\alpha_0(s)$ และ $\beta_N(s)$ ดังสมการ (ก-12)
2. เมื่อได้รับบิตข้อมูลทีละบิตจากช่องสัญญาณ (U_n, P_n) นำไปคำนวณค่า $\gamma_n(s',s)$ และ $\alpha_n(s)$ ดังสมการ (ก-13) และ (ก-10) ตามลำดับ
3. หลังจากได้รับบิตข้อมูลจากช่องสัญญาณครบทั้งบล็อกข้อมูลแล้ว นำไปคำนวณค่า $\beta_n(s)$ ดังสมการ (ก-11)
4. จากนั้นนำค่า $\alpha_n(s)$, $\beta_n(s)$ และ $\gamma_n(s',s)$ ที่คำนวณไว้ข้างต้นไปคำนวณค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงของบิตข้อมูลดังสมการ (ก-9)

ในส่วนของบิตข้อมูลพาริตี

จากการดัดแปลงตัวถอดรหัสย่อย โดยให้มีการคำนวณค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงของบิตข้อมูลพาริตีออกมาด้วย นั่นคือ

$$L(p_n) = \log \frac{P(p_n = 1 \mid U_1^N, P_1^N)}{P(p_n = 0 \mid U_1^N, P_1^N)} \tag{ก-14}$$

สามารถเขียนสมการข้างต้น ในลักษณะเดียวกับสมการ (ก-9) จะได้

$$L(p_n) = \log \frac{\sum_{(s',s):p_n=1} \alpha_{n-1}(s') \cdot \gamma_n(s',s) \cdot \beta_n(s)}{\sum_{(s',s):p_n=0} \alpha_{n-1}(s') \cdot \gamma_n(s',s) \cdot \beta_n(s)} \tag{ก-15}$$

ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์ตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์

ตัวประมาณค่าบิตชนิดซอฟต์วิธีต่าง ๆ มีรายละเอียดในการคำนวณดังต่อไปนี้

วิธีที่ 1 การประมาณค่าบิตโดยนำข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้ทุกคนมาช่วยในการประมาณ ดังหัวข้อ 4.1

$$b_k^{\boxed{t}} = E\left[b_k \middle| y_1,\Lambda\ ,y_K\right] \qquad (ข\text{-}1)$$

$$= \sum_{b_k=\pm 1} b_k * P(b_k | y_1,\Lambda\ ,y_K)$$

$$= \sum_{b_k=\pm 1} \frac{b_k * P(b_k, y_1,\Lambda\ ,y_K)}{P(y_1,\Lambda\ ,y_K)}$$

$$= \frac{\sum_{b_k=\pm 1} b_k * P(b_k, y_1,\Lambda\ ,y_K)}{\sum_{b_k=\pm 1} P(b_k, y_1,\Lambda\ ,y_K)}$$

$$= \frac{\sum_{b_k=\pm 1} b_k * P(y_1,\Lambda\ ,y_K | b_k) * P(b_k)}{\sum_{b_k=\pm 1} P(y_1,\Lambda\ ,y_K | b_k) * P(b_k)}$$

$$= \frac{P(y_1,\Lambda\ ,y_K | b_k=+1) * P(b_k=+1) - P(y_1,\Lambda\ ,y_K | b_k=-1) * P(b_k=-1)}{P(y_1,\Lambda\ ,y_K | b_k=+1) * P(b_k=+1) + P(y_1,\Lambda\ ,y_K | b_k=-1) * P(b_k=-1)}$$

$$= \frac{\dfrac{P(y_1,\Lambda\ ,y_K | b_k=+1)}{P(y_1,\Lambda\ ,y_K | b_k=-1)} * \dfrac{P(b_k=+1)}{P(b_k=-1)} - 1}{\dfrac{P(y_1,\Lambda\ ,y_K | b_k=+1)}{P(y_1,\Lambda\ ,y_K | b_k=-1)} * \dfrac{P(b_k=+1)}{P(b_k=-1)} + 1} \qquad (ข\text{-}2)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำหนดให้

$$L^{t}_{channel}(b_k) = \log\frac{P(\mathbf{y}\,|\,b_k = +1)}{P(\mathbf{y}\,|\,b_k = -1)} \tag{ข-3}$$

$$= \log\frac{P(y_1, \ldots, y_K \,|\, b_k = +1)}{P(y_1, \ldots, y_K \,|\, b_k = -1)}$$

$$L^{t}_{priori}(b_k) = \log\frac{P(b_k = +1)}{P(b_k = -1)} \tag{ข-4}$$

นำสมการ (ข-3) และ (ข-4) แทนลงในสมการ (ข-2) จะได้

$$b_k^{t} = \frac{\exp(L^{t}_{channel}(b_k)) * \exp(L^{t}_{priori}(b_k)) \; -1}{\exp(L^{t}_{channel}(b_k)) * \exp(L^{t}_{priori}(b_k)) \; +1}$$

$$= \frac{\exp\left[(L^{t}_{channel}(b_k) + L^{t}_{priori}(b_k))/2\right] - \exp\left[-(L^{t}_{channel}(b_k) + L^{t}_{priori}(b_k))/2\right]}{\exp\left[(L^{t}_{channel}(b_k) + L^{t}_{priori}(b_k))/2\right] + \exp\left[-(L^{t}_{channel}(b_k) + L^{t}_{priori}(b_k))/2\right]}$$

$$b_k^{t} = \tanh\left[\left(L^{t}_{channel}(b_k) + L^{t}_{priori}(b_k)\right)/2\right] \tag{ข-5}$$

ในส่วนของความน่าเป็นจริงของช่องสัญญาณ สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$L^{t}_{channel}(b_k) = \log\frac{P(\mathbf{y}\,|\,b_k = +1)}{P(\mathbf{y}\,|\,b_k = -1)}$$

โดย

$$P(\mathbf{y}\,|\,b_k) = \frac{P(\mathbf{y}, b_k)}{P(b_k)}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$= \sum_{\substack{b_j=\pm 1 \\ j\neq k}} \frac{P(\mathbf{y}, b_1, \Lambda, b_k, \Lambda, b_K)}{P(b_k)}$$

$$= \sum_{\substack{b_j=\pm 1 \\ j\neq k}} \frac{P(\mathbf{y}\,|\,\mathbf{b}) * \prod_{j=1}^{K} P(b_j)}{P(b_k)}$$

$$= \sum_{\substack{b_j=\pm 1 \\ j\neq k}} P(\mathbf{y}\,|\,\mathbf{b}) * \prod_{\substack{j=1 \\ j\neq k}}^{K} P(b_j) \qquad (ข\text{-}6)$$

จากสมการ (2.13) สัญญาณรับที่ได้จากการผ่านแมตช์ฟิลเตอร์ คือ

$$\mathbf{y} = \mathbf{RAb} + \tilde{\mathbf{n}}$$

แทนค่าลงในสมการ (ข-6) จะได้

$$P(\mathbf{y}\,|\,b_k) = \sum_{\substack{b_j=\pm 1 \\ j\neq k}} P(\mathbf{y} - \mathbf{RAb}) * \prod_{\substack{j=1 \\ j\neq k}}^{K} P(b_j) \qquad (ข\text{-}7)$$

ในที่นี้ กำหนดให้ ช่องสัญญาณมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวกค่าเฉลี่ยเป็น 0 และค่าความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นของสัญญาณรบกวนหลังจากผ่านแมตช์ฟิลเตอร์ คือ

$$f(\tilde{\mathbf{n}}) = (2\pi)^{-K/2} |\Sigma|^{-1/2} \exp\left[-\frac{(\tilde{\mathbf{n}} - \mu)^T \Sigma^{-1} (\tilde{\mathbf{n}} - \mu)}{2} \right]$$

โดย

Σ คือ เมตริกซ์ความแปรปรวนมีค่าเท่ากับ $\sigma^2 \mathbf{R}$

μ คือ เมตริกซ์ค่าเฉลี่ยของสัญญาณรบกวน มีค่าเป็น เมตริกซ์ศูนย์

นำสมการ (ข-7) แทนค่าลงในสมการ (ข-3) โดยกำหนดให้

$$B_k^{+} = \left\{(b_1, \ldots, b_{k-1}, +1, b_{k+1}, \ldots, b_K) : b_j \in \{+1, -1\}, j \neq k\right\}$$

$$B_k^{-} = \left\{(b_1, \ldots, b_{k-1}, -1, b_{k+1}, \ldots, b_K) : b_j \in \{+1, -1\}, j \neq k\right\}$$

จะได้

$$L^{t}_{channel}(b_k) = \log \frac{\sum\limits_{\mathbf{b} \in B_k^{+}} P(\mathbf{y} - \mathbf{RAb}) * \prod\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{K} P(b_j)}{\sum\limits_{\mathbf{b} \in B_k^{-}} P(\mathbf{y} - \mathbf{RAb}) * \prod\limits_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{K} P(b_j)}$$

$$= \log \frac{\sum\limits_{\mathbf{b} \in B_k^{+}} \exp\left[-(\mathbf{y} - \mathbf{RAb})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{RAb}) \big/ (2\sigma^2)\right] * \prod\limits_{j \neq k} P(b_j)}{\sum\limits_{\mathbf{b} \in B_k^{-}} \exp\left[-(\mathbf{y} - \mathbf{RAb})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{RAb}) \big/ (2\sigma^2)\right] * \prod\limits_{j \neq k} P(b_j)} \qquad \text{(ข-8)}$$

โดย

$$\exp\left[-(\mathbf{y} - \mathbf{RAb})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y} - \mathbf{RAb}) \big/ (2\sigma^2)\right]$$

$$= \exp(-\mathbf{y}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} \big/ (2\sigma^2)) * \exp(-\mathbf{b}^T \mathbf{ARAb} \big/ (2\sigma^2)) * \exp(\mathbf{b}^T \mathbf{Ay} \big/ \sigma^2) \qquad \text{(ข-9)}$$

$$\exp\left[\mathbf{b}^T \mathbf{Ay} \big/ \sigma^2\right] = \exp\left[\sum_{j=1}^{K} A_j b_j y_j \Big/ \sigma^2\right]$$

$$= \prod_{j=1}^{K} \exp(A_j b_j y_j \big/ \sigma^2) \qquad \text{(ข-10)}$$

นำสมการ (ข-9) และ (ข-10) แทนลงใน (ข-8) จะได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$L^{t}_{channel}(b_k)$$

$$= \log \frac{\sum_{\mathbf{b} \in B_k^{+}} \exp(-\mathbf{y}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} / 2\sigma^2) * \exp(-\mathbf{b}^T \mathbf{ARAb} / 2\sigma^2) * \exp(\mathbf{b}^T \mathbf{Ay} / \sigma^2) * \prod_{j \neq k} P(b_j)}{\sum_{\mathbf{b} \in B_k^{-}} \exp(-\mathbf{y}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{y} / 2\sigma^2) * \exp(-\mathbf{b}^T \mathbf{ARAb} / 2\sigma^2) * \exp(\mathbf{b}^T \mathbf{Ay} / \sigma^2) * \prod_{j \neq k} P(b_j)}$$

$$= \log \frac{\sum_{\mathbf{b} \in B_k^{+}} \exp(-\mathbf{b}^T \mathbf{ARAb} / 2\sigma^2) * \prod_{j=1}^{K} \exp(A_j b_j y_j / \sigma^2) * \prod_{j \neq k} P(b_j)}{\sum_{\mathbf{b} \in B_k^{-}} \exp(-\mathbf{b}^T \mathbf{ARAb} / 2\sigma^2) * \prod_{j=1}^{K} \exp(A_j b_j y_j / \sigma^2) * \prod_{j \neq k} P(b_j)}$$

สมการข้างต้นสามารถดึงพจน์ $\exp(A_k b_k y_k / \sigma^2)$ ออกมาได้ เนื่องจากทุกกรณีในเซต B_k^{+} และ B_k^{-} พจน์ดังกล่าวนี้จะมีค่าเท่าเดิมตลอด

ส่วน $P(b_j)$ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$P(b_j = b) = \frac{\exp\left(b * L^{t}_{priori}(b_j)\right)}{1 + \exp\left(b * L^{t}_{priori}(b_j)\right)}$$

$$= \frac{\exp\left(\frac{1}{2} * b * L^{t}_{priori}(b_j)\right)}{\exp\left(-\frac{1}{2} * b * L^{t}_{priori}(b_j)\right) + \exp\left(\frac{1}{2} * b * L^{t}_{priori}(b_j)\right)}$$

$$= \frac{\cosh\left(\frac{1}{2} * L^{t}_{priori}(b_j)\right) * \left[1 + b * \tanh\left(\frac{1}{2} * L^{t}_{priori}(b_j)\right)\right]}{2 * \cosh\left(\frac{1}{2} * b * L^{t}_{priori}(b_j)\right)}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$P(b_j = b) = \frac{1}{2} * \left[1 + b * \tanh\left(\frac{1}{2} * L^t_{priori}(b_j) \right) \right] \quad (ข\text{-}11)$$

ดังนั้น ค่าอัตราส่วนความน่าเป็นจริงของช่องสัญญาณมีค่าเป็น

$$L^t_{channel}(b_k) = \frac{2A_k b_k y_k}{\sigma^2} + \log \frac{\sum_{\mathbf{b} \in B_k^+} \exp\left[-\mathbf{b}^T \mathbf{ARAb} \big/ (2\sigma^2) \right] \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{K} \exp(A_j b_j y_j \big/ \sigma^2) * \left[1 + b_j * \tanh(L^t_{priori}(b_j)/2) \right]}{\sum_{\mathbf{b} \in B_k^-} \exp\left[-\mathbf{b}^T \mathbf{ARAb} \big/ (2\sigma^2) \right] \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{K} \exp(A_j b_j y_j \big/ \sigma^2) * \left[1 + b_j * \tanh(L^t_{priori}(b_j)/2) \right]}$$

(ข-12)

วิธีที่ 2 การประมาณค่าบิตโดยนำข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์เฉพาะผู้ใช้คนที่ต้องการเท่านั้นมาช่วยในการประมาณ ดังหัวข้อ 4.2

$$\boxed{b_k^t} = E\left[b_k \middle| y_k \right] \quad (ข\text{-}13)$$

$$= \sum_{b_k = \pm 1} b_k * P(b_k | y_k)$$

$$= \sum_{b_k = \pm 1} \frac{b_k * P(b_k, y_k)}{P(y_k)}$$

$$= \frac{\sum_{b_k = \pm 1} b_k * P(b_k, y_k)}{\sum_{b_k = \pm 1} P(b_k, y_k)}$$

$$= \frac{\sum_{b_k = \pm 1} b_k * P(y_k | b_k) * P(b_k)}{\sum_{b_k = \pm 1} P(y_k | b_k) * P(b_k)}$$

$$= \frac{\dfrac{P(y_k|b_k=+1)}{P(y_k|b_k=-1)} * \dfrac{P(b_k=+1)}{P(b_k=-1)} - 1}{\dfrac{P(y_k|b_k=+1)}{P(y_k|b_k=-1)} * \dfrac{P(b_k=+1)}{P(b_k=-1)} + 1}$$

กำหนดให้

$$L^{t}_{channel}(b_k) = \log\frac{P(y_k \mid b_k=+1)}{P(y_k \mid b_k=-1)} \qquad \text{(ข-14)}$$

$$L^{t}_{priori}(b_k) = \log\frac{P(b_k=+1)}{P(b_k=-1)}$$

จะได้

$$b^{t}_{k} \;=\; \tanh\left[\left(L^{t}_{channel}(b_k) + L^{t}_{priori}(b_k)\right)\Big/2\right]$$

วิธีนี้จะมองสัญญาณแทรกสอดเนื่องจากการเข้าถึงหลายทาง (MAI) เป็นสัญญาณรบกวน และจากสมการ (2.3) สัญญาณรับที่ได้จากการผ่านแมตช์ฟิลเตอร์มีค่าเป็น

$$y_k(i) = A_k b_k(i) + n_k(i)$$

โดย $$n_k(i) = \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq k}}^{K} \rho_{k,j} A_j b_j(i) + \tilde{n}_k(i)$$

กำหนดให้ช่องสัญญาณมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และค่าความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็น คือ

$$f(n_k) = \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{K/2}} \exp\left[-\frac{(n_k)^2}{2\sigma^2}\right] \qquad \text{(ข-15)}$$

ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนใหม่ คือ

$$\sigma^2_{all,k} = \sigma^2 + \sigma^2_{MAI,k}$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โดย $\sigma^2_{MAI,k} = \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq k}}^{K} (\rho_{k,j} A_j)^2$

ในส่วนของความน่าเป็นจริงของช่องสัญญาณ สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$
\begin{aligned}
L^t_{channel}(b_k) &= \log \frac{P(y_k \mid b_k = +1)}{P(y_k \mid b_k = -1)} \\
&= \log \frac{\exp\left[-(y_k - A_k)^2 \big/ 2\sigma^2_{all,k}\right]}{\exp\left[-(y_k + A_k)^2 \big/ 2\sigma^2_{all,k}\right]} \\
&= 2 y_k A_k \big/ \sigma^2_{all,k}
\end{aligned}
\tag{ข-16}
$$

วิธีที่ 3 การประมาณค่าบิตโดยนำข้อมูลจากแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนที่ต้องการและค่าบิตประมาณของผู้ใช้คนอื่น ๆ ในรอบที่แล้วมาช่วยในการประมาณ ดังหัวข้อ 4.3

$$
\hat{b}^{(t)}_k = E\left[b_k \middle| y_k, \hat{b}^{(t-1)}_1, \ldots, \hat{b}^{(t-1)}_{k-1}, \hat{b}^{(t-1)}_{k+1}, \ldots, \hat{b}^{(t-1)}_K\right] \tag{ข-17}
$$

$$
= \sum_{b_k=\pm 1} b_k * P(b_k \mid y_k, \hat{b}^{(t-1)}_1, \ldots, \hat{b}^{(t-1)}_{k-1}, \hat{b}^{(t-1)}_{k+1}, \ldots, \hat{b}^{(t-1)}_K)
$$

$$
= \sum_{b_k=\pm 1} \frac{b_k * P(b_k, y_k, \hat{b}^{(t-1)}_1, \ldots, \hat{b}^{(t-1)}_{k-1}, \hat{b}^{(t-1)}_{k+1}, \ldots, \hat{b}^{(t-1)}_K)}{P(y_k, \hat{b}^{(t-1)}_1, \ldots, \hat{b}^{(t-1)}_{k-1}, \hat{b}^{(t-1)}_{k+1}, \ldots, \hat{b}^{(t-1)}_K)}
$$

$$
= \frac{\sum_{b_k=\pm 1} b_k * P(b_k, y_k, \hat{b}^{(t-1)}_1, \ldots, \hat{b}^{(t-1)}_{k-1}, \hat{b}^{(t-1)}_{k+1}, \ldots, \hat{b}^{(t-1)}_K)}{\sum_{b_k=\pm 1} P(b_k, y_k, \hat{b}^{(t-1)}_1, \ldots, \hat{b}^{(t-1)}_{k-1}, \hat{b}^{(t-1)}_{k+1}, \ldots, \hat{b}^{(t-1)}_K)}
$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$= \frac{\sum_{b_k=\pm 1} b_k * P(y_k | \tilde{b}_1^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_{k-1}^{t-1}, b_k, \tilde{b}_{k+1}^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_K^{t-1}) * P(b_k) * \prod_{i \neq k} P(\tilde{b}_i^{t-1})}{\sum_{b_k=\pm 1} P(y_k | \tilde{b}_1^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_{k-1}^{t-1}, b_k, \tilde{b}_{k+1}^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_K^{t-1}) * P(b_k) * \prod_{i \neq k} P(\tilde{b}_i^{t-1})}$$

$$= \frac{\sum_{b_k=\pm 1} b_k * P(y_k | \tilde{b}_1^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_{k-1}^{t-1}, b_k, \tilde{b}_{k+1}^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_K^{t-1}) * P(b_k)}{\sum_{b_k=\pm 1} P(y_k | \tilde{b}_1^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_{k-1}^{t-1}, b_k, \tilde{b}_{k+1}^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_K^{t-1}) * P(b_k)}$$

$$= \frac{\dfrac{P(y_k | \tilde{b}_1^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_{k-1}^{t-1}, b_k = +1, \tilde{b}_{k+1}^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_K^{t-1})}{P(y_k | \tilde{b}_1^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_{k-1}^{t-1}, b_k = -1, \tilde{b}_{k+1}^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_K^{t-1})} * \dfrac{P(b_k = +1)}{P(b_k = -1)} - 1}{\dfrac{P(y_k | \tilde{b}_1^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_{k-1}^{t-1}, b_k = +1, \tilde{b}_{k+1}^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_K^{t-1})}{P(y_k | \tilde{b}_1^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_{k-1}^{t-1}, b_k = -1, \tilde{b}_{k+1}^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_K^{t-1})} * \dfrac{P(b_k = +1)}{P(b_k = -1)} + 1}$$

กำหนดให้

$$L_{channel}^{t}(b_k) = \log \frac{P(y_k | \tilde{b}_1^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_{k-1}^{t-1}, b_k = +1, \tilde{b}_{k+1}^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_K^{t-1})}{P(y_k | \tilde{b}_1^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_{k-1}^{t-1}, b_k = -1, \tilde{b}_{k+1}^{t-1}, \ldots, \tilde{b}_K^{t-1})} \qquad (ข\text{-}18)$$

$$L_{priori}^{t}(b_k) = \log \frac{P(b_k = +1)}{P(b_k = -1)}$$

จะได้

$$\tilde{b}_k^{t} = \tanh\left[\left(L_{channel}^{t}(b_k) + L_{priori}^{t}(b_k)\right) / 2\right]$$

จากสมการ (2.3) สัญญาณรับที่ได้จากการผ่านแมตช์ฟิลเตอร์มีค่าเป็น

$$y_k = A_k b_k + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{K} \rho_{k,j} A_j b_j + \tilde{n}_k$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กำหนดให้ช่องสัญญาณมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สีขาวชนิดบวก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และค่าความแปรปรวนเท่ากับ σ^2 ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นดังสมการ (ข-15)

ในส่วนของความน่าเป็นจริงของช่องสัญญาณ สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$L_{channel}^{t}(b_k) = \log\frac{P(y_k \mid b_1^{t-1},\ldots,b_{k-1}^{t-1},b_k=+1,b_{k+1}^{t-1},\ldots,b_K^{t-1})}{P(y_k \mid b_1^{t-1},\ldots,b_{k-1}^{t-1},b_k=-1,b_{k+1}^{t-1},\ldots,b_K^{t-1})}$$

$$= \log\frac{\exp\left[-\left(y_k - A_k - \sum_{j\neq k}\rho_{k,j}A_j b_j^{t-1}\right)^2 \Big/ 2\sigma^2\right]}{\exp\left[-\left(y_k + A_k - \sum_{j\neq k}\rho_{k,j}A_j b_j^{t-1}\right)^2 \Big/ 2\sigma^2\right]}$$

$$= \frac{2}{\sigma^2}A_k\left(y_k - \sum_{j\neq k}\rho_{k,j}A_j b_j^{t-1}\right) \qquad (\text{ข-19})$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ใน "การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 25" วันที่ 21-22 พฤศจิกายน 2545 ที่มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การปรับปรุงวิธีการหักล้างสัญญาณแทรกสอดแบบวนซ้ำชนิดซอฟต์สำหรับระบบซีดีเอ็มเอแบบซิงโครนัสที่ใช้รหัสเทอร์โบ

An Improvement of Iterative Soft Interference Cancellation for Turbo-Coded Synchronous CDMA System

พัชรี เทพนิมิตร ลัญฉกร วุฒิสิทธิกุลกิจ สุวิทย์ นาคพีระยุทธ และ พิสิฐ วนิชชานันท์
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร 0-2218-6915 โทรสาร 0-2218-6912 E-mail: sorrn@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ปรับปรุงการทำงานของเครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายคนแบบวนซ้ำใช้งานในระบบซีดีเอ็มเอแบบซิงโครนัสที่ใช้รหัสเทอร์โบในสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน เครื่องรับประกอบด้วยการทำงานร่วมกันระหว่างการดีเทกต์สำหรับผู้ใช้หลายคนแบบซอฟต์อินพุตซอฟต์เอาต์พุตกับเซตของการถอดรหัสช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้คนเดียวแบบซอฟต์อินพุตซอฟต์เอาท์พุตผ่านกระบวนการวนซ้ำ ในการดีเทกต์สำหรับผู้ใช้หลายคนชนิดไม่เชิงเส้นจะใช้ประโยชน์จากค่าความน่าจะเป็นเบื้องแรกของบิตผู้ใช้ในรอบที่แล้วและรอบปัจจุบันมาช่วยในการประมาณค่าบิตแบบซอฟต์สำหรับใช้ในการหักล้างสัญญาณแทรกสอดระหว่างผู้ใช้ จากผลการจำลองตัวประมาณค่าบิตตามที่เสนอนั้นสามารถให้ผลดีที่ค่าสหสัมพันธ์ข้ามใด ๆ

Abstract

In this paper, we develop an iterative multiuser receiver for turbo-coded synchronous CDMA system in Gaussian noise. The receiver consists of a soft-input soft-output (SISO) nonlinear multiuser detector and a set of single-user SISO channel decoders, through an iterative process. The nonlinear multiuser detector ultilizes the prior probabilities of users 's bits in previous and present iteration to form soft estimates used for multiple-access interference cancellation. Simulation results show that the proposed estimater performs well with any cross correlation.

Keywords : Turbo code, turbo-coded CDMA, iterative multiuser detection, soft interference cancellation

1. บทนำ

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีซีดีเอ็มเอชนิดไดเรกต์ซีเควนซ์ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางสำหรับรองรับระบบสื่อสารไร้สายแถบความถี่กว้าง นักวิจัยหลายท่านได้เสนอแนวคิดการพัฒนาวงจรภาครับที่มีกระบวนการทำงานร่วมกันระหว่างขั้นตอนการถอดรหัสช่องสัญญาณ (channel decoding) กับขั้นตอนการดีเทกชันสำหรับผู้ใช้หลายคน (multiuser detection : MUD) โดยอาศัยการแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่างกันแบบวนซ้ำ ซึ่งเป็นการประยุกต์แนวคิดจากหลักการเทอร์โบ (Turbo principle) งานวิจัยในช่วงเริ่มแรกมีการนำเครื่องเข้ารหัสคอนโวลูชันมาใช้กับระบบซีดีเอ็มเอแบบซิงโครนัส โดยใน [1] ได้ปรับปรุงเครื่องรับให้มีการแลกเปลี่ยนข่าวสารระหว่างดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนแบบซอฟต์อินพุตซอฟต์เอาต์พุต กับเซตของตัวถอดรหัสช่องสัญญาณสำหรับผู้ใช้คนเดียวแบบซอฟต์อินพุตซอฟต์เอาต์พุต นอกจากนั้นยังเสนอวิธีลดความซับซ้อนด้วยการอาศัยเทคนิควิธีการหักล้างสัญญาณแทรกสอดแบบซอฟต์และใช้งานร่วมกับวงจรกรองแบบที่ทำให้ค่าเฉลี่ยกำลังสองของค่าความผิดพลาดต่ำที่สุด (MMSE filter) ความซับซ้อนที่ใช้ในการคำนวณแปรตามจำนวนผู้ใช้ในระบบยกกำลังสอง

นอกจากนั้นได้มีการเสนอให้นำเครื่องเข้ารหัสเทอร์โบมาประยุกต์ใช้ [2-3] เนื่องจากรหัสเทอร์โบ [4] มีประสิทธิภาพในการจัดการกับปัญหาความผิดพลาดที่เกิดจากการส่งข่าวสารผ่านช่องสัญญาณได้เป็นอย่างดี โดย [2] เสนอให้ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนและตัวถอดรหัสเทอร์โบสำหรับผู้ใช้คนเดียวทำงานคู่กันไปโดยไม่จำเป็นต้องรอการวนซ้ำของตัวถอดรหัส และตัวถอดรหัสย่อยทั้งสองตัวของตัวถอดรหัสเทอร์โบเชื่อมต่อกันแบบขนาน สมรรถนะในการทำงานของวิธีนี้ให้ผลดีแม้ว่าค่าสหสัมพันธ์ระหว่างโค้ดของผู้ใช้จะมีค่ามากก็ตาม แต่ความซับซ้อนในการคำนวณมีค่าสูงมากโดยแปรตามฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียลของจำนวนผู้ใช้ในระบบ ทำให้ไม่เหมาะสมจะนำไปประยุกต์ใช้งาน ส่วนใน [3] สนใจการทำงานของดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งจะนำเทคนิคการหักล้างสัญญาณแทรกสอดแบบขนาน (parallel interference

cancellation : PIC) มาประยุกต์ใช้งาน การทำงานของตัวถอดรหัสเทอร์โบจะมีการวนซ้ำภายใน วิธีนี้มีความซับซ้อนในการคำนวณต่ำกว่าวิธีที่เสนอใน [1-2] โดยแปรตามจำนวนผู้ใช้ของระบบ แต่มีข้อเสียคือสามารถทำงานได้ดีเฉพาะเมื่อค่าสหสัมพันธ์ระหว่างโค้ดของผู้ใช้มีค่าน้อย ($\rho_{i,j} \leq 0.5$)

ดังนั้น ในบทความนี้ได้ประยุกต์ใช้งานตามโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องรับที่เสนอตามเอกสารอ้างอิง [3] เนื่องจากมีความซับซ้อนในการคำนวณต่ำกว่าวิธีอื่น ๆ โดยพยายามปรับปรุงช่วงในการทำงานให้สามารถทำงานได้แม้ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างโค้ดของผู้ใช้มีค่ามาก ($\rho_{i,j} > 0.5$) ซึ่งอาศัยเทคนิคการหักล้างสัญญาณแทรกสอดแบบซอฟต์ในวิธีที่เสนอตามเอกสาร [1] มาประยุกต์ใช้

2. แบบจำลองระบบ

พิจารณาระบบซีดีเอ็มเอ ในกรณีที่ส่งสัญญาณจากโทรศัพท์ไปหาสถานีฐานโดยผ่านช่องสัญญาณที่มีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก (AWGN) ให้สัญญาณจากผู้ใช้แต่ละคนมาถึงแบบซิงโครนัสกันอย่างสมบูรณ์และที่ด้านรับรู้สเปรดดิงโค้ดของผู้ใช้แต่ละคน

ทางภาคส่ง ระบบจะส่งสัญญาณผ่านตัวเข้ารหัสเทอร์โบก่อนที่จะทำการสเปรดสัญญาณ โดยตัวเข้ารหัสเทอร์โบ [4] นั้นประกอบด้วยตัวเข้ารหัสย่อยสองตัวเชื่อมต่อกันแบบขนาน มีอินเตอร์ลีฟเวอร์ทำหน้าที่สลับลำดับบิตข้อมูลเพื่อให้ข้อมูลด้านเข้าของตัวเข้ารหัสย่อยทั้งสองตัวแตกต่างกัน อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 ตัวเข้ารหัสย่อยที่ใช้คือตัวเข้ารหัสคอนโวลูชันแบบมีระบบและมีการป้อนกลับ

สัญญาณรับที่ได้เมื่อส่งผ่านช่องสัญญาณ คือ

$$r(t) = \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=0}^{N-1} A_k b_k(i) s_k(t - iT) + n(t) \qquad (1)$$

โดยกำหนดให้

$b_k(i)$ คือ บิตข้อมูลที่ผ่านการเข้ารหัสลำดับที่ i ของผู้ใช้คนที่ k

$s_k(t)$ คือ รูปคลื่นสเปรดดิงที่ถูกนอร์มอลไลซ์ของผู้ใช้คนที่ k

$A_k(i)$ คือ แอมพลิจูดที่ได้รับลำดับบิตที่ i ของผู้ใช้คนที่ k

T คือ ช่วงสัญลักษณ์ K คือ จำนวนผู้ใช้ทั้งหมด และ N คือ จำนวนบิตทั้งหมดที่ได้จากการเข้ารหัส

$n(t)$ คือ สัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และค่าความแปรปรวนเท่ากับ σ^2

ทางภาครับ สัญญาณรับจะถูกส่งผ่านวงจรแมตช์ฟิลเตอร์เพื่อแยกข้อมูลของผู้ใช้แต่ละคนออกจากกัน จะได้

$$\mathbf{y}(i) = \mathbf{RAb}(i) + \tilde{\mathbf{n}}(i) \qquad (2)$$

โดยกำหนดให้

$\mathbf{y}(i) = [y_1(i), \ldots, y_K(i)]^T$ โดย $y_k(i)$ คือ บิตข้อมูลที่ได้จากการผ่านวงจรแมตช์ฟิลเตอร์ลำดับที่ i ของผู้ใช้คนที่ k

R คือ เมตริกซ์สหสัมพันธ์ระหว่างรหัสที่ใช้ในการสเปรด โดย $R_{k,l} = \rho_{k,l}$, $R_{k,k} = 1$

$\mathbf{A} = \mathrm{diag}(A_1, \ldots, A_K)$, $\mathbf{b}(i) = [b_1(i), \ldots, b_K(i)]^T$

$\tilde{\mathbf{n}}(i)$ คือ เวคเตอร์ของสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนที่สหสัมพันธ์กันหลังจากผ่านแมตช์ฟิลเตอร์ มีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์และเมตริกซ์ความแปรปรวนเท่ากับ $\sigma^2\mathbf{R}$

3. เครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายคนแบบวนซ้ำ

ในรูปที่ 1 แสดงโครงสร้างพื้นฐานของเครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายคนแบบวนซ้ำ ซึ่งมีลักษณะดังที่เสนอไว้ตามเอกสารอ้างอิง [3] มีองค์ประกอบสองส่วนหลัก คือ

- ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคน
- เซตของตัวถอดรหัสเทอร์โบสำหรับผู้ใช้คนเดียว

ส่วนแรก ดีเทกเตอร์สำหรับผู้ใช้หลายคนจะอาศัยวิธีการหักล้างสัญญาณแทรกสอดแบบซอฟต์อินพุตซอฟต์เอาต์พุต (SISO interference cancellation) โดยใช้ประโยชน์จากเอาต์พุตของวงจรแมตช์ฟิลเตอร์และค่าความน่าจะเป็นเบื้องแรก (priori probabilities) ของบิตสัญญาณมาช่วยในการประมาณค่าบิตสัญญาณ จากนั้นนำบิตสัญญาณที่ประมาณได้ไปคำนวณค่าสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้คนอื่น (multiple access interference : MAI) แล้วนำมาหักล้างออกจากสัญญาณรับที่ได้จากการส่งผ่านวงจรแมตช์ฟิลเตอร์ ทำให้ได้รับบิตสัญญาณที่ดีขึ้น เรียกสัญญาณรับที่ดีขึ้นนี้ว่า cleaner observation

$$\tilde{y}_k(i) = y_k(i) - \sum_{l=1, l\neq k}^{K} \rho_{k,l} A_l \hat{b}_l(i) \qquad (3)$$

โดย $\hat{b}_k(i)$ คือ บิตสัญญาณที่ได้จากตัวประมาณค่าบิตลำดับ i ของผู้ใช้คนที่ k

ส่วนที่สอง ตัวถอดรหัสเทอร์โบทำหน้าที่ถอดรหัสข้อมูลออกมาในรูปของความน่าจะเป็นหลัง (posteriori probabilities) ของบิตสัญญาณ และป้อนค่าความน่าจะเป็นดังกล่าวกลับไปให้ตัวประมาณค่าในรูปของค่าความน่าจะเป็นเบื้องแรก เพื่อปรับปรุงการประมาณค่าบิตสัญญาณ ($\hat{\mathbf{b}}$) ให้ดีขึ้น ลักษณะการทำงานพื้นฐานของตัวถอดรหัสเป็นแบบวนซ้ำ โดยมีการแลกเปลี่ยนข่าวสารเอกซ์ทรินซิกระหว่างตัวถอดรหัสย่อยทั้งสองตัว กระบวนการวนซ้ำจะทำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเกิดการลู่เข้า หรือครบจำนวนรอบสูงสุดที่กำหนดไว้ ในรอบสุดท้ายนั้นจะนำค่าความน่าจะเป็นหลังที่ได้จากตัวถอดรหัสเทอร์โบมาทำการตัดสินค่าบิต

สัญญาณ โดยอัลกอริทึม BCJR ที่เสนอในเอกสารอ้างอิง [5] ใช้สำหรับการคำนวณหาค่าความน่าเป็นจริงในตัวถอดรหัสเทอร์โบ

ตัวประมาณค่า (estimater) ทำหน้าที่ ประมาณค่าบิตสัญญาณเพื่อใช้ในการประมาณค่าสัญญาณแทรกสอดระหว่างผู้ใช้ การประมาณค่าบิตในที่นี้จะละค่าลำดับบิต โดยถือให้ทุกตัวแปรคิดที่บิตลำดับที่ i การประมาณค่าบิตสัญญาณสามารถคำนวณได้หลายวิธี ดังนี้

วิธีที่ 1 $\hat{b}_k = E[b_k \mid \mathbf{y}]$

เป็นวิธีที่ดีที่สุด (optimum) [3] เนื่องจากสัญญาณรับที่ได้จากการผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้ทุกคนมีความรู้ของบิตข่าวสาร b_k รวมอยู่ด้วย ดังนั้น ในการประมาณค่า $\hat{b}_k$ สามารถใช้ข่าวสารจากผู้ใช้ทุกคนมาเป็นความรู้ในการประมาณ โดย

$$\hat{b}_k = \tanh[(L_{channel}(b_k) + L_{priori}(b_k))/2] \qquad (4)$$

กำหนดให้

$$L_{channel}(b_k) = \log\frac{p(\mathbf{y} \mid b_k = +1)}{p(\mathbf{y} \mid b_k = -1)} \qquad (5)$$

$$L_{priori}(b_k) = \log\frac{P(b_k = +1)}{P(b_k = -1)} \qquad (6)$$

ความน่าเป็นจริงของช่องสัญญาณ ($L_{channel}$) ดังสมการ (5) สามารถคำนวณได้ โดยอาศัยแบบจำลองฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นของสัญญาณรบกวน คือ

$$p(\tilde{\mathbf{n}}) = \frac{|\Sigma|^{-1/2}}{(2\pi)^{K/2}}\exp[-\frac{1}{2}(\tilde{\mathbf{n}}^T \Sigma^{-1} \tilde{\mathbf{n}})] \qquad (7)$$

Σ คือ เมตริกซ์ความแปรปรวน (covariance matrix) เท่ากับ $\sigma^2\mathbf{R}$

กำหนดให้

$$B_k^+ = \left\{ \begin{array}{l} (b_1, \ldots, b_{k-1}, b_k = +1, b_{k+1}, \ldots, b_K) \\ \text{โดยที่ } b_l \in \{+1, -1\}, l \neq k \end{array} \right\} \qquad (8)$$

$$B_k^- = \left\{ \begin{array}{l} (b_1, \ldots, b_{k-1}, b_k = -1, b_{k+1}, \ldots, b_K) \\ \text{โดยที่ } b_l \in \{+1, -1\}, l \neq k \end{array} \right\} \qquad (9)$$

จากสมการที่ (7-9) จะได้

$$L_{channel}(b_k) = \log\frac{\sum_{\mathbf{b}\in B_k^+} p(\mathbf{y} \mid \mathbf{b}) \prod_{l=1, l\neq k}^{K} P(b_l)}{\sum_{\mathbf{b}\in B_k^-} p(\mathbf{y} \mid \mathbf{b}) \prod_{l=1, l\neq k}^{K} P(b_l)}$$

$$= \frac{2A_k b_k y_k}{\sigma^2} + \log\frac{\sum_{\mathbf{b}\in B_k^+} \exp\left[\frac{-\mathbf{b}^T \mathbf{ARAb}}{2\sigma^2}\right] \prod_{l=1, l\neq k}^{K} P(b_l) * \exp\left[\frac{A_l b_l y_l}{\sigma^2}\right]}{\sum_{\mathbf{b}\in B_k^-} \exp\left[\frac{-\mathbf{b}^T \mathbf{ARAb}}{2\sigma^2}\right] \prod_{l=1, l\neq k}^{K} P(b_l) * \exp\left[\frac{A_l b_l y_l}{\sigma^2}\right]} \qquad (10)$$

วิธีนี้เป็นวิธีที่ให้ผลดีที่สุด แต่การคำนวณค่าความน่าเป็นจริงของช่องสัญญาณมีความซับซ้อนสูง โดยมีค่าแปรตามฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียลของผู้ใช้ในระบบ ซึ่งเกิดจากพจน์ที่ 2 ทางด้านขวาของสมการเป็นหลัก ดังนั้นทำให้ไม่เหมาะสมจะนำไปใช้งาน

วิธีที่ 2 $\hat{b}_k = E[b_k \mid y_k]$

วิธีนี้ตามเอกสารอ้างอิง [3] เสนอขึ้นเพื่อลดความซับซ้อนของวิธีที่ 1 โดยการประมาณค่าบิตสัญญาณ $\hat{b}_k$ จะใช้ความรู้จากสัญญาณรับที่ได้จากการผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์เฉพาะผู้ใช้คนที่ k เท่านั้น ส่วนสัญญาณรับที่ได้จากการผ่านแมตซ์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนอื่น ๆ จะมองบิตสัญญาณของผู้ใช้คนที่ k เป็นสัญญาณรบกวน

การคำนวณค่าประมาณบิตสัญญาณสามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับวิธีที่ 1 นั่นคือ กำหนดให้ สมการที่ (4) คือ ค่าประมาณบิตสัญญาณของผู้ใช้ และ (6) คือ ค่าความน่าเป็นจริงเบื้องแรก ส่วนค่าความน่าเป็นจริงของช่องสัญญาณ คือ

$$L_{channel}(b_k) = \log\frac{p(y_k \mid b_k = +1)}{p(y_k \mid b_k = -1)} \qquad (11)$$

ดังนั้น ค่าความน่าเป็นจริงของช่องสัญญาณ คือ

$$L_{channel}(b_k) = 2y_k A_k / \sigma^2 \qquad (12)$$

วิธีนี้ การคำนวณค่าความน่าเป็นจริงของช่องสัญญาณมีความซับซ้อนลดลงมากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ 1 สังเกตุว่า พจน์ที่ 2 ทางด้านขวาของสมการ (10) ถูกตัดทิ้งไป ข้อเสียของวิธีนี้คือสามารถทำงานได้ดีเฉพาะเมื่อค่าสหสัมพันธ์ระหว่างโค้ดของผู้ใช้มีค่าน้อย ๆ ($\rho_{i,j} \leq 0.5$) เนื่องจากวิธีนี้จะมองค่าสัญญาณแทรกสอดระหว่างผู้ใช้เป็นเสมือน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญญาณรบกวน ดังนั้น เมื่อค่าสหสัมพันธ์เพิ่มขึ้น สัญญาณแทรกสอดระหว่างผู้ใช้ก็จะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้การประมาณค่าผิดพลาดมากขึ้น

วิธีที่ 3 $\hat{b}_k^t = E[b_k^t \mid y_k, \hat{b}_1^t, K, \hat{b}_{k-1}^t, \hat{b}_{k+1}^{t-1}, K, \hat{b}_K^{t-1}]$

โดย $\hat{b}_k^t$ คือ การประมาณค่าบิตของผู้ใช้คนที่ k ในรอบที่ t

วิธีนี้เป็นวิธีที่นำเสนอเพื่อปรับปรุงให้เครื่องรับสามารถทำงานได้ที่ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างโค้ดของผู้ใช้มีค่าต่าง ๆ โดยอาศัยหลักการทำงานการหักล้างสัญญาณแทรกสอดในเอกสารอ้างอิง [1] มาประยุกต์ใช้ ในการประมาณค่าบิตสัญญาณ $\hat{b}_k$ นั้นจะใช้ความรู้จากสัญญาณรับที่ได้จากการผ่านแมตช์ฟิลเตอร์เฉพาะผู้ใช้คนที่ k เช่นเดียวกับวิธีที่ 2 แต่เนื่องจากสัญญาณรับที่ได้จากผู้ใช้คนที่ k มีสัญญาณแทรกสอดจากผู้ใช้คนอื่นรบกวนอยู่ ซึ่งแทนที่จะมองสัญญาณรับที่ได้จากการผ่านแมตช์ฟิลเตอร์ของผู้ใช้คนอื่น ๆ เป็นสัญญาณรบกวนก็สามารถนำความรู้ในการประมาณค่ารอบที่แล้วมาหักล้างออกจากสัญญาณรับที่ได้ ทำให้น่าจะได้สัญญาณที่ดีขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำบิตสัญญาณที่ประมาณค่าในรอบปัจจุบันของผู้ใช้คนก่อนหน้ามาช่วยในการปรับปรุงการประมาณค่าสัญญาณแทรกสอด

การคำนวณค่าประมาณบิตสัญญาณสามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับวิธีที่ 1 และ 2 นั่นคือ กำหนดให้ สมการที่ (4) คือ ค่าประมาณบิตสัญญาณของผู้ใช้ และ (6) คือ ค่าความน่าเป็นจริงเบื้องแรก ส่วนค่าความน่าเป็นจริงของช่องสัญญาณ คือ

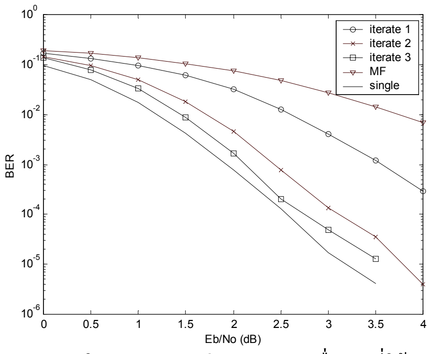
$$L_{channel}(b_k^t) = \log \frac{p(y_k \mid \hat{b}_1^t, K, \hat{b}_{k-1}^t, b_k^t = +1, \hat{b}_{k+1}^t, K, \hat{b}_K^t)}{p(y_k \mid \hat{b}_1^t, K, \hat{b}_{k-1}^t, b_k^t = -1, \hat{b}_{k+1}^t, K, \hat{b}_K^t)} \quad (13)$$

ช่องสัญญาณมีการรบกวนจากสัญญาณรบกวนเกาส์เซียนสีขาวแบบบวก ดังนั้น ค่าความน่าเป็นจริงของช่องสัญญาณ คือ

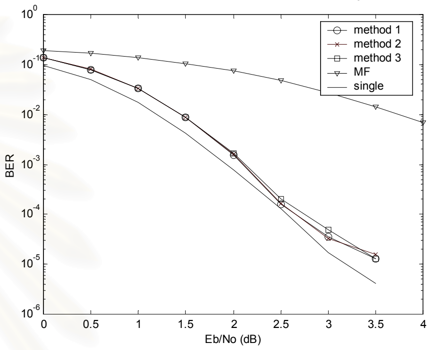
$$L_{channel}(b_k^t) = \frac{2}{\sigma^2} A_k \left(y_k - \sum_{i=1}^{k-1} \rho_{k,i} A_i \hat{b}_i^t - \sum_{i=k+1}^{K} \rho_{k,i} A_i \hat{b}_i^{t-1}\right) \quad (14)$$

4. ผลการจำลองระบบ

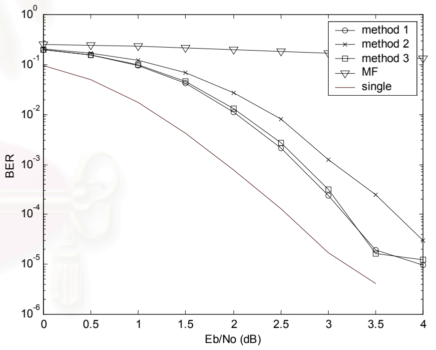
ในการทดสอบสมรรถนะของเครื่องรับแต่ละชนิด จะอาศัยแบบจำลองระบบที่มีคุณลักษณะเหมือนดังระบบในเอกสารอ้างอิง [3] กล่าวคือ ระบบซีดีเอ็มเอแบบซิงโครนัส ที่มีผู้ใช้จำนวน 4 คน ในส่วนของวงจรเข้ารหัสเทอร์โบประกอบด้วยชิฟต์รีจิสเตอร์ที่มีขนาดหน่วยความจำเท่ากับ 4 บิต เมตริกซ์ตัวกำเนิดที่ใช้ในการสร้างรหัส คือ 23_8 และ 35_8 อินเตอร์ลีฟเวอร์แบบสุ่ม มีขนาด 128 บิต แอมพลิจูดของผู้ใช้ทุกคนมีขนาดเท่ากันเท่ากับ 1 ทั้งนี้กำหนดให้จำนวนรอบของตัวถอดรหัสเทอร์โบเท่ากับ 3



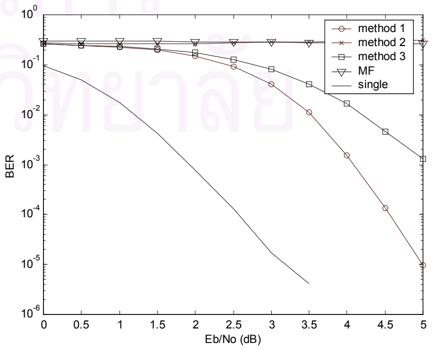
รูปที่ 2 สมรรถนะในการทำงานแต่ละรอบของเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าดังวิธีที่ 3 โดยค่าสหสัมพันธ์ระหว่างโค้ดของผู้ใช้เท่ากับ 0.3



รูปที่ 3 สมรรถนะของเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตตามวิธีต่าง ๆ โดยค่าสหสัมพันธ์ระหว่างโค้ดของผู้ใช้เท่ากับ 0.3



รูปที่ 4 สมรรถนะของเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตตามวิธีต่าง ๆ โดยค่าสหสัมพันธ์ระหว่างโค้ดของผู้ใช้เท่ากับ 0.5



รูปที่ 5 สมรรถนะของเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าบิตตามวิธีต่าง ๆ โดยค่าสหสัมพันธ์ระหว่างโค้ดของผู้ใช้เท่ากับ 0.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 2 แสดงสมรรถนะการทำงานของเครื่องรับแบบที่ใช้การประมาณค่าบิตตามวิธีที่นำเสนอ (วิธีที่ 3) ด้วยจำนวนรอบการวนซ้ำที่แตกต่างกัน 3 ค่า คือ 1, 2 และ 3 รอบ โดยเปรียบเทียบกับผลการทำงานของเครื่องรับแบบ MF คือ เครื่องรับที่ใช้แมตช์ฟิวเตอร์ตามด้วยตัวถอดรหัสเทอร์โบที่มีการวนซ้ำภายใน 9 รอบ และเครื่องรับแบบ single คือ เครื่องรับที่ระบบมีผู้ใช้เพียงรายเดียว จากรูปจะเห็นว่าในกรณีที่ให้เครื่องรับทำงานเพียงรอบเดียว (iterate 1) อัตราความผิดพลาดบิตของวิธีที่นำเสนอมีค่าที่ดีกว่าระบบที่ใช้เครื่องรับแบบ MF เมื่อเพิ่มจำนวนรอบการวนซ้ำขึ้นเป็น 2 และ 3 รอบ พบว่าสมรรถนะของระบบดีขึ้นตามลำดับ และมีแนวโน้มเข้าสู่สมรรถนะของระบบที่มีผู้ใช้รายเดียว

รูปที่ 3-5 แสดงผลการเปรียบเทียบสมรรถนะของเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าตามวิธีที่นำเสนอ (method 3) กับเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าตามวิธีที่ดีที่สุด (method 1) และเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าตามวิธีในเอกสารอ้างอิง [3] (method 2) การทำงานของเครื่องรับในแต่ละวิธีมีการวนซ้ำ 3 รอบ สำหรับกรณีของระบบที่โค้ดมีค่าสหสัมพันธ์แตกต่างกัน คือ 0.3, 0.5 และ 0.7 ตามลำดับ พิจารณารูปที่ 3 ซึ่งเป็นกรณีที่โค้ดมีค่าสหสัมพันธ์ไม่สูง จะเห็นว่าวิธีที่นำเสนอมีค่าอัตราความผิดพลาดบิตที่เทียบเท่ากับเครื่องรับที่อาศัยการประมาณค่าตามเอกสาร อ้างอิง [3] และมีค่าใกล้เคียงกับเครื่องรับที่ใช้การประมาณค่าตามวิธีที่ดีที่สุด โดยเครื่องรับทั้ง 3 แบบมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าเครื่องรับแบบ MF อย่างเห็นได้ชัด เมื่อพิจารณากรณีที่โค้ดของระบบมีค่าสหสัมพันธ์เพิ่มมากขึ้นเป็น 0.5 ดังรูปที่ 4 เครื่องรับตามเอกสารอ้างอิง [3] กลับให้สมรรถนะที่ด้อยลง ในขณะที่วิธีการประมาณแบบที่เสนอยังคงให้ผลใกล้เคียงกับเครื่องรับแบบใช้การประมาณค่าตามวิธีที่ดีที่สุด และเมื่อสหสัมพันธ์มีค่าสูงขึ้นเป็น 0.7 ซึ่งเป็นสภาวะที่ผู้ใช้แต่ละคนมีการรบกวนกันอย่างรุนแรง ค่าอัตราความผิดพลาดบิตของทุกวิธีแย่ลงเมื่อเทียบกับระบบที่มีผู้ใช้รายเดียว โดยเฉพาะวิธีการตามเอกสารอ้างอิง [3] ได้รับผลกระทบอย่างมาก ซึ่งให้สมรรถนะที่ไม่แตกต่างจากการใช้เครื่องรับแบบ MF ส่วนเครื่องรับที่นำเสนอยังคงให้อัตราความผิดพลาดบิตที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามผลที่ได้เริ่มแตกต่างจากค่าอัตราความผิดพลาดของเครื่องรับแบบใช้การประมาณค่าตามวิธีที่ดีที่สุดมากขึ้น

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการปรับปรุงสมรรถนะของเครื่องรับตามเอกสารอ้างอิง [3] โดยทำการดัดแปลงวิธีการประมาณค่าบิต ซึ่งอาศัยเทคนิคการหักล้างสัญญาณแทรกสอดตามเอกสารอ้างอิง [1] มาประยุกต์ใช้ โดยยังคงค่าความซับซ้อนในการคำนวณให้ไม่แตกต่างจากเดิม จากผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นว่าการประมาณค่าตามเอกสารอ้างอิง [3] ใช้ได้ดีเฉพาะกับระบบที่โค้ดมีสหสัมพันธ์ไม่สูงนัก ในขณะที่เครื่องรับที่ใช้การประมาณตามวิธีที่เสนอสามารถทำงานได้ในช่วงที่โค้ดมีสหสัมพันธ์กว้างขึ้น แต่เมื่อโค้ดมีสหสัมพันธ์เพิ่มขึ้น สมรรถนะในการทำงานก็จะลดลง และการทำงานของเครื่องรับที่นำเสนอแบบวนซ้ำสามารถเพิ่มสมรรถนะของระบบให้ดีขึ้นได้ โดยระบบจะมีค่าอัตราบิตดีขึ้นตามจำนวนรอบการวนซ้ำที่เพิ่มขึ้น

เอกสารอ้างอิง

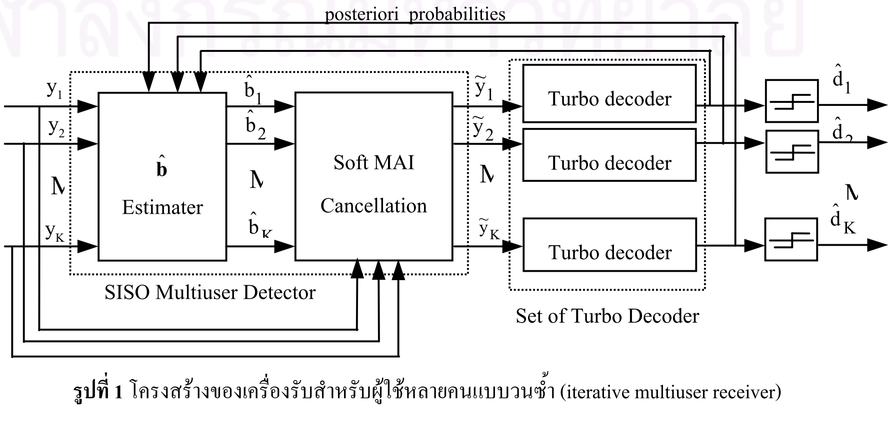
[1] X. Wang and H.V. Poor "Iterative (Turbo) Soft Interference Cancellation and Decoding for Coded CDMA" *IEEE Transaction on Communication* , Vol. 47, No.7, July, 1999, pp. 1046-1061.

[2] A.D. Damnjanovic and B.R. Vojcic "Iterative Multiuser Detection /Decoding for Turbo Coded CDMA Systems" *IEEE Communications Letters*, Vol. 5, No.3, March, 2001, pp. 104-106.

[3] Y. Zhang and R. S. Blum "Iterative Multiuser Detection for Turbo-Coded Synchronous CDMA in Gaussian and Non-Gaussian Impulsive Noise" *IEEE Transaction on Communications* , Vol. 49, No. 3, March, 2001, pp. 397-400.

[4] C. Berrou and R. S. Blum "Near Optimum Error Correcting Coding and Decoding : Turbo-Codes" *IEEE Transaction on Communications* , Vol. 44, No. 10, October, 1996, pp. 1261-1271.

[5] L. R. Bahl, J. Cocke, F. Jelinek and J. Raviv "Optimal Decoding of Linear Codes for Minimizing Symbol Error Rate" *IEEE Transaction on Information Theory* , Vol. IT-20, March, 1974, pp. 248-287.



รูปที่ 1 โครงสร้างของเครื่องรับสำหรับผู้ใช้หลายคนแบบวนซ้ำ (iterative multiuser receiver)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพัชรี เทพนิมิตร เกิดวันที่ 23 สิงหาคม พ.ศ.2521 ที่จังหวัดพัทลุง เข้ารับการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2539 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2543 ในระหว่างการศึกษาระดับมหาบัณฑิตนี้ ได้รับทุนอุนหนุนโครงการวิจัย หรือค้นคว้าเพื่อทำวิทยานิพนธ์จากบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย