

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	IX
สารบัญรูป.....	X
รายการคำย่อ.....	XV
รายการสัญลักษณ์.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนในการวิจัย.....	3
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ระบบสื่อสารเชิงแสง.....	5
2.1 ความเป็นมาของระบบสื่อสารเชิงแสง.....	5
2.2 รูปแบบการสื่อสารเชิงแสง.....	6
2.3 ช่องทางการสื่อสารในระบบสื่อสารเชิงแสง.....	7
2.3.1 ระบบสื่อสารทางแสงผ่านอากาศ.....	7
2.3.2 ระบบสื่อสารเส้นใยแสง.....	8
2.4 โฟตอน.....	9
2.5 ชนิดของช่องสัญญาณ.....	10
2.5.1 ช่องสัญญาณแบบเกาส์.....	11
2.5.2 ช่องสัญญาณแบบพัลส์ช่อง.....	16
2.6 การผสมสัญญาณเชิงแสง.....	21
2.6.1 การผสมสัญญาณเชิงแสงโดยใช้การตรวจจับโดยตรง.....	22
2.6.2 การผสมสัญญาณเชิงแสงโดยใช้การตรวจจับแบบร่วมนัย.....	22
2.7 รูปแบบการผสมสัญญาณเชิงแสง.....	23

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.7.1 การผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying.....	24
2.7.2 การผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	25
2.7.3 การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	25
2.7.4 การผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation.....	26
2.7.5 การผสมสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation.....	30
2.7.6 การผสมสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation.....	32
2.8 การสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ.....	33
2.8.1 การผสมสัญญาณแบบโฟตอนสี่ระดับ.....	33
2.8.2 การผสมสัญญาณแบบโฟตอนสี่ระดับและการผสมสัญญาณแบบไบนารี พัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	34
บทที่ 3 รหัสแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูล.....	37
3.1 หลักการทำงานพื้นฐานของวิธีการเข้ารหัส.....	37
3.2 รหัสแบบคอนโวลูชัน (Convolution Codes).....	38
3.2.1 หลักการเข้ารหัส.....	38
3.2.2 การวิเคราะห์การทำงานของการทำงานของการเข้ารหัส.....	39
3.2.3 แผนภาพแสดงการทำงานของการทำงานของการเข้ารหัส.....	40
3.2.4 การถอดรหัสคอนโวลูชัน.....	43
3.2.5 การถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บี (Viterbi Algorithm).....	43
3.2.6 การลดจำนวนบิตข้อมูล.....	45
บทที่ 4 วิธีการทดสอบและข้อกำหนด.....	47
4.1 การออกแบบระบบสื่อสาร.....	47
4.1.1 กระบวนการสร้างข้อมูลแบบสุ่ม.....	47
4.1.2 การเข้ารหัสข้อมูล.....	48
4.1.3 การผสมสัญญาณ.....	48
4.1.4 ช่องสัญญาณ.....	48
4.1.5 การแยกสัญญาณ.....	48
4.1.6 การถอดรหัสข้อมูล.....	48

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.7 การหาค่าอัตราความผิดพลาดของข้อมูล.....	49
4.2 การออกแบบช่องสัญญาณ.....	49
4.2.1 ช่องสัญญาณแบบเกาส์.....	50
4.2.2 ช่องสัญญาณแบบพัลส์ช่อง.....	50
4.3 การออกแบบการผสมสัญญาณเชิงแสง.....	50
4.3.1 การออกแบบสัญญาณแบบ On-Off Keying.....	50
4.3.2 การออกแบบสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	51
4.3.3 การออกแบบสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	52
4.3.4 การออกแบบสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation.....	53
4.3.5 การออกแบบสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation.....	54
4.3.6 การออกแบบสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation.....	54
4.3.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยเงื่อนไขค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูล.....	55
4.3.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยเงื่อนไขจำนวนสล็อตที่เท่ากัน.....	56
4.4 การออกแบบสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ.....	56
4.4.1 การออกแบบการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ.....	57
4.4.2 การออกแบบการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับ การผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	58
4.4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ แต่ละรูปแบบ.....	60
4.5 การเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนวอลูชัน.....	60
4.5.1 ค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิด.....	60
4.5.2 อัตราการเข้ารหัส.....	61
4.5.3 ค่าจำนวนชุดของสัญลักษณ์ที่ใช้ในการเข้ารหัสแต่ละรอบ.....	61
4.5.4 การเข้ารหัสแบบคอนวอลูชันและการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ.....	62
4.5.5 การเข้ารหัสแบบคอนวอลูชันและการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ.....	62
บทที่ 5 ผลการทดสอบ.....	65
5.1 ผลการออกแบบระบบสื่อสารเชิงแสง.....	65
5.2 ผลการออกแบบช่องสัญญาณ.....	66

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.2.1 ผลการออกแบบช่องสัญญาณแบบเกาส์	66
5.2.2 ผลการออกแบบช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง	66
5.3 ผลการจำลองการทำงานของระบบสัญญาณ	69
5.3.1 ผลการจำลองการทำงานของสัญญาณแบบ On-Off Keying	69
5.3.2 ผลการจำลองการทำงานของสัญญาณแบบ ไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน	69
5.3.3 ผลการจำลองการทำงานของสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน	72
5.3.4 ผลการจำลองการทำงานของสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation	72
5.3.5 ผลการจำลองการทำงานของสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation	75
5.3.6 ผลการจำลองการทำงานของสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation	75
5.3.7 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยเงื่อนไขค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูล	78
5.3.8 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยเงื่อนไขจำนวนสล็อตที่เท่ากัน	83
5.4 ผลการจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ	86
5.4.1 ผลการจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ	86
5.4.2 ผลการจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับ การผสมสัญญาณแบบ ไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน	86
5.4.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ แต่ละรูปแบบ	90
5.5 ผลการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนวอลูชัน	93
5.5.1 ผลการเปรียบเทียบการใช้ค่าเมตริกซ์ตัวกำหนด	93
5.5.2 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเข้ารหัส	94
5.5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าจำนวนชุดของสัญลักษณ์ที่ใช้ในการเข้ารหัสแต่ละรอบ	95
5.5.4 ผลการเข้ารหัสแบบคอนวอลูชันและการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ	95
5.5.5 ผลการเข้ารหัสแบบคอนวอลูชันและการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ	104
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	112
6.1 สรุปผลการวิจัย	112
6.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในงานวิจัย	114
6.3 ข้อเสนอแนะ	114

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	116
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. ตำแหน่งการตัดสินใจสำหรับการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ.....	118
ภาคผนวก ข. การเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันกับการสื่อสารแบบโฟตอนที่ระดับที่ใช้งาน ร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	126
ภาคผนวก ค. เทคนิคการสร้างการผสมสัญญาณแบบต่างๆ และหลักการคำนวณ อัตราความผิดพลาด.....	134
ประวัติผู้เขียน.....	152

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดีและข้อด้อยของการผสมสัญญาณแต่ละรูปแบบ.....	33
4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ โดยพิจารณาจากค่าอัตราการส่งผ่าน ข้อมูล (Throughput).....	56
4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ โดยพิจารณาจากจำนวนสล็อตที่เท่ากัน.....	56
4.3 ค่าตำแหน่งการตัดสินใจโดยการคำนวณโดยตรงทางทฤษฎี.....	58
4.4 เมตริกซ์ตัวกำหนดชนิดต่างๆ.....	61
4.5 การเปรียบเทียบอัตราการเข้ารหัส.....	61
4.6 การเปรียบเทียบค่า Constraint Length.....	61
5.1 การเปรียบเทียบการจำลองการทำงานของสัญญาณแบบต่างๆ กับความน่าจะเป็น ในการเกิดความผิดพลาดบิตที่คำนวณได้จากสมการ.....	108
5.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ โดยพิจารณาจากค่าอัตราการส่งผ่าน ข้อมูล (Throughput).....	109
5.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ โดยพิจารณาจากค่าจำนวนสล็อตที่เท่ากัน.....	109
5.4 การเปรียบเทียบการจำลองการทำงานของสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับกับ ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตที่คำนวณได้จากสมการ.....	109
5.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ.....	110
5.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณแบบต่างๆ เมื่อมีการเข้ารหัสแบบ คอนวูลูชันกับไม่เข้ารหัสที่มีค่าของสัญญาณรบกวนเท่ากับ 1.....	110
5.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับเมื่อมีการเข้ารหัส แบบคอนวูลูชันกับไม่เข้ารหัส.....	111
ก.1 ค่าตำแหน่งการตัดสินใจแบบคำนวณทางทฤษฎี.....	122
ข.1 ผลของกระบวนการแมปปิงโดยการเพิ่มเติมบิต.....	127
ข.2 ผลของกระบวนการลดจำนวนบิต.....	128

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 บล็อกไดอะแกรมระบบสื่อสารเชิงแสง.....	6
2.2 ระบบ FSO เชื่อมโยงระหว่างตึกเพื่อสื่อสารข้อมูล เช่น VDO Conference.....	8
2.3 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบสื่อสารเส้นใยนำแสง.....	8
2.4 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบเกาส์.....	12
2.5 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบปัวส์ซอง เมื่อค่า λ เท่ากับ 2.....	19
2.6 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบปัวส์ซอง เมื่อค่า λ เท่ากับ 15.....	19
2.7 รูปแบบการผสมสัญญาณเชิงแสงโดยใช้การตรวจนับแบบโดยตรง.....	23
2.8 ภาครีบบแบบ Heterodyne Detection.....	23
2.9 การผสมสัญญาณรูปแบบต่างๆ ที่พัฒนาจากการผสมสัญญาณแบบ PPM.....	24
2.10 รูปแบบการส่งสัญญาณแบบ On-off keying.....	25
2.11 รูปแบบการส่งสัญญาณแบบรูปแบบการส่งสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	25
2.12 รูปแบบการส่งสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	27
2.13 ตัวอย่างของรูปแบบการแทนค่าของสัญญาณเมื่อค่า $k = 2$	27
2.14 รูปแบบการส่งสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation.....	27
2.15 ตัวอย่างของรูปแบบการแทนค่าของสัญญาณเมื่อค่า $N = 4, k = 2$	29
2.16 รูปแบบการส่งสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation.....	31
2.17 ตัวอย่างของรูปแบบการแทนค่าของสัญญาณเมื่อค่า $N = 3, Q = 2$	31
2.18 รูปแบบการส่งสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation.....	32
2.19 รูปแบบของช่องสัญญาณแบบ (N+1)-ary Z channel.....	32
2.20 รูปแบบของสัญญาณแบบโฟตอนสี่ระดับ.....	35
2.21 รูปแบบของระดับสัญญาณสำหรับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ.....	35
2.22 รูปแบบของระดับสัญญาณสำหรับการสื่อสารแบบโฟตอนที่ใช้งานร่วมกับ การผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	36
3.1 แบบจำลองระบบสื่อสารที่มีการนำวิธีการเข้ารหัสมาใช้งาน.....	38
3.2 การเข้ารหัสแบบคอนวอลูชัน ที่ $K=3$	39
3.3 แผนภาพแสดงสถานะ (State Diagram).....	41
3.4 แผนภาพแบบต้นไม้ (Tree Diagram).....	41
3.5 แผนภาพแบบทรีลิส (Trellis Diagram).....	42
3.6 การทำงานของรหัสแบบคอนวอลูชันที่มีการลดจำนวนบิตข้อมูล.....	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ตัวอย่างวิธีการ Punctuation.....	46
3.8 ตัวอย่างวิธีการ Depunctuation.....	46
4.1 รูปแบบของระบบสื่อสารเชิงแสง.....	47
4.2 รูปแบบของการจำลองการทำงานของระบบสื่อสารเชิงแสง.....	49
4.3 การคำนวณค่าอัตราความผิดพลาดบิตของช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์และแบบปัวส์ซอง.....	55
4.4 รูปแบบของรหัสแบบคอนโวลูชันสำหรับทดสอบกับการผสมสัญญาณเชิงแสง.....	62
4.5 รูปแบบการทำงานของการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันและรหัสแบบคอนโวลูชันที่มีการลดระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ย.....	63
4.6 รูปแบบการทำงานของการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันและรหัสแบบคอนโวลูชันที่มีการลดจำนวนบิต.....	63
4.7 รูปแบบการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันสำหรับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	64
5.1 ตัวอย่างผลการจำลองการทำงานของโปรแกรม MATLAB.....	65
5.2 ผลของการออกแบบช่องสัญญาณแบบเกาส์.....	67
5.3 ผลของการออกแบบช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง.....	68
5.4 การจำลองการทำงานการผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying เปรียบเทียบกับความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ.....	70
5.5 การจำลองการทำงานการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ.....	71
5.6 การจำลองการทำงานการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ.....	73
5.7 การจำลองการทำงานการผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation.....	74
5.8 การจำลองการทำงานการผสมสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation.....	76
5.9 การจำลองการทำงานการผสมสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation.....	77
5.10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ เมื่อมีค่า Throughput เท่ากับ 1b/sec/Hz.....	80
5.11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ เมื่อมีค่า Throughput เท่ากับ 2 b/sec/Hz.....	81

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.12 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ เมื่อมีค่า Throughput เท่ากับ 3 b/sec/Hz.....	82
5.13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ เมื่อจำนวนสล็อตมีค่าเท่ากับ 4.....	84
5.14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ เมื่อจำนวนสล็อตมีค่าเท่ากับ 6.....	85
5.15 การจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็น ในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ.....	87
5.16 การจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณ แบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิด ความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ.....	88
5.17 การจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับเมื่อมีการเพิ่มระดับของจำนวน โฟตอนเฉลี่ยเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณ จากสมการ.....	89
5.18 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับระหว่าง การตัดสินใจแบบประมาณค่ากับการตัดสินใจแบบการคำนวณ.....	90
5.19 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับกับการสื่อสารแบบ โฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	91
5.20 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการ ผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันระหว่างจำนวนโฟตอนเฉลี่ย สามระดับและสี่ระดับ.....	92
5.21 ผลของการเปรียบเทียบการใช้เมตริกซ์ตัวกำหนด.....	93
5.22 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการเข้ารหัส.....	94
5.23 ผลของการเปรียบเทียบค่า Constraint length.....	95
5.24 การผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying ที่มีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส.....	97
5.25 การผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส.....	98
5.26 การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส.....	99
5.27 การผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation ที่มีการเข้ารหัส และไม่เข้ารหัส.....	100
5.28 การผสมสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation ที่มีการเข้ารหัส และไม่เข้ารหัส.....	102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.29 การผสมสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation ที่มีการเข้ารหัสและ ไม่เข้ารหัส.....	103
5.30 การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับเมื่อมีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส.....	105
5.31 การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารี พัลส์โพลิซันมอดูเลชันเมื่อมีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส.....	105
5.32 การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์ โพลิซันมอดูเลชันที่มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบข้อมูลเมื่อมีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส.....	106
5.33 การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารี พัลส์โพลิซันมอดูเลชันที่มีการเพิ่มระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยเมื่อมีการเข้ารหัสและ ไม่เข้ารหัส.....	107
ก.1 รูปแบบของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ.....	118
ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสมการ $P(m) = \frac{(Kb)^m e^{-(Kb)}}{m!}$ และ $P(m) = \frac{(Ks + Kb)^m e^{-(Ks + Kb)}}{m!}$	119
ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมการ $P(m) = \frac{(Ks + Kb)^m e^{-(Ks+Kb)}}{m!}$ และ $P(m) = \frac{(4Ks + Kb)^m e^{-(4Ks+Kb)}}{m!}$	120
ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสมการ $P(m) = \frac{(4Ks + Kb)^m e^{-(4Ks+Kb)}}{m!}$ และ $P(m) = \frac{(9Ks + Kb)^m e^{-(9Ks+Kb)}}{m!}$	121
ก.5 รูปแบบของการสื่อสารแบบโฟตอนสองระดับ รูปแบบที่ 1.....	123
ก.6 รูปแบบของการสื่อสารแบบโฟตอนสองระดับ รูปแบบที่ 2.....	123
ก.7 รูปแบบของการสื่อสารแบบโฟตอนสองระดับ รูปแบบที่ 3.....	123
ก.8 การเปรียบเทียบระหว่างค่าตำแหน่งการตัดสินใจของการสื่อสารแบบโฟตอนสองระดับ รูปแบบที่ 3.....	124
ก.9 การเปรียบเทียบกรณีการเลือกค่า α , ทั้งสามกรณี.....	124
ข.1 กระบวนการทำงานของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณ แบบไบนารีพัลส์โพลิซันมอดูเลชันและรหัสแบบคอนวอลูชันที่มีการลดจำนวนบิต.....	125
ข.2 โครงสร้างการเข้ารหัสแบบคอนวอลูชันที่มี $g = 1111001, 1110101$ และ 1011011	126
ข.3 ตัวอย่างการเพิ่มบิต.....	127
ข.4 หลักการทำงานของแมปปี้ง.....	127
ข.5 รูปแบบของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบ ไบนารีพัลส์โพลิซันมอดูเลชันและรหัสแบบคอนวอลูชันที่มีการลดจำนวนบิต.....	129
ข.6 หลักการทำงานของดีแมปปี้ง.....	129

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.7 ตัวอย่างการถอดรหัสโดยใช้แผนภาพแบบทรีลิส	129
ข.8 อัตราความผิดพลาดต่อบิตของการการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับ การผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเมื่อมีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส เมื่อ $Kb = 1$	131
ค.1 แผนภาพวงจรภาครับแบบ On-Off Keying	134
ค.2 แผนภาพวงจรภาครับแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน	135
ค.3 แผนภาพวงจรภาครับแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน	139
ค.4 แผนภาพวงจรภาครับแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation	141
ค.5 แผนภาพวงจรภาครับแบบการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ	144
ค.6 แผนภาพวงจรภาครับแบบการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับ การผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน	148