

สารบัญ

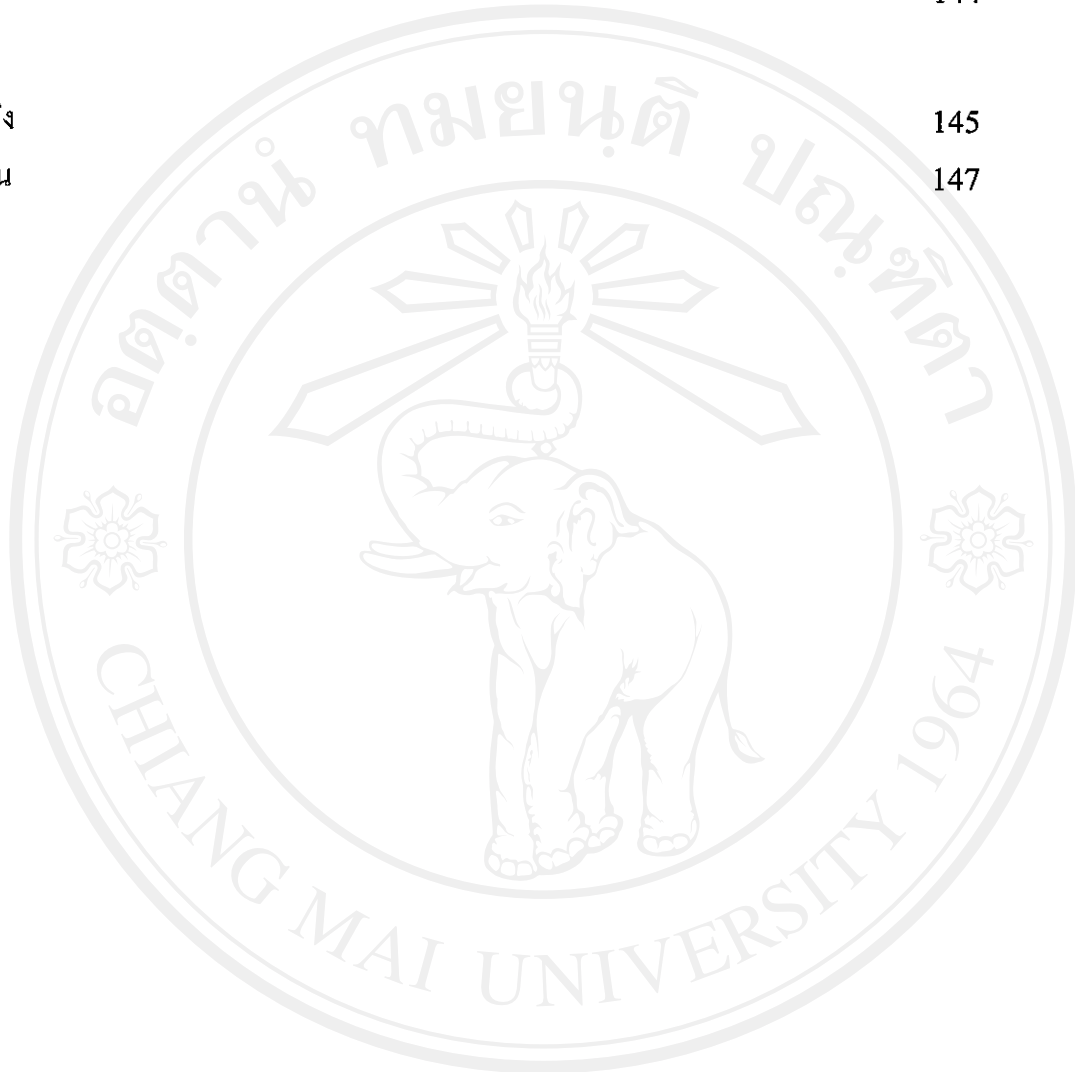
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ฐ
 บทที่ 1 บทนำ	 1
1.1 ปัญหาและที่มาของโครงการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการทำวิจัย	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาเชิงอัลกอริทึมและเชิงประยุกต์	4
1.5 ผลงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง	5
 บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงการวิจัย	 6
2.1 ลักษณะของปัญหาและความรู้พื้นฐาน	6
2.2 อัลกอริทึมชาโด	12
2.3 อัลกอริทึมเจนเนอเรตไลส์ชาโด	13
2.4 อัลกอริทึมรีคิวคอนสเทลเลชัน	14
2.5 อัลกอริทึมคอนสแตนต์มอดคูลัส	16
2.6 อัลกอริทึมมัลติมอดคูลัส	20
2.7 อัลกอริทึมสแควคอนทัวร์	24

	หน้า
บทที่ 3 อัลกอริทึมที่นำเสนอ : อัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์	27
3.1 ความรู้พื้นฐานของสมการวงรี	27
3.2 ที่มาของอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์	28
3.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์	37
3.4 อัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์กับความหมายของค่ายกกำลัง p	41
บทที่ 4 อัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟไซลูท	54
4.1 อัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟไซลูท	54
4.2 ค่าคงที่ของอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟไซลูท	57
4.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดอินเตอร์ซิมโบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ของอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟไซลูท	58
4.3.1 รูปแบบการทดสอบประสิทธิภาพ	58
4.3.2 ผลการทดลองที่ได้จากลักษณะสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM	60
4.3.3 ผลการทดลองที่ได้จากลักษณะสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM	63
4.3.4 ผลการทดลองที่ได้จากลักษณะสัญญาณข้อมูลแบบ 256-QAM	63
4.3.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟไซลูทและอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์ที่ค่ายกกำลัง $p=2$	67
4.3.6 สรุปผลการทดสอบความสามารถในการกำจัดอินเตอร์ซิมโบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์	69
4.4 การวิเคราะห์อัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟไซลูทเมื่อเข้าสู่ระดับคงที่	70
4.4.1 การผลทดสอบประสิทธิภาพค่าเฉลี่ยของกำลังสองของผิดพลาด ณ ระดับคงที่	82
4.4.2 สรุปการทดสอบค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาด ณ ระดับคงที่	86
4.5 การทดสอบประสิทธิภาพค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาดของเฟสสำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟไซลูท	86
4.5.1 สรุปการทดสอบค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาดของเฟส	93
4.6 สรุปผลประสิทธิภาพของอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟไซลูท	93

	หน้า
บทที่ 5 อัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบ โมดิฟาย	95
5.1 อัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบ โมดิฟาย	95
5.2 ค่าคงที่ของอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบ โมดิฟาย	97
5.3 ผลการทดสอบประสิทธิภาพในการกำจัดอินเทอร์ซึม โบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ ของอัลกอริทึม ดับเบิลอีลิปส์แบบ โมดิฟาย	101
5.3.1 รูปแบบการทดสอบประสิทธิภาพ	101
5.3.1.1 ผลการทดลองที่ได้จากลักษณะสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM	101
5.3.1.2 ผลการทดลองที่ได้จากลักษณะสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM	106
5.3.1.3 ผลการทดลองที่ได้จากลักษณะสัญญาณข้อมูลแบบ 256-QAM	110
5.3.2 สรุปผลการทดสอบความสามารถในการกำจัดอินเทอร์ซึม โบล อินเตอร์เฟียร์เรนซ์	112
5.4 การวิเคราะห์อัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบ โมดิฟายเมื่อเข้าสู่ระดับคงที่	116
5.4.1 การผลทดสอบประสิทธิภาพค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาด ณ ระดับคงที่	122
5.4.2 สรุปการทดสอบค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาด ณ ระดับคงที่	127
5.5 การทดสอบประสิทธิภาพค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาดของเฟส สำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบ โมดิฟาย	127
5.5.1 สรุปการทดสอบค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาดของเฟส	133
5.6 สรุปผลประสิทธิภาพของอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบ โมดิฟาย	134
บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ	138
6.1 สรุปผลงานวิจัย	138
6.1.1 ความสามารถในการกำจัดค่าอินเทอร์ซึม โบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ที่เกิดจาก ช่องสัญญาณ	138
6.1.1.1 ความสามารถในการกำจัดอินเทอร์ซึม โบลอินเตอร์เฟียร์เรนบน สัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM	138
6.1.1.2 วามสามารถในการกำจัดอินเทอร์ซึม โบลอินเตอร์เฟียร์เรนบน	139

สัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM	
6.1.1.3 ความสามารถในการกำจัดอินเตอร์ซิม โบลิอินเตอร์เฟอร์เรนบน	139
สัญญาณข้อมูลแบบ 256-QAM	
6.1.2 การคำนวณค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาดของอินเตอร์ซิม	140
โบลิอินเตอร์เฟอร์เรนที่เมื่อเข้าสู่ระดับคงที่	
6.1.3 ความสามารถในการลดระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาด	140
ของเฟส	
6.1.3.1 จำนวนของข้อมูลที่ต้องในการลดระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสอง	141
ของความผิดพลาดของเฟส	
6.1.3.1.1 จำนวนของข้อมูลที่ต้องในการลดระดับค่าเฉลี่ยของ	141
กำลังสองของความผิดพลาดของเฟส สำหรับข้อมูล	
สัญญาณแบบ 16-QAM	
6.1.3.1.2 จำนวนของข้อมูลที่ต้องในการลดระดับค่าเฉลี่ยของ	141
กำลังสองของความผิดพลาดของเฟส สำหรับข้อมูล	
สัญญาณแบบ 64-QAM	
6.1.3.2 เปรียบเทียบความสามารถในการลดระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสอง	141
ของความผิดพลาดของเฟส ระหว่างอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์กับ	
อัลกอริทึมรีคิวคอนสเทลเลชัน	
6.1.3.2.1 เปรียบเทียบความสามารถในการลดระดับค่าเฉลี่ยของ	142
กำลังสองของความผิดพลาดของเฟส สำหรับข้อมูล	
สัญญาณแบบ 16-QAM	
6.1.3.2.2 เปรียบเทียบความสามารถในการลดระดับค่าเฉลี่ยของ	142
กำลังสองของความผิดพลาดของเฟส สำหรับข้อมูล	
สัญญาณแบบ 64-QAM	
6.1.4 ผลของอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองต่อความสามารถของ	143
อัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์	
6.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัย	143

	หน้า
6.3 ข้อเสนอแนะ	144
เอกสารอ้างอิง	145
ประวัติผู้เขียน	147



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright© by Chiang Mai University
 All rights reserved

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าประมาณของ R_1 และ R_2 สำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูท	57
4.2 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนของจำนวนข้อมูลที่ต้องการเพื่อที่จะเข้าถึงระดับ -24 dB บนข้อมูลสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM สำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูท	69
4.3 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนของจำนวนข้อมูลที่ต้องการเพื่อที่จะเข้าถึงระดับ -24 dB บนข้อมูลสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM สำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูท	70
4.4 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนของจำนวนข้อมูลที่ต้องการเพื่อที่จะเข้าถึงระดับ -24 dB บนข้อมูลสัญญาณข้อมูลแบบ 256-QAM สำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูท	70
4.5 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนของจำนวนข้อมูลที่ต้องการเพื่อที่จะเข้าถึงระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาดของเฟส เท่ากับ -1.8 ที่ระดับอินเตอร์ซิมโบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์เท่ากับ -24 dB สำหรับอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองต่างๆ บนข้อมูลสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM สำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูท	89
4.6 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนของจำนวนข้อมูลที่ต้องการเพื่อที่จะเข้าถึงระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาดของเฟส เท่ากับ -1.63 ที่ระดับอินเตอร์ซิมโบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์เท่ากับ -24 dB สำหรับอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองต่างๆ บนข้อมูลสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM สำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูท	89
5.1 ค่าคงที่ R_1 และ R_2 สำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบโมดิฟาย	99
5.2 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนของจำนวนข้อมูลที่ต้องการเพื่อที่จะเข้าถึงระดับ -24 dB สำหรับอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองต่างๆ บนข้อมูลสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM สำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบโมดิฟาย	113

ตารางที่	หน้า
5.3 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนของจำนวนข้อมูลที่ต้องการเพื่อที่จะเข้าถึงระดับ -24 dB สำหรับอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองต่างๆ บนข้อมูลสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM สำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบ โมดิฟาย	114
5.4 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนของจำนวนข้อมูลที่ต้องการเพื่อที่จะเข้าถึงระดับ -24 dB สำหรับอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองต่างๆ บนข้อมูลสัญญาณข้อมูลแบบ 256-QAM สำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบ โมดิฟาย	115
5.5 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนของจำนวนข้อมูลที่ต้องการเพื่อที่จะเข้าถึงระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาดของเฟส เท่ากับ -1.8 ที่ระดับอินเตอร์ซิมโบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์เท่ากับ -24 dB สำหรับอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองต่างๆ บนข้อมูลสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM สำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบ โมดิฟาย	132
5.6 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนของจำนวนข้อมูลที่ต้องการเพื่อที่จะเข้าถึงระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาดของเฟส เท่ากับ -1.63 ที่ระดับอินเตอร์ซิมโบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์เท่ากับ -24 dB สำหรับอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองต่างๆ บนข้อมูลสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM สำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบ โมดิฟาย	133

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะตัวอย่างของช่องสัญญาณ โดยที่ (1) ส่วนของจำนวนจริงและ (2) ส่วนของ จำนวนจินตภาพ	2
1.2 (1) ลักษณะของข้อมูลก่อนผ่านช่องสัญญาณและ (2) ลักษณะของข้อมูลหลังจากผ่านช่องสัญญาณที่กำหนดไว้ในรูปที่ 1.1	2
2.1 โครงสร้างของระบบเบสแบนด์ (Baseband)	7
2.2 โครงสร้างของอีควาไลเซอร์แบบวงจรกรองทราสเวอร์ซอล	7
2.3 ลักษณะของระบบอีควาไลเซอร์แบบบอด	10
2.4 ลักษณะจุดที่ค่าผิดพลาดมีค่าเท่ากับศูนย์ของรีดิวคอนสเทลเลชันพอยท์ สำหรับ สัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM	17
2.5 ลักษณะโครงร่าง (Contour) ที่ค่าคอสต์ฟังก์ชันของอัลกอริทึมก๊อดดาร์ด เท่ากับศูนย์	20
2.6 อัลกอริทึมมัลติมอดคูลัสพยายามลดการกระจายตัวของผลลัพธ์ที่ได้จากอีควาไลเซอร์ โดยแยกส่วนที่เป็นจำนวนจริงออกจากส่วนของจำนวนจินตภาพ ซึ่งจุดที่เป็นบริเวณใช้กำหนดของขนาดผลลัพธ์คือ $\pm R_{MMA}$	21
2.7 ลักษณะโครงร่างที่ค่าคอสต์ฟังก์ชันของอัลกอริทึมมัลติมอดคูลัสเท่ากับศูนย์	23
2.8 ลักษณะโครงร่างที่ค่าคอสต์ฟังก์ชันของอัลกอริทึมสแควคอนทัวร์เท่ากับศูนย์	25
3.1 ลักษณะของบริเวณที่คอสต์ฟังก์ชันตามอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์มีค่าเท่ากับศูนย์	30
3.2 (a) ลักษณะโครงร่างของความผิดพลาดที่เท่ากับศูนย์ของอัลกอริทึมคอนสแตน มอดคูลัสที่มีลักษณะของวงกลมจึงไม่สามารถระบุเฟสได้ (b) ลักษณะ โครงร่างของความผิดพลาดที่เท่ากับศูนย์ของอัลกอริทึมสแควคอนทัวร์มีส่วนที่ใช้ระบุเฟส คือมุมของสี่เหลี่ยม (c) ลักษณะโครงร่างของความผิดพลาดที่เท่ากับศูนย์ของ อัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์ที่เพิ่มเติมส่วนของระบุเฟสให้กับอัลกอริทึมคอนสแตน มอดคูลัส	32

รูปที่	หน้า
3.3 (a) พื้นผิวของคอสท์ฟังก์ชันของอัลกอริทึมดับเบิลอีลีฟส์ ที่ p เท่ากับ 1 (b) ทิศทางกราเดียนของอัลกอริทึมดับเบิลอีลีฟส์ ที่ p เท่ากับ 1	33
3.4 (a) พื้นผิวของคอสท์ฟังก์ชันของอัลกอริทึมดับเบิลอีลีฟส์ ที่ p เท่ากับ 2 (b) ทิศทางกราเดียนของอัลกอริทึมดับเบิลอีลีฟส์ ที่ p เท่ากับ 2	34
3.5 (a) พื้นผิวของคอสท์ฟังก์ชันของอัลกอริทึมดับเบิลอีลีฟส์ ที่ p เท่ากับ 3 (b) ทิศทางกราเดียนของอัลกอริทึมดับเบิลอีลีฟส์ ที่ p เท่ากับ 3	35
3.6 (a) พื้นผิวของคอสท์ฟังก์ชันของอัลกอริทึมดับเบิลอีลีฟส์ ที่ p เท่ากับ 10 (b) ทิศทางกราเดียนของอัลกอริทึมดับเบิลอีลีฟส์ ที่ p เท่ากับ 10	36
3.7 ลักษณะของคอนสเทลเลชันของสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM ที่ทำให้คอสท์ฟังก์ชันมีค่าต่ำสุดเมื่อขนาดอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองมีค่าเท่ากับ 4	38
3.8 ผลลัพธ์หลังจากที่ทำอีควาไลเซชันกับสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM ที่ถูกหนุมไป 11.2 องศา (หมุนทวนเข็มนาฬิกา)	39
3.9 ผลลัพธ์หลังจากที่ทำอีควาไลเซชันกับสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM ที่ถูกหนุมไป 22.5 องศา (หมุนทวนเข็มนาฬิกา)	40
3.10 ผลลัพธ์หลังจากที่ทำอีควาไลเซชันกับสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM ที่ถูกหนุมไป 45 องศา (หมุนทวนเข็มนาฬิกา)	40
3.11 ผลลัพธ์หลังจากที่ทำอีควาไลเซชันกับสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM ที่ถูกหนุมไป 60 องศา (หมุนทวนเข็มนาฬิกา)	41
3.12 พื้นผิวของคอสท์ฟังก์ชันตามแนวคิดอัลกอริทึมดับเบิลอีลีฟส์แบบแอฟโซลูท	42
3.13 กรณีที่ค่าค่ายกกำลังเป็นคี่ บริเวณที่มีค่าเป็นบวกจะแทนด้วย + และบริเวณที่มีค่าเป็นลบจะแทนด้วย -	43
3.14 กรณีที่ค่าค่ายกกำลังเป็นคู่และแอฟโซลูท บริเวณที่มีค่าเป็นบวกจะแทนด้วย +	43
3.15 ลักษณะคอนสเทลเลชันที่สามารถลดค่าคอสท์ฟังก์ชันได้ต่ำสุด ในกรณีที่สัญญาณเป็น 16-QAM และขนาดของอัตราส่วนเท่าระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2	44
3.16 ภาพตัดขวางของคอสท์ฟังก์ชันที่ค่ายกกำลังเท่ากับ 1 เมื่อข้อมูลเป็นสัญญาณแบบ 16-QAM ตำแหน่งที่มีค่าเท่ากับศูนย์จะอยู่ระหว่างจุดสูงสุดและจุดต่ำสุด	45

รูปที่	หน้า
3.17 ภาพตัดขวางของคอสต์ฟังก์ชันอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูท เมื่อข้อมูลเป็นสัญญาณแบบ 16-QAM ซึ่งตำแหน่งที่มีค่าเท่ากับศูนย์ ณ จุดต่ำสุด	45
3.18 ลักษณะคอนสเทลเลชันที่สามารถลดค่าคอสต์ฟังก์ชันได้ต่ำสุด ในกรณีที่สัญญาณเป็น 16-QAM และขนาดของอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 7	46
3.19 ผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์ที่ค่ายกกำลังเท่ากับ 1 และกากบาทแทนจุดของสัญญาณที่ถูกต้อง จำนวนของข้อมูลเท่ากับ 10000	47
3.20 ผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทและกากบาทแทนจุดของสัญญาณที่ถูกต้อง จำนวนของข้อมูลเท่ากับ 10000	47
3.21 ภาพตัดขวางของคอสต์ฟังก์ชันอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์ที่ค่ายกกำลังเท่ากับ 1 เมื่อข้อมูลเป็นสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM ตำแหน่งที่มีค่าเท่ากับศูนย์จะอยู่ระหว่างจุดสูงสุดและจุดต่ำสุด	48
3.22 ภาพตัดขวางของคอสต์ฟังก์ชันอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูท เมื่อข้อมูลเป็นสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM ตำแหน่งที่มีค่าเท่ากับศูนย์ ณ จุดต่ำสุด	48
3.23 ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์ที่ค่ายกกำลังเท่ากับ 1 ให้กากบาทแทนจุดสัญญาณที่ถูกต้อง บนสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM และอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2	50
3.24 ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูท ให้กากบาทแทนจุดสัญญาณที่ถูกต้อง บนสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM และอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2	50
3.25 ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์ที่ค่ายกกำลังเท่ากับ 1 ให้กากบาทแทนจุดสัญญาณที่ถูกต้อง บนสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM และอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 7	51
3.26 ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูท ให้กากบาทแทนจุดสัญญาณที่ถูกต้อง บนสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM และอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 7	51

รูปที่	หน้า
3.27 ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์ที่ค่ายกกำลังเท่ากับ 1 ให้กากบาทแทนจุดสัญญาณที่ถูกต้อง บนสัญญาณข้อมูลแบบ 256-QAM และอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2	52
3.28 ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูท ให้กากบาทแทนจุดสัญญาณที่ถูกต้อง บนสัญญาณข้อมูลแบบ 256-QAM และอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2	52
3.29 ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์ที่ค่ายกกำลังเท่ากับ 1 ให้กากบาทแทนจุดสัญญาณที่ถูกต้อง บนสัญญาณข้อมูลแบบ 256-QAM และอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 7	53
3.30 ผลลัพธ์จากอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูท ให้กากบาทแทนจุดสัญญาณที่ถูกต้อง บนสัญญาณข้อมูลแบบ 256-QAM และอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 7	53
4.1 ความแตกต่างของพื้นผิวคอสมอสฟังก์ชันของ (a) อัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์ที่ค่ายกกำลัง p เท่ากับ 2 และ (b) อัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูท สามารถสังเกตบริเวณพื้นราบที่มากในอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์ที่ค่ายกกำลัง p เท่ากับ 2 ในขณะที่อัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทมีความชันทำให้ความสามารถในการรู้เข้าหาคำตอบเร็วกว่าอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์ที่ค่ายกกำลัง p เท่ากับ 2	55
4.2 ลักษณะตัวอย่างของช่องสัญญาณ โดยที่ (1) ส่วนของจำนวนจริงและ (2) ส่วนของ จำนวนจินตภาพ	59
4.3 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของอินเตอร์ซิมโบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2	61
4.4 แสดงผลลัพธ์ของระบบหลังจากใช้ข้อมูลไป 2500 จุด เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2	61

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของอินเตอร์ซิม โบลอินเตอร์เฟียเรนซ์สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 3	62
4.6 แสดงผลลัพธ์ของระบบหลังจากใช้ข้อมูลไป 2500 จุด เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 3	62
4.7 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของอินเตอร์ซิม โบลอินเตอร์เฟียเรนซ์สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2	64
4.8 แสดงผลลัพธ์ของระบบหลังจากใช้ข้อมูลไป 12000 จุด เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2	64
4.9 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของอินเตอร์ซิม โบลอินเตอร์เฟียเรนซ์สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 3	65
4.10 แสดงผลลัพธ์ของระบบหลังจากใช้ข้อมูลไป 12000 จุด เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 3	65
4.11 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของอินเตอร์ซิม โบลอินเตอร์เฟียเรนซ์สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 256-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2	66
4.12 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของอินเตอร์ซิม โบลอินเตอร์เฟียเรนซ์สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 256-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 3	66
4.13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทและแบบค่ายกกำลัง $p=2$ ที่อัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2 สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM	67

รูปที่	หน้า
4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทและแบบค่ายกกำลัง $p = 2$ ที่อัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2 สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM	68
4.15 เปรียบเทียบประสิทธิภาพอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทและแบบค่ายกกำลัง $p = 2$ ที่อัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2 สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 256-QAM	68
4.16 ข้อมูลระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาด ณ ระดับคงที่ สำหรับผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณ เมื่ออัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2 บนสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM	83
4.17 ข้อมูลระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาด ณ ระดับคงที่ สำหรับผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณ เมื่ออัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 3 บนสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM	83
4.18 ข้อมูลระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาด ณ ระดับคงที่ สำหรับผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณ เมื่ออัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2 บนสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM	84
4.19 ข้อมูลระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาด ณ ระดับคงที่ สำหรับผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณ เมื่ออัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 3 บนสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM	84
4.20 ข้อมูลระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาด ณ ระดับคงที่ สำหรับผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณ เมื่ออัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2 บนสัญญาณข้อมูลแบบ 256-QAM	85
4.21 ข้อมูลระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาด ณ ระดับคงที่ สำหรับผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณ เมื่ออัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 3 บนสัญญาณข้อมูลแบบ 256-QAM	85
4.22 วิธีการตีความสัญญาณลักษณะด้วยระบบเทอร์ชโฮต์	87
4.23 ลักษณะคอนสเทลเลชันของสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากอีควาไลเซอร์เมื่อระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาดของ	88

รูปที่

หน้า

เฟสเท่ากับ -1.8

- 4.24 ลักษณะคอนสเทเลชันของสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากอีควาไลเซอร์เมื่อระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาดของเฟสเท่ากับ -1.63 88
- 4.25 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาดของเฟสสำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2 90
- 4.26 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาดของเฟสสำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 3 90
- 4.27 ผลลัพธ์ที่ได้จากอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทที่อัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 3 เมื่อทำงานบนข้อมูลทดสอบแบบที่ถูกหมุนคไป $\frac{\pi}{4}$ เรเดียน โดยที่ตำแหน่งที่ถูกต้องคือ สัญลักษณ์กากบาท 91
- 4.28 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาดของเฟสสำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2 92
- 4.29 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของระดับค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความผิดพลาดของเฟสสำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 3 92
- 4.30 ภาพมุมมองทางด้านบนของพื้นผิวคอสม์ฟังก์ชันสำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทและลักษณะคอนสเทเลชันของสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM เมื่ออัตราส่วนเท่ากับ 2 94
- 4.31 ภาพมุมมองทางด้านบนของพื้นผิวคอสม์ฟังก์ชันสำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบแอฟโซลูทและลักษณะคอนสเทเลชันของสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM เมื่ออัตราส่วนเท่ากับ 3 94

รูปที่	หน้า
5.1 ลักษณะมุมมองด้านบนของพื้นผิวคอสท์ฟังก์ชันตามแนวคิดอัลกอริทึมรีดิวคอนสเทลเลชัน	96
5.2 ลักษณะมุมมองด้านบนของพื้นผิวคอสท์ฟังก์ชันตามแนวคิดอัลกอริทึมดับเบิลอีลิฟส์แบบโมดิฟาย	96
5.3 ค่าคงที่อัลกอริทึมดับเบิลอีลิฟส์สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM	100
5.4 ค่าคงที่อัลกอริทึมดับเบิลอีลิฟส์สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM/256-QAM	100
5.5 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของอินเตอร์ซิมโบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิฟส์แบบ โมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2	103
5.6 แสดงผลลัพธ์ของระบบหลังจากใช้ข้อมูลไป 2500 จุด เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิฟส์แบบ โมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2	103
5.7 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของอินเตอร์ซิมโบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิฟส์แบบ โมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 7	104
5.8 แสดงผลลัพธ์ของระบบหลังจากใช้ข้อมูลไป 2500 จุด เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิฟส์แบบ โมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 7	104
5.9 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของอินเตอร์ซิมโบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิฟส์แบบ โมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 22	105
5.10 แสดงผลลัพธ์ของระบบหลังจากใช้ข้อมูลไป 2500 จุด เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิฟส์แบบ โมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 22	105
5.11 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของอินเตอร์ซิมโบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิฟส์แบบ โมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2	107
5.12 แสดงผลลัพธ์ของระบบหลังจากใช้ข้อมูลไป 6000 จุด เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิฟส์แบบ โมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2	107
5.13 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของอินเตอร์ซิมโบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ สำหรับสัญญาณข้อมูล	108

รูปที่

หน้า

แบบ 64-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบ โมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่าง แกนหลักและแกนรองเท่ากับ 7	
5.14 แสดงผลลัพธ์ของระบบหลังจากใช้ข้อมูลไป 6000 จุด เมื่ออัลกอริทึมดับเบิล อีลิปส์แบบ โมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 7	108
5.15 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของอินเตอร์ซิมโบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ สำหรับสัญญาณข้อมูล แบบ 64-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบ โมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่าง แกนหลักและแกนรองเท่ากับ 22	109
5.16 แสดงผลลัพธ์ของระบบหลังจากใช้ข้อมูลไป 6000 จุด เมื่ออัลกอริทึมดับเบิล อีลิปส์แบบ โมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 22	109
5.17 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของอินเตอร์ซิมโบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ สำหรับสัญญาณข้อมูล แบบ 256-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบ โมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่าง แกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2	110
5.18 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของอินเตอร์ซิมโบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ สำหรับสัญญาณข้อมูล แบบ 256-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบ โมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่าง แกนหลักและแกนรองเท่ากับ 7	111
5.19 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของอินเตอร์ซิมโบลอินเตอร์เฟียร์เรนซ์ สำหรับสัญญาณข้อมูล แบบ 256-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบ โมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่าง แกนหลักและแกนรองเท่ากับ 22	111
5.20 ข้อมูลระดับค่าเฉลี่ยของค่ายกกำลังสองของความผิดพลาด ณ ระดับคงที่ สำหรับ ผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณ เมื่ออัตราส่วนระหว่างแกน หลักและแกนรองเท่ากับ 2 บนสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM	123
5.21 ข้อมูลระดับค่าเฉลี่ยของค่ายกกำลังสองของความผิดพลาด ณ ระดับคงที่ สำหรับ ผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณ เมื่ออัตราส่วนระหว่างแกน หลักและแกนรองเท่ากับ 7 บนสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM	123
5.22 ข้อมูลระดับค่าเฉลี่ยของค่ายกกำลังสองของความผิดพลาด ณ ระดับคงที่ สำหรับ ผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณ เมื่ออัตราส่วนระหว่างแกน หลักและแกนรองเท่ากับ 22 บนสัญญาณข้อมูลแบบ 16-QAM	124

รูปที่	หน้า
5.32 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของระดับค่าเฉลี่ยของค่ายกกำลังสองของความผิดพลาดของเฟส สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบโมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 2	130
5.33 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของระดับค่าเฉลี่ยของค่ายกกำลังสองของความผิดพลาดของเฟส สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบโมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 7	131
5.34 แสดงระดับค่าเฉลี่ยของระดับค่าเฉลี่ยของค่ายกกำลังสองของความผิดพลาดของเฟส สำหรับสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM เมื่ออัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบโมดิฟายมีอัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 22	131
5.35 ภาพมุมมองทางด้านบนของพื้นผิวคอสมอสที่ฟังก์ชันสำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบโมดิฟาย และลักษณะคอนสเทลเลชันของสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM เมื่ออัตราส่วนเท่ากับ 2	134
5.36 ภาพมุมมองทางด้านบนของพื้นผิวคอสมอสที่ฟังก์ชันสำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบโมดิฟาย และลักษณะคอนสเทลเลชันของสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM เมื่ออัตราส่วนเท่ากับ 7	135
5.37 ภาพมุมมองทางด้านบนของพื้นผิวคอสมอสที่ฟังก์ชันสำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบโมดิฟาย และลักษณะคอนสเทลเลชันของสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM เมื่ออัตราส่วนเท่ากับ 22	136
5.38 ภาพมุมมองทางด้านบนของพื้นผิวคอสมอสที่ฟังก์ชันสำหรับอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบโมดิฟาย และลักษณะคอนสเทลเลชันของสัญญาณข้อมูลแบบ 64-QAM เมื่ออัตราส่วนเท่ากับ 50	136
5.39 การเปรียบเทียบความเร็วในการลดระดับความผิดพลาดของเฟสของอัลกอริทึมดับเบิลอีลิปส์แบบโมดิฟายที่อัตราส่วนระหว่างแกนหลักและแกนรองเท่ากับ 7 และ 22	137