


เทคนิคการปรับปรุงสมรรถนะของระบบ OFDM
โดยการเลือกอีควอไลเซอร์หรือเทคนิคการหักล้าง



นายทวีศักดิ์ สรรเพชดา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย


ปีการศึกษา 2546

ISBN: 974-17-4203-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 21565041

AN IMPROVEMENT TECHNIQUE FOR THE PERFORMANCE OF OFDM SYSTEM
BY SELECTING AN EQUALIZER OR CANCELING TECHNIQUE



Mr. Taweesak Sanpechuda

ศูนย์วิทยทรัพยากร
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 2003

ISBN: 974-17-4203-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เทคนิคการปรับปรุงสมรรถนะของระบบ OFDM โดยการเลือก
 อีควอไลเซอร์หรือเทคนิคการหักล้าง

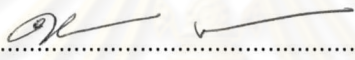
โดย นายทวีศักดิ์ สรรเพชดา

สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

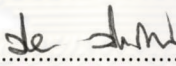
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. ลัญจนกร วุฒิสัทติกุลกิจ

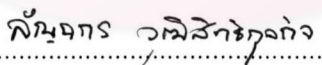
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ ดร.สุภาวดี อร่ามวิทย์

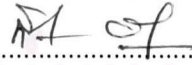
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวันยศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


.....ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ประสิทธิ์ ประพินมงคลการ)


.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจนกร วุฒิสัทติกุลกิจ)


.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ ดร.สุภาวดี อร่ามวิทย์)


.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย จิตะพันธ์กุล)

ทวีศักดิ์ สรรพพชดา : เทคนิคการปรับปรุงสมรรถนะของระบบ OFDM โดยการเลือกอีควอไลเซอร์หรือเทคนิคการหักล้าง. (AN IMPROVEMENT TECHNIQUE FOR THE PERFORMANCE OF OFDM SYSTEM BY SELECTING AN EQUALIZER OR CANCELING TECHNIQUE) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร.สุภาวดี อร่ามวิทย์, 91 หน้า. ISBN : 974-17-4203-7.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอเทคนิคการปรับปรุงสมรรถนะของระบบ OFDM ในสภาวะที่ช่องสัญญาณได้รับผลกระทบจากสัญญาณพหุวิถีที่มีการแจกแจงแบบเรย์ลี โดยอาศัยการผสมผสานข้อดีของอีควอไลเซอร์กับเทคนิคการหักล้าง จากการศึกษพบว่าสมรรถนะของอีควอไลเซอร์แบบ Zero-Forcing จะมีความสัมพันธ์กับจำนวนแท็ปของอีควอไลเซอร์และรูปแบบของเฟดดิ้งที่เกิดขึ้น เมื่อจำนวนแท็ปมากขึ้น อีควอไลเซอร์ก็มีความสามารถที่จะจัดการกับสภาวะเฟดดิ้งได้หลากหลายรูปแบบมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันความซับซ้อนของกระบวนการทำงานก็มากขึ้นเรื่อย ๆ ตามจำนวนแท็ปที่เพิ่มขึ้น ส่วนสมรรถนะของเทคนิคการหักล้างนั้นจากการศึกษาพบว่าสามารถแก้ปัญหาของสัญญาณพหุวิถีได้เป็นอย่างดีแต่มีการทำงานที่ซับซ้อนกว่าเนื่องมีการคำนวณในระดับบิตหลายขั้นตอน ความซับซ้อนของเทคนิคการหักล้างนี้จะคงที่ในระดับหนึ่งและไม่ขึ้นกับสภาวะเฟดดิ้ง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำอีควอไลเซอร์และเทคนิคการหักล้างมาผสมผสานกัน ระบบที่นำเสนอนี้จะใช้อีควอไลเซอร์ซึ่งมีจำนวนแท็ปน้อยเพื่อให้มีความซับซ้อนต่ำ โดยรูปแบบของเฟดดิ้งที่อีควอไลเซอร์ไม่สามารถจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะถูกส่งไปให้เทคนิคการหักล้างจัดการแทน การผสมผสานเช่นนี้จะทำให้ระบบโดยรวมสามารถรับมือกับสภาวะเฟดดิ้งรูปแบบต่าง ๆ ได้โดยมีการทำงานที่ไม่ซับซ้อนเกินความจำเป็น ทั้งนี้สมรรถนะและความซับซ้อนโดยรวมของระบบจะขึ้นอยู่กับค่าการตัดสินใจที่เป็นตัวกำหนดว่า สภาวะเฟดดิ้งใดจะให้เทคนิคใดจัดการซึ่งค่าการตัดสินใจในงานวิจัยนี้มีทั้งแบบที่เป็นค่าคงที่ และแบบที่ผันแปรได้เมื่อระบบไม่มีการควบคุมระดับพลังงาน

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้า ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ลัญจกร วุฒิสัทติกุลกิจ
 ปีการศึกษา 2546 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ส.อ. ส.

4370311021 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING

KEY WORD: OFDM / ORTHOGONAL / MULTIPLEXING / DIVISION / EQUALIZER / CANCELING

TAWEESAK SANPECHUDA : AN IMPROVEMENT TECHNIQUE FOR THE PERFORMANCE OF OFDM SYSTEM BY SELECTING AN EQUALIZER OR CANCELING TECHNIQUE. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF.LUNCHAKORN WUTTISITTIKULKIJ, Ph.D., THESIS CO-ADVISOR: SUPAVADEE ARAMVITH, Ph.D., 91 pp. ISBN : 974-17-4203-7.

This thesis proposes a technique to improve the performance of OFDM system over a multipath channel with independent Rayleigh distribution by using a combination of equalizer and canceling technique. Base on the study, it is found that the performance of zero-forcing equalizer is related to the number of tabs and fading characteristics. When using higher number of tabs, the equalizer can combat the effects of fading in various degrees and situations. However, the complexity of system will be increased with number of tabs. When applied canceling technique, it can help solving the problems of multipath fading but with higher degree of complexity due to extensive calculation in bit level. Nevertheless, the complexity incurred does not depend on fading characteristics. To take advantages of both techniques, the method of combining equalizer and canceling techniques has been proposed. By using few tabs equalizer to reduce complexity and using canceling technique, the proposed technique can handle extensive range fading characteristics with low complexity. The performance and complexity of proposed technique depends on both constant and adaptive decision value which are selected based on types of fading. The decision value in this thesis could be both constant and variable by power of received signal.

Department Electrical Engineering Student's signature

Field of study Electrical Engineering Advisor's signature *ลัญจกร ลุนชากอร์น*

Academic year 2003 Co-advisor's signature *ศ.ดร. สุพาเวดี อารามวิท*

กิตติกรรมประกาศ

การดำเนินการวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีของอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ลัญจกร วุฒิสิริกุลกิจ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ดร.สุภาวดี อร่ามวิทย์ ที่กรุณาให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะในการวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดาที่ให้การสนับสนุนผู้วิจัยในทุก ๆ ด้าน และขอบคุณเพื่อน ๆ นิสิตทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือในการทำกรวิจัย จนกระทั่งสำเร็จเป็นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ทวีศักดิ์ สรรเพชดา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญรูป..... | ฎ |
| บัญชีคำศัพท์..... | ท |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาของ OFDM..... | 1 |
| 1.2 แนวทางของงานวิจัย..... | 2 |
| 1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... | 3 |
| 1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์..... | 3 |
| 1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน..... | 3 |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| 2 ภาคส่ง..... | 5 |
| 2.1 บทนำ..... | 5 |
| 2.2 การสร้างคลื่นพาย้อยโดยใช้ IFFT..... | 5 |
| 2.3 เวลาคุม (guard time) และ Cyclic Extension..... | 9 |
| 2.4 กระบวนการสร้างสัญญาณ OFDM ที่ภาคส่ง..... | 11 |
| 3 ช่องสัญญาณ..... | 13 |
| 3.1 บทนำ..... | 13 |
| 3.2 เฟดดิ้ง (fading)..... | 13 |
| 3.3 ปัจจัยที่ทำให้เกิดเฟดดิ้ง..... | 13 |
| 3.3.1 การแผ่แบบประวิงเวลา (delay spread)..... | 13 |

สารบัญ (ต่อ)

| บทที่ | หน้า |
|--|------|
| 3.3.1.1 เฟดดิ้งแบบเรียบ (flat fading)..... | 14 |
| 3.3.1.2 เฟดดิ้งแบบเลือกความถี่ (frequency selective fading)..... | 15 |
| 3.3.2 การแผ่แบบดอปเปลอร์ (Doppler spread)..... | 16 |
| 3.3.2.1 เฟดดิ้งแบบเร็ว (fast fading)..... | 17 |
| 3.3.2.2 เฟดดิ้งแบบช้า (slow fading)..... | 18 |
| 3.4 แบบจำลองต่าง ๆ ของช่องสัญญาณที่ใช้ในงานวิจัย..... | 18 |
| 3.4.1 ช่องสัญญาณที่มีผลตอบสนองคงที่..... | 18 |
| 3.4.2 ช่องสัญญาณที่มีการแจกแจงแบบเรย์ลี..... | 20 |
| 3.5 การจำลองช่องสัญญาณโดยใช้แบบจำลองของ Jakes..... | 22 |
| 3.6 ผลที่ได้จากการจำลองช่องสัญญาณแบบ Jakes..... | 24 |
| 4 ภาครับ..... | 27 |
| 4.1 บทนำ..... | 27 |
| 4.2 การดีมอดูเลตสัญญาณที่ภาครับ..... | 27 |
| 4.3 การจัดเฟรมสัญญาณที่ภาครับ..... | 28 |
| 4.4 สัญลักษณ์นำ (pilot symbol) กับการประมาณค่าเฟดดิ้ง..... | 29 |
| 4.5 กระบวนการหักล้าง..... | 30 |
| 4.6 อีควอลไลเซชัน (Equalization)..... | 33 |
| 4.7 โครงสร้างพื้นฐานของอีควอลไลเซอร์..... | 33 |
| 4.8 อีควอลไลเซอร์แบบ Zero-Forcing..... | 34 |
| 5 การทดสอบระบบทั่วไป..... | 39 |
| 5.1 บทนำ..... | 39 |
| 5.2 การจำลองการส่งสัญญาณในระบบ OFDM ด้วย IFFT..... | 39 |
| 5.3 การรบกวนทางความถี่ (ICI) และการทดสอบ..... | 42 |
| 5.4 การรบกวนทางสัญลักษณ์ (ISI)..... | 43 |
| 5.5 OFDM ซึ่งใช้กระบวนการหักล้าง..... | 46 |

สารบัญ (ต่อ)

| บทที่ | หน้า |
|---|------|
| 5.5.1 การวิเคราะห์ผลของช่องสัญญาณคงที่..... | 46 |
| 5.5.2 การวิเคราะห์ผลของช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเรย์ลี 2 เส้นทาง..... | 50 |
| 5.6 OFDM ซึ่งใช้อีควอลไลเซอร์..... | 55 |
| 5.6.1 การวิเคราะห์ผลของช่องสัญญาณคงที่..... | 55 |
| 5.6.2 การวิเคราะห์ผลของช่องสัญญาณที่มีเฟดดิ้งแบบเรย์ลี..... | 59 |
| 6 ระบบที่เสนอ..... | 62 |
| 6.1 บทนำ..... | 62 |
| 6.2 แนวคิดของระบบที่นำเสนอ..... | 62 |
| 6.3 โครงสร้างของระบบที่นำเสนอ..... | 63 |
| 6.4 การหาค่าเฟดดิ้งและเวลาที่ประวิงไป..... | 65 |
| 6.5 วิธีหาค่าเฟดดิ้งและเวลาที่ประวิงไป..... | 69 |
| 6.6 การคำนวณค่าประสิทธิภาพของอีควอลไลเซอร์..... | 73 |
| 7 การทดสอบและวิเคราะห์ระบบที่นำเสนอ..... | 75 |
| 7.1 บทนำ..... | 75 |
| 7.2 ประสิทธิภาพระบบอีควอลไลเซอร์เทียบกับระบบไฮบริด..... | 75 |
| 7.3 ค่าการตัดสินใจ..... | 78 |
| 7.4 สัดส่วนการทำงานของกระบวนการหักล้าง..... | 79 |
| 7.5 ประสิทธิภาพของไฮบริดอีควอลไลเซอร์ที่แต่ละค่าพลังงาน และไฮบริดอีควอลไลเซอร์แบบปรับค่าได้..... | 81 |
| 7.6 สรุปผลการทดสอบ..... | 86 |
| 8 บทสรุปและข้อเสนอแนะ..... | 87 |
| 8.1 บทสรุป..... | 87 |
| 8.2 ข้อเสนอแนะและหัวข้อที่สามารถทำการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมในอนาคต..... | 88 |
| รายการอ้างอิง..... | 89 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 91 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|--------------|--|
| ตารางที่ 2.1 | ค่าสัญญาณ OFDM ในโดเมนเวลากับโดเมนความถี่.....8 |
| ตารางที่ 7.1 | ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นตามค่าการตัดสินใจของไฮบริดอีควอลไลเซอร์ ที่ค่าพลังงานต่าง ๆ ของสัญญาณ OFDM ที่ใช้คลื่นพาห้อย่อย 32 ชุด.....82 |
| ตารางที่ 7.2 | ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นตามค่าการตัดสินใจของไฮบริดอีควอลไลเซอร์ ที่ค่าพลังงานต่าง ๆ ของสัญญาณ OFDM ที่ใช้คลื่นพาห้อย่อย 128 ชุด.....85 |



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

| | | |
|-------------|---|----|
| รูปที่ 2.1 | วิธีการสร้างสัญญาณ OFDM..... | 6 |
| รูปที่ 2.2 | ตัวอย่างสัญญาณ OFDM แยกให้เห็นเป็นคลื่นพหุคูณจำนวน 4 ชุด..... | 7 |
| รูปที่ 2.3 | สัญญาณ OFDM แบบอินเฟสและควอดเรเจอร์เฟสในโดเมนเวลา..... | 9 |
| รูปที่ 2.4 | การเกิดการรบกวนแบบ ICI ที่เกิดจากการประวิง..... | 10 |
| รูปที่ 2.5 | การรบกวนแบบ ICI ถูกป้องกันได้ด้วยเวลาคุมแบบ Cyclic Extension..... | 10 |
| รูปที่ 2.6 | วิธีการที่เวลาคุมป้องกันการเกิด ICI..... | 11 |
| รูปที่ 2.7 | บล็อกไดอะแกรมแสดงกระบวนการสร้างสัญญาณ OFDM..... | 12 |
| รูปที่ 3.1 | ช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเรียบ..... | 15 |
| รูปที่ 3.2 | ช่องสัญญาณเฟดดิ้งแบบเลือกความถี่..... | 16 |
| รูปที่ 3.3 | รูปแบบของคุณลักษณะของเฟดดิ้งแบบต่าง ๆ..... | 19 |
| รูปที่ 3.4 | ผลตอบสนองของช่องสัญญาณแบบคงที่..... | 20 |
| รูปที่ 3.5 | แบบจำลองการคำนวณเฟดดิ้งแบบเรย์ลี..... | 20 |
| รูปที่ 3.6 | แบบจำลองช่องสัญญาณของ Jakes..... | 23 |
| รูปที่ 3.7 | อัตราขยายของเฟดดิ้งแบบเรียบที่ค่าดอปเปลอร์สูงสุดเท่ากับ 10 40 และ 320..... | 24 |
| รูปที่ 3.8 | เฟสของอัตราขยายเฟดดิ้งแบบเรียบที่ค่าดอปเปลอร์สูงสุดเท่ากับ 10 40 และ 320..... | 25 |
| รูปที่ 3.9 | อีสโตรแกรมของอัตราขยายของเฟดดิ้งแบบเรียบที่ค่าดอปเปลอร์สูงสุดเท่ากับ 40..... | 26 |
| รูปที่ 3.10 | อีสโตรแกรมของเฟสของเฟดดิ้งแบบเรียบที่ค่าดอปเปลอร์สูงสุดเท่ากับ 40..... | 26 |
| รูปที่ 4.1 | การจัดเฟรมของสัญญาณที่ภาครับซึ่งมี 2 คลื่นพหุคูณ และมีเวลาคุม 2 บิต..... | 29 |
| รูปที่ 4.2 | เฟดดิ้งของสัญญาณทั้ง 2 เส้นทางโดยเฟดดิ้งของเส้นทางแรกมากกว่า และเฟดดิ้งของเส้นทางรองมากกว่า..... | 31 |
| รูปที่ 4.3 | หลักการทำงานของกระบวนการหักล้าง..... | 32 |
| รูปที่ 4.4 | โครงสร้างของอีควอไลเซอร์..... | 34 |
| รูปที่ 4.5 | โครงสร้างของอีควอไลเซอร์ซึ่งมี 2 แทป..... | 37 |
| รูปที่ 5.1 | สัญญาณ OFDM ซึ่งแยกให้เห็นเป็นคลื่นพหุคูณ 3 ชุด..... | 40 |
| รูปที่ 5.2 | รูปร่างของสัญญาณที่ค่าสัญลักษณ์ต่าง ๆ..... | 40 |
| รูปที่ 5.3 | ตัวอย่างของสัญญาณในโดเมนความถี่ และโดเมนเวลา..... | 41 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | | หน้า |
|-------------|--|------|
| รูปที่ 5.4 | ตัวอย่างสัญญาณ OFDM ในโดเมนเวลา..... | 42 |
| รูปที่ 5.5 | เปรียบเทียบรูปร่างของสัญญาณที่ประวิงไปน้อยและมากกว่าเวลาคุม..... | 43 |
| รูปที่ 5.6 | การเกิดพหุวัตินในสัญญาณ OFDM..... | 44 |
| รูปที่ 5.7 | คาบสัญญาณที่แตกต่างกันในแต่ละคลื่นพหุวัติน..... | 45 |
| รูปที่ 5.8 | BER ของระบบซึ่งใช้การหักล้างโดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 1:9..... | 47 |
| รูปที่ 5.9 | BER ของระบบซึ่งใช้การหักล้างโดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 3:7..... | 48 |
| รูปที่ 5.10 | BER ของระบบซึ่งใช้การหักล้างโดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 5:5..... | 49 |
| รูปที่ 5.11 | BER ของระบบซึ่งใช้การหักล้างโดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 7:3..... | 49 |
| รูปที่ 5.12 | BER ของระบบซึ่งใช้การหักล้างโดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 9:1..... | 50 |
| รูปที่ 5.13 | BER ของระบบซึ่งใช้การหักล้างในช่องสัญญาณเรย์ลี $f_{d\max} = 1$ | 51 |
| รูปที่ 5.14 | การประมาณค่าเฟดดิ้งผิดพลาดในช่องสัญญาณเรย์ลี $f_{d\max} = 1$ | 51 |
| รูปที่ 5.15 | BER ของระบบซึ่งใช้การหักล้างในช่องสัญญาณเรย์ลี $f_{d\max} = 10$ | 52 |
| รูปที่ 5.16 | การประมาณค่าเฟดดิ้งผิดพลาดในช่องสัญญาณเรย์ลี $f_{d\max} = 10$ | 53 |
| รูปที่ 5.17 | BER ของระบบซึ่งใช้การหักล้างในช่องสัญญาณเรย์ลี $f_{d\max} = 40$ | 54 |
| รูปที่ 5.18 | การประมาณค่าเฟดดิ้งผิดพลาดในช่องสัญญาณเรย์ลี $f_{d\max} = 40$ | 55 |
| รูปที่ 5.19 | BER ของระบบซึ่งใช้อีควอลไลเซอร์โดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 1:9..... | 56 |
| รูปที่ 5.20 | BER ของระบบซึ่งใช้อีควอลไลเซอร์โดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 3:7..... | 57 |
| รูปที่ 5.21 | BER ของระบบซึ่งใช้อีควอลไลเซอร์โดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 5:5..... | 57 |
| รูปที่ 5.22 | BER ของระบบซึ่งใช้อีควอลไลเซอร์โดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 7:3..... | 58 |
| รูปที่ 5.23 | BER ของระบบซึ่งใช้อีควอลไลเซอร์โดยช่องสัญญาณมีอัตราส่วนเชิงขนาดเป็น 9:1..... | 58 |
| รูปที่ 5.24 | BER ของระบบซึ่งใช้อีควอลไลเซอร์ 20 แท็บในช่องสัญญาณเรย์ลี..... | 59 |
| รูปที่ 5.25 | BER ของระบบซึ่งใช้อีควอลไลเซอร์ 60 แท็บในช่องสัญญาณเรย์ลี | 60 |
| รูปที่ 5.26 | สมรรถนะของอีควอลไลเซอร์เทียบกับจำนวนแท็บที่ค่าพลังงานระดับต่าง ๆ..... | 61 |
| รูปที่ 6.1 | สัญญาณถูกปรับแต่งโดยอีควอลไลเซอร์ก่อนผ่านการแปลงฟูริเยร์..... | 64 |
| รูปที่ 6.2 | โครงสร้างของไฮบริดอีควอลไลเซอร์..... | 64 |
| รูปที่ 6.3 | การแทรกสัญญาณลักษณะนำลงในเฟรมสัญญาณ..... | 65 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| | หน้า |
|-------------|--|
| รูปที่ 6.4 | เฟรมข้อมูลเมื่อแยกเป็นส่วนของสัญลักษณ์นำและสัญลักษณ์ข้อมูล.....68 |
| รูปที่ 6.5 | รูปร่างของสัญญาณส่วนที่เป็นสัญลักษณ์นำในโดเมนเวลา.....69 |
| รูปที่ 7.1 | BER ของสัญญาณ OFDM (32 sub) ซึ่งใช้อีควอลไลเซอร์ธรรมดา.....76 |
| รูปที่ 7.2 | BER ของสัญญาณ OFDM (128 sub) ซึ่งใช้อีควอลไลเซอร์ธรรมดา.....77 |
| รูปที่ 7.3 | BER ของสัญญาณ OFDM ซึ่งใช้ไฮบริดอีควอลไลเซอร์ที่ค่าการตัดสั่นใจ 0.9.....77 |
| รูปที่ 7.4 | BER ของสัญญาณ OFDM ซึ่งใช้ระบบจัดสรรการทำงานที่ค่าการตัดสั่นใจ 0.95.....78 |
| รูปที่ 7.5 | BER ของสัญญาณ OFDM (32 sub) ซึ่งใช้ระบบจัดสรรการทำงาน.....79 |
| รูปที่ 7.6 | BER ของสัญญาณ OFDM (128 sub) ซึ่งใช้ระบบจัดสรรการทำงาน.....80 |
| รูปที่ 7.7 | ฮิสโตแกรมแสดงการแจกแจงของค่าประสิทธิภาพของอีควอลไลเซอร์.....80 |
| รูปที่ 7.8 | สัดส่วนการทำงานของกระบวนการหักล้างที่ค่าการตัดสั่นใจต่าง ๆ.....81 |
| รูปที่ 7.9 | BER ของสัญญาณ OFDM (32 sub) ซึ่งใช้ระบบจัดสรรการทำงานแบบปรับค่าได้.....83 |
| รูปที่ 7.10 | สัดส่วนการทำงานของกระบวนการหักล้างที่ค่าพลังงานต่าง ๆ.....84 |
| รูปที่ 7.11 | BER ของสัญญาณ OFDM (128 sub) ซึ่งใช้ระบบจัดสรรการทำงานแบบปรับค่าได้.....86 |

บัญชีคำศัพท์

| | |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| กระบวนการสุ่มแบบเกาส์เซียน | Gaussian random process |
| การเข้ารหัส | coding |
| การไขว้แทรก | crosstalk |
| การแจกแจงแบบเรย์ลี | Rayleigh distribution |
| การซ้อนทับ | overlapping |
| การแทรกสอดระหว่างความถี่ | intercarrier interference |
| การแทรกสอดระหว่างสัญลักษณ์ | intersymbol interference |
| การแปลงฟูริเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง | discrete fourier transform |
| การแปลงฟูริเยร์ผกผันแบบไม่ต่อเนื่อง | inverse discrete fourier transform |
| การแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว | inverse fast fourier transform |
| การเลื่อนความถี่ | doppler shift |
| การวางสลับ | interleaving |
| การแผ่ทางเวลา | time spread |
| การแผ่แบบดอปเปลอร์ | doppler spread |
| การแผ่แบบประวิงเวลา | delay spread |
| ข้อมูลอนุกรม | serial data |
| ข้อมูลขนาน | parallel data |
| คุณลักษณะเชิงสเปกตรัม | spectral characteristic |
| คุณสมบัติตั้งฉาก | orthogonal |
| คลื่นพหุวิถี | multipath wave |
| ความไว | sensitive |
| โคฮีเรนซ์แบนด์วิดท์ | coherence bandwidth |
| ชุดลำดับการฝึก | training sequence |
| ช่องสัญญาณแถบกว้าง | wideband channels |
| ช่องสัญญาณแถบแคบ | narrowband channels |
| ช่องสัญญาณแอมพลิจูดแบบผันแปร | amplitude varying channels |
| โดเมนความถี่ | frequency domain |

บัญชีคำศัพท์ (ต่อ)

| | |
|----------------------------------|----------------------------|
| โดเมนเวลา | time domain |
| เบิร์สต์ | burst |
| แบนด์วิดท์ | bandwidth |
| เฟดดิ้งแบบช้า | slow fading |
| เฟดดิ้งแบบเร็ว | fast fading |
| เฟดดิ้งแบบเรียบ | flat fading |
| เฟดดิ้งแบบเลือกความถี่ | frequency selective fading |
| ลักษณะของช่องสัญญาณ | channel characteristic |
| เวลาคูม | guard time |
| สัญลักษณ์ข้อมูล | data symbol |
| สัญลักษณ์นำ | pilot symbol |
| สัญลักษณ์ที่รู้ค่า | known symbol |
| ออสซิลเลเตอร์ความถี่ต่ำ | low frequency oscillator |
| อีควอลไลเซอร์ | equalizer |
| ไฮบริดอีควอลไลเซอร์ | hybrid equalizer |
| ไฮบริดอีควอลไลเซอร์แบบปรับค่าได้ | adaptive hybrid equalizer |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย