

ประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณเชิงแสงและรหัสคอนโวลูชัน

PERFORMANCE OF OPTICAL MODULATION TECHNIQUES
AND CONVOLUTION CODES

จิตฐาม์กานต์ วงศ์พุ่ม
JISATHAKAN WONGPOOM

วิทยานิพนธ์นี้เขียนขึ้นเพื่อสนองความต้องการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณเชิงแสงและรหัสคอนวอลูชัน

PERFORMANCE OF OPTICAL MODULATION TECHNIQUES
AND CONVOLUTION CODES



จิตฐาม์กานต์ วงศ์พุ่ม
JISATHAKAN WONGPOOM

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....75078
วัน,เดือน,ปี...1.9...ค.ค. 2550

b.....
i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2550

PERFORMANCE OF OPTICAL MODULATION TECHNIQUES
AND CONVOLUTION CODES

JISATHAKAN WONGPOOM

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN INFORMATION ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2007






COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณเชิงแสงและรหัสคอนวอลูชัน
Performance of Optical Modulation Techniques and Convolution Codes
นักศึกษา นางสาวจิศฎาม์กานต์ วงศ์พุ่ม
รหัสประจำตัว 46061306
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.อรลภก แสงอรุณ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.อรรถสิทธิ์ หล้าสกุล
ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีพิมานวัฒน์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.อรรถสิทธิ์	หล้าสกุล	
รศ.ดร.ชวลิต	เบญจางคประเสริฐ	
ดร.เกียรติศักดิ์	ศรีพิมานวัฒน์	
รศ.ดร.กนก	เจนจิระพงศ์เวช	
รศ.อรลภก	แสงอรุณ	

วัน/เดือน/ปี ที่สอบ 29 พฤษภาคม 2550 เวลา 11.30-13.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร 12 ชั้น ชั้น 3 (ห้อง E12-301)



วันที่.....๒.....เดือน.....สิงหาคม.....พ.ศ.....๒๕๕๐.....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ประสิทธิภาพของการผสมสัญญาเชิงแสงและรหัสคอนโวลูชัน	
นักศึกษา	นางสาวจิศฎามักานต์ วงศ์พุ่ม	
รหัสนักศึกษา	46061306	
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต	
สาขาวิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ	
พ.ศ.	2550	
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.อรลภ	แสงอรุณ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ดร.เกียรติศักดิ์	ศรีพิมานวัฒน์
	รศ.ดร. อรรถสิทธิ์	เหล่าสกุล

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาเชิงแสง ได้แก่การผสมสัญญาแบบคีย์ออน-ออฟ การผสมสัญญาแบบพัลส์โพสิชัน การผสมสัญญาแบบไบนารีพัลส์โพสิชัน การผสมสัญญาแบบมัลติพัลส์โพสิชัน การผสมสัญญาแบบพัลส์โพสิชันเหลี่ยม การผสมสัญญาแบบดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โพสิชัน ในช่องสัญญาแบบเกาส์และปัวส์ซอง โดยคำนวณอัตราความผิดพลาดบิตเปรียบเทียบกับ การออกแบบจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ผลการเปรียบเทียบแสดงในรูปอัตราความผิดพลาดบิต ด้วยเงื่อนไขของค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูลและจำนวนสลอตที่ใช้ในการส่งสัญญา ผลการทดสอบพบว่า การผสมสัญญาในรูปแบบที่มีการพัฒนาโดยใช้วิธีการต่างๆ มีค่าอัตราความผิดพลาดบิตน้อยกว่าการผสมสัญญาต้นแบบ จากนั้นนำรหัสแบบคอนโวลูชันมาใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาเชิงแสงพบว่าอัตราความผิดพลาดลดลงจากเมื่อไม่มีการเข้ารหัสมาก ซึ่งประสิทธิภาพของการแก้ไขข้อผิดพลาดขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ใช้กับรหัสแบบคอนโวลูชัน ได้แก่ค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิด ค่าอัตราการเข้ารหัส และค่าจำนวนชุดของสัญลักษณ์ข้อมูลที่ใช้ในการเข้ารหัสแต่ละรอบ นอกจากนี้ได้นำเสนอการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาแบบไบนารีพัลส์โพสิชัน ซึ่งมีรูปแบบของการตัดสินใจสองแบบคือแบบประมาณค่าและแบบคำนวณ พบว่าอัตราความผิดพลาดของบิตมีค่าลดลงแต่กรณีที่ใช้กับการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันสัญญาที่เป็นไปไม่ได้ไม่ครบตามจำนวนข้อมูลจริงที่เกิดขึ้น จึงลดระดับของการสื่อสารแบบโฟตอนลงให้เหลือเพียงสองระดับและทำการปรับลดและเพิ่มจำนวนบิตในการส่งสัญญาเพื่อทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของข้อมูลให้สอดคล้องกับจำนวนรูปแบบของสัญญา และการเพิ่มระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ย เพื่อให้สร้างรูปแบบของสัญญาที่ใช้งาน ได้สอดคล้องกับรูปแบบของข้อมูล ซึ่งผลของการทดสอบพบว่าสามารถใช้งานร่วมกันได้และอัตราความผิดพลาดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับการส่งแบบไม่มีการเข้ารหัส

Thesis Title	Performance of Optical Modulation Techniques and Convolution Codes	
Student	Miss Jisathakan Wongpoom	
Student ID.	46061306	
Degree	Master of Engineering	
Program	Information Engineering	
Year	2007	
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Omlarp	Saengaroon
Co-Thesis Advisor	Dr.Keattisak	Sripimanwat
	Assoc.Prof.Dr.Attasit	Lasakul

ABSTRACT

This thesis studies performance of optical modulation scheme such as On-Off Keying, Pulse Position Modulation, Binary Pulse Position Modulation, Multi-pulse Pulse Position Modulation, Overlapping Pulse Position Modulation and Differential Pulse Position Modulation in Additive White Gaussian Noise (AWGN) and Poisson Channel. Each optical modulation and their bit error probability are designed with MATLAB. Results show a bit error probability and average photons per slot in Poisson channel or signal to noise ratio in AWGN channel. The comparison between each optical modulation scheme is done on throughput and the number of slots. Results show that developed techniques reduce the bit error probability more than that of original modulation technique. Moreover, Convolution Codes is combined with each optical modulation scheme. In order to improve system bit error rate, their performance depends on generator matrix, code rate and constraint length. Besides, the 4-level Photon Communication is studied and developed to a new modulation format called 4-level Photon Communication with Binary Pulse Position Modulation (BPPM). Two decision formats, estimation method and calculation method are proposed. Furthermore, the three techniques are utilized in combination with Convolution Codes. Hence, 2-level Photon Communication with BPPM, 4-level Photon Communication with BPPM and Punctured Convolution Codes with increasing a photon level are proposed. Results shown that each technique improves the bit error probability. Finally, it is concluded that 4-level Photon Communication with BPPM techniques reduce the bit error rate with better performance than without BPPM.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนจากหลาย ๆ ฝ่าย ซึ่งผู้เขียนขอขอบพระคุณดังนี้

ขอขอบคุณ รศ.อรุณ แสงอรุณ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.อรรณสิทธิ์ หล้าสกุล และดร.เกียรติศักดิ์ ศรีพิมานวัฒน์ อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษาและคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ คุณจันทร์ธิดา มงคลวัย คุณอุไร เต่าอ่อนและคุณวิภาดา อุฬุรีย์ ทนสถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ที่ได้ให้คำแนะนำในด้านค่าใช้จ่ายในการศึกษาและการทำการศึกษาวิจัย และให้คำปรึกษาในเรื่องต่าง ๆ

ขอขอบคุณห้องปฏิบัติการสื่อสารเชิงแสงและควอนตัม (OQC) ที่ให้ความอนุเคราะห์สถานที่ในการศึกษาวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศที่ได้ประสิทธิประสาทความรู้ และให้สถานที่ในการทำการศึกษาวิจัย

ขอขอบคุณนักวิจัยในห้องปฏิบัติการสื่อสารเชิงแสงและควอนตัม และพี่ ๆ ในห้อง Digital Communication System Laboratory ทุก ๆ ท่านที่ได้ให้ความร่วมมือและความช่วยเหลือต่าง ๆ ในการศึกษาวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณคุณแม่ที่เป็นผู้สนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ทางผู้จัดทำขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านไว้ ณ โอกาสนี้

จิศฎาม์กานต์ วงศ์พุ่ม

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 ช่องทางการสื่อสารในในระบบสื่อสารเชิงแสง.....	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 ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง.....	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 การสื่อสารแบบโพลิตอนหลายระดับ.....	33
2.8.1 การผสมสัญญาณแบบโพลิตอนสี่ระดับ.....	33
2.8.2 การผสมสัญญาณแบบโพลิตอนสี่ระดับและการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	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 ช่องสัญญาณแบบบีวส์ซิง.....	50
4.3 การออกแบบการผสมสัญญาณเชิงแสง.....	50
4.3.1 การออกแบบสัญญาณแบบ On-Off Keying.....	50
4.3.2 การออกแบบสัญญาณแบบ ไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	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 การออกแบบสื่อสารแบบ โฟตอนหลายระดับ.....	56
4.4.1 การออกแบบการสื่อสารแบบ โฟตอนสี่ระดับ.....	57
4.4.2 การออกแบบการสื่อสารแบบ โฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับ การผสมสัญญาณแบบ ไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	58
4.4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบ โฟตอนสี่ระดับ 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 การเข้ารหัสแบบคอนวอลูชันและการสื่อสารแบบ โฟตอนสี่ระดับ.....	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 ผลการจำลองการทำงานของการผสมสัญญาณ.....	69
5.3.1 ผลการจำลองการทำงานสัญญาณแบบ On-Off Keying.....	69
5.3.2 ผลการจำลองการทำงานสัญญาณแบบ ไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	69
5.3.3 ผลการจำลองการทำงานสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	72
5.3.4 ผลการจำลองการทำงานสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation.....	72
5.3.5 ผลการจำลองการทำงานสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation.....	75
5.3.6 ผลการจำลองการทำงานสัญญาณแบบ 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 ผลการจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบ ไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	86
5.4.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับแต่ละรูปแบบ.....	90
5.5 ผลการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนวอลูชัน.....	93
5.5.1 ผลการเปรียบเทียบการใช้ค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิด.....	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. ตำแหน่งการตัดสนใจสำหรับการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ.....	118
ภาคผนวก ข. การเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันกับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งาน ร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	126
ภาคผนวก ค. เทคนิคการสร้างการผสมสัญญาณแบบต่างๆ และหลักการคำนวณ อัตราความผิดพลาด.....	134
ประวัติผู้เขียน.....	152

สารบัญญัตราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อดีและข้อด้อยของการผสมสัญญาณแต่ละรูปแบบ	33
4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ โดยพิจารณาจากค่าอัตราการส่งผ่าน ข้อมูล (Throughput).....	56
4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ โดยพิจารณาจากจำนวนสล็อตที่เท่ากัน	56
4.3 ค่าตำแหน่งการตัดสินใจโดยการคำนวณโดยตรงทางทฤษฎี.....	58
4.4 เมตริกซ์ตัวกำเนิดชนิดต่างๆ.....	61
4.5 การเปรียบเทียบอัตราการเข้ารหัส.....	61
4.6 การเปรียบเทียบค่า Constraint Length.....	61
5.1 การเปรียบเทียบการจำลองการทำงานของผสมสัญญาณแบบต่างๆ กับความน่าจะเป็น ในการเกิดความผิดพลาดบิตที่คำนวณได้จากสมการ	108
5.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ โดยพิจารณาจากค่าอัตราการส่งผ่าน ข้อมูล (Throughput).....	109
5.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ โดยพิจารณาจากค่าจำนวนสล็อตที่เท่ากัน	109
5.4 การเปรียบเทียบการจำลองการทำงานของสื่อสารแบบพอดอนหลายระดับกับ ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตที่คำนวณได้จากสมการ	109
5.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการสื่อสารแบบพอดอนหลายระดับ	110
5.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณแบบต่างๆ เมื่อมีการเข้ารหัสแบบ คอนวอลูชันกับไม่เข้ารหัสที่มีค่าของสัญญาณรบกวนเท่ากับ 1.....	110
5.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบพอดอนหลายระดับเมื่อมีการเข้ารหัส แบบคอนวอลูชันกับไม่เข้ารหัส.....	111
ก.1 ค่าตำแหน่งการตัดสินใจแบบคำนวณทางทฤษฎี.....	122
ข.1 ผลของกระบวนการแมปปีงโดยการเพิ่มเติมบิต.....	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 รูปแบบการผสมสัญญาณเชิงแสงโดยใช้การตรวจจับแบบโดยตรง.....	23
2.8 ภาครีบแบบ Heterodyre 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 การเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน ที่ $K=3$	39
3.3 แผนภาพแสดงสถานะ (State Diagram).....	41
3.4 แผนภาพแบบต้นไม้ (Tree Diagram).....	41
3.5 แผนภาพแบบทรีลิส (Trellis Diagram).....	42
3.6 การทำงานของรหัสแบบคอนโวลูชันที่มีการลดจำนวนบิตข้อมูล.....	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 รูปแบบการทำงานของสื่อสารแบบ โฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันและรหัสแบบคอนโวลูชันที่มีการลดระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ย	63
4.6 รูปแบบการทำงานของสื่อสารแบบ โฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันและรหัสแบบคอนโวลูชันที่มีการลดจำนวนบิต	63
4.7 รูปแบบการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันสำหรับสื่อสารแบบ โฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน	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 เมื่อจำนวนสลอตมีค่าเท่ากับ 4.....	84
5.14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ เมื่อจำนวนสลอตมีค่าเท่ากับ 6.....	85
5.15 การจำลองการทำงานการสื่อสารแบบ โฟตอนสี่ระดับเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็น ในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ.....	87
5.16 การจำลองการทำงานการสื่อสารแบบ โฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณ แบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิด ความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ.....	88
5.17 การจำลองการทำงานการสื่อสารแบบ โฟตอนสี่ระดับเมื่อมีการเพิ่มระดับของจำนวน โฟตอนเฉลี่ยเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณ จากสมการ.....	89
5.18 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของการทำงานของการสื่อสารแบบ โฟตอนสี่ระดับระหว่าง การตัดสินใจแบบประมาณค่ากับการตัดสินใจแบบการคำนวณ.....	90
5.19 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการสื่อสารแบบ โฟตอนสี่ระดับกับการสื่อสารแบบ โฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน.....	91
5.20 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบ โฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการ ผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันระหว่างจำนวนโฟตอนเฉลี่ย สามารถและสี่ระดับ.....	92
5.21 ผลของการเปรียบเทียบการใช้เมตริกซ์ตัวกำเนิด.....	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 พัลส์โพสิชันมอดูเลชันเมื่อมีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส.....	105
5.32 การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์ โพสิชันมอดูเลชันที่มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบข้อมูลเมื่อมีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส.....	106
5.33 การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารี พัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีการเพิ่มระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยเมื่อมีการเข้ารหัสและ 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 แบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันและรหัสแบบคอนวูลูชันที่มีการลดจำนวนบิต.....	125
ข.2 โครงสร้างการเข้ารหัสแบบคอนวูลูชันที่มี $g = 1111001, 1110101$ และ 1011011	126
ข.3 ตัวอย่างการเพิ่มบิต.....	127
ข.4 หลักการทำงานของแมปปี้ง.....	127
ข.5 รูปแบบของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบ ไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันและรหัสแบบคอนวูลูชันที่มีการลดจำนวนบิต.....	129
ข.6 หลักการทำงานของดีแมปปี้ง.....	129

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ข.7 ตัวอย่างการถอดรหัสโดยใช้แผนภาพแบบทรีลิส	129
ข.8 อัตราความผิดพลาดต่อบิตของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับ 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

รายการคำย่อ

Amplitude Shift Keying	ASK
Additive White Gaussian Noise	AWGN
Differential Overlapping Pulse Position Modulation	DOPPM
Differential Pulse Position Modulation	DPPM
Error function	erf
Frequency Shift Keying	FSK
Free-space optical communication systems	FSO
Multi-pulse Pulse Position Modulation	MPPM
Non return to zero	NRZ
Overlapping Multi-pulse Pulse Position Modulation	OMPPM
On-off Keying	OOK
Overlapping Pulse Position Modulation	OPPM
Probability Density Function	p.d.f.
Pulse Code Modulation	PCM
Probability of error	PE
Pulse Frequency Modulation	PFM
Pulse Position Modulation	PPM
Phase Shift Keying	PSK
Probability of word error	PWE
Pulse Width Modulation	PWM
Return to zero	RZ
Signal to Noise Ratio	SNR

รายการสัญลักษณ์

Average background noise per slot	Kb
Average photon per slot	Ks
Constraint Length	K
Generator Polynomial	g
Mean	m
Standard Deviation	σ
Threshold	m_T
Throughput	rT_s
Variance	σ^2

บทที่ 1

บทนำ

ระบบสื่อสาร (Communication System) มีบทบาทและความสำคัญต่อวิถีการดำรงชีวิตของมนุษย์ในแทบทุกด้าน ตั้งแต่ด้านสังคม วัฒนธรรม การทำงาน การติดต่อธุรกิจ การส่งผ่านข่าวสาร รวมไปถึงกิจกรรมทางการเมืองของมนุษย์ รูปแบบของระบบสื่อสารแบ่งตามลักษณะของสัญญาณที่ส่งได้สองรูปแบบคือระบบสื่อสารแบบอนาล็อก (Analog Communication) ซึ่งสัญญาณที่ส่งมีรูปร่างที่ไม่แน่นอนเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา และระบบสื่อสารแบบดิจิทัล (Digital Communication) ซึ่งมีสถานะของข้อมูลจำนวนสองสถานะคือ “0” และ “1” ปัจจุบันนิยมใช้มากกว่าระบบอนาล็อก เนื่องจากสามารถแก้ไขปัญหาของสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าและมีประโยชน์ด้านอื่นๆ อีกมากมาย

การสื่อสารทางแสงเกิดขึ้นเนื่องจากในปัจจุบันได้มีความต้องการช่องสัญญาณมากขึ้น จึงได้มีการพิจารณาช่วงสเปกตรัมของคลื่นแสง ที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในย่านความถี่ประมาณ 10^{14} - 10^{15} เฮิร์ตซ์มากขึ้น ซึ่งเมื่อเทียบกับคลื่นวิทยุ (Radio Frequency) ในย่านความถี่ประมาณ 10^6 - 10^9 เฮิร์ตซ์ ที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไป แล้วจะเห็นว่าแบนด์วิธของสัญญาณกว้างขึ้นถึงประมาณ 1 ล้านเท่า ซึ่งจะทำให้ข่าวสารที่ส่งไปนั้นมีความจุของข่าวสารจำนวนมาก อีกทั้งได้มีการประดิษฐ์เลเซอร์ในปี พ.ศ.2503 การสื่อสารด้วยแสงเลเซอร์นี้มีข้อที่น่าดึงดูดอยู่หลายประการ โดยเฉพาะการส่งข้อมูลด้วยแสงเลเซอร์ จะมีปริมาณข้อมูลที่ส่งในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรผันตามขนาดความกว้างของแบนด์วิธของคลื่น เนื่องจากเลเซอร์มีขนาดความกว้างของแบนด์วิธที่ค่าสูงมาก จึงสามารถส่งข้อมูลได้ครั้งละปริมาณมาก ซึ่งทำให้การส่งสัญญาณด้วยแสงมีการพัฒนามากขึ้น โดยยุคแรกนั้นจะนำไปใช้กับการสื่อสารระยะสั้นๆ และต่อมาจึงได้นำไปใช้กับการสื่อสารระยะไกลๆ เนื่องจากแบนด์วิธที่ได้ของการสื่อสารเชิงแสงที่เพิ่มขึ้นนี้และการเข้ามาของการสื่อสารความเร็วสูงในอนาคตที่มีความต้องการการส่งผ่านข้อมูล (Throughput) สูงขึ้นทำให้มีการนำการสื่อสารเชิงแสงไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อย่างแพร่หลายในปัจจุบันนี้ เช่น การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียม (Optical Intersatellite Link) การสื่อสารในอวกาศ (Deep Space Communications) หรือ การสื่อสารในเส้นใยแสง (Fiber Optic Communications) เป็นต้น [1] .

1.1 ความจำเป็นและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาของระบบสื่อสารเป็นไปอย่างต่อเนื่องและหลากหลาย เพื่อให้มีประสิทธิภาพการใช้งานสูงสุด รวมไปถึงการพัฒนาเพื่อแก้ปัญหาของช่องสัญญาณไม่เพียงพอต่อการใช้งานทางเลือกที่สามารถทำได้ คือการใช้งานช่องสัญญาณเชิงแสงซึ่งมีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง แต่

ปัญหาที่พบในระบบสื่อสารเชิงแสงที่มีการรับส่งในรูปแบบพัลส์ภายในมีโฟตอนที่มีลักษณะการเกิดแบบสุ่ม (Random) [2] ทำให้เกิดปัญหาในการตรวจจับข้อมูลจึงมีความผิดพลาดสูงนอกจากนี้ยังมีปัญหาในด้านของประสิทธิภาพของระบบการรับส่งข้อมูลต่ำอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนซึ่งเกิดจากแหล่งกำเนิดต่างๆ มากมายทั้งจากธรรมชาติในชั้นบรรยากาศและภายนอกโลกหรือจากที่มนุษย์สร้างขึ้น สัญญาณรบกวนเหล่านี้มักจะส่งผลทำให้สัญญาณมีรูปร่างที่แปรเปลี่ยนผิดเพี้ยนไปจากเดิมส่งผลให้ข้อมูลที่ถูกรวบรวมได้ที่ภาครับนั้นเกิดความผิดพลาดขึ้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาวิธีการรับส่งข้อมูลสำหรับระบบสื่อสารเชิงแสงและการป้องกันความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการรับส่งข้อมูล โดยมีการศึกษาประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณเชิงแสงในรูปแบบต่างๆ ได้แก่ การผสมสัญญาณแบบคีย์ออน-ออฟ (On-Off Keying) การผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชัน (Binary Pulse Position Modulation) การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชัน (Pulse Position Modulation) การผสมสัญญาณแบบมัลติพัลส์โพสิชัน (Multi-pulse Pulse Position Modulation) การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันเหลื่อม (Overlapping Pulse Position Modulation) การผสมสัญญาณแบบดิฟเฟอเรนเชียลพัลส์โพสิชัน (Differential Pulse Position Modulation) และทำการศึกษาวิธีการผสมสัญญาณแบบโฟตอนสี่ระดับ (4-level Photon Communication) มาใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน รวมถึงนำไปใช้งานร่วมกับการเข้ารหัสข้อมูลเพื่อแก้ไขความผิดพลาด (Error Control Coding) เพื่อให้ระบบสื่อสารเชิงแสงมีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีวัตถุประสงค์ของการวิจัยดังนี้

- เพื่อศึกษาการทำงานของระบบสื่อสารเชิงแสงและสามารถออกแบบการทำงานของระบบสื่อสารเชิงแสง
- เพื่อศึกษารหัสแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูลแบบต่างๆ และนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบสื่อสารเชิงแสง
- เพื่อพัฒนารูปแบบการทำงานของระบบสื่อสารเชิงแสงแบบ โฟตอนให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาวิจัยและพัฒนาารูปแบบการทำงานเชิงทฤษฎีสำหรับระบบสื่อสารเชิงแสงเพื่อป้องกันความผิดพลาดในการส่งข้อมูล ที่นำหลักการทำงานของการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันและการใช้รหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดมาใช้งานร่วมกัน เพื่อลดผลกระทบที่เกิดจากสัญญาณรบกวนในระบบสื่อสาร โดยได้มีการศึกษารูปแบบการทำงานของการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเพื่อนำมา

พัฒนาใช้งานร่วมกับรูปแบบของวิธีการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ และสามารถไปใช้งานร่วมกับ การเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดที่เหมาะสมทำให้ระบบการสื่อสารมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบโดยการจำลองการทำงานของระบบสื่อสารด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB จะถูกนำมาใช้สำหรับเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพของระบบสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับที่ไม่มีการใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณ เพื่อศึกษาคุณสมบัติและความเหมาะสมในการใช้งานของระบบสื่อสารที่นำเสนอ

1.4 ขั้นตอนในการวิจัย

การวิจัยเพื่อศึกษาและพัฒนาระบบสื่อสารเชิงแสงได้กำหนดขั้นตอนในการวิจัยไว้ตามลำดับดังนี้

- ศึกษาพื้นฐานของระบบสื่อสาร โดยทั่วไปและระบบสื่อสารเชิงแสง
- ศึกษาช่องสัญญาณแบบเกาส์และช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง
- ศึกษาการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ
- ศึกษาการสื่อสารแบบโฟตอนและโฟตอนหลายระดับ
- ศึกษาการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนวูลูชัน
- ออกแบบระบบสื่อสารเชิงแสง
- ออกแบบการนำระบบสื่อสารเชิงแสงมาใช้งานร่วมกับการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาด
- ออกแบบการนำการสื่อสารแบบโฟตอนมาใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน
- ออกแบบการนำการสื่อสารแบบโฟตอนมาใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันและการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาด
- ตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบสื่อสารที่ออกแบบทั้งหมดจากค่าอัตราความผิดพลาดของข้อมูล

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็นทั้งหมด 6 บท โดยบทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย และขอบเขตของการวิจัย ส่วนบทอื่นๆ มีเนื้อหาดังนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงพื้นฐานของระบบสื่อสารเชิงแสง รูปแบบของระบบสื่อสารเชิงแสง รูปแบบการสื่อสารในระบบสื่อสารเชิงแสง ช่องสัญญาณ (Channel) ซึ่งมีทั้งช่องสัญญาณแบบเกาส์

และช่องสัญญาณแบบปัวส์ซง หลักการผสมสัญญาณเชิงแสง รูปแบบการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ การสื่อสารแบบโฟตอนและการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ

บทที่ 3 กล่าวถึงหลักการพื้นฐานต่างๆ ของรหัสแก้ไขความผิดพลาด และรหัสแบบคอนโวลูชัน (Convolution Code)

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบระบบสื่อสารเชิงแสงที่ใช้งานโดยทั่วไป การออกแบบการนำการผสมสัญญาณแบบต่างๆ มาใช้งานในระบบสื่อสารเชิงแสง การออกแบบการนำการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดมาใช้งานในระบบสื่อสารเชิงแสง การออกแบบการนำการผสมสัญญาณมาใช้งานร่วมกับการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับและการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาด

บทที่ 5 กล่าวถึงผลของการทดสอบตามเงื่อนไขต่างๆ ที่กำหนดไว้ในบทที่ 4

ส่วนบทสุดท้ายกล่าวถึงผลการทดลอง การสรุปผลการวิจัย ปัญหาและอุปสรรคในการวิจัย และข้อเสนอแนะในการพัฒนา

บทที่ 2

ระบบสื่อสารเชิงแสง

ปัจจุบันระบบสื่อสาร (Communication Systems) มีบทบาทและความสำคัญต่อวิถีการดำรงชีวิตของมนุษย์ในแทบทุกด้าน ตั้งแต่ สังคม วัฒนธรรม การทำงาน การติดต่อธุรกิจ การส่งผ่านข่าวสาร รวมไปถึงกิจกรรมทางการเมืองของมนุษย์อย่างมาก ซึ่งระบบสื่อสารได้มีการพัฒนาให้มีหลากหลายรูปแบบเหมาะสมต่อการใช้งานในแต่ละประเภท อาทิ ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งมีการพัฒนาของระบบขึ้นมาให้สามารถใช้งานได้โดยอิสระและความคล่องตัวในการใช้บริการสื่อสาร ทำให้การติดต่อสื่อสารทำได้ง่ายขึ้น ระบบสื่อสารดาวเทียมที่เพิ่มขีดความสามารถในการรับส่งสัญญาณให้ครอบคลุมพื้นที่ส่วนต่างๆ บนโลกได้กว้างขวาง ทำให้สามารถถ่ายทอดเหตุการณ์สำคัญๆ ไปทั่วทุกหนแห่งในโลกพร้อมกัน รวมทั้งการสื่อสารทางแสง (Optical Communication) ซึ่งเป็นการสื่อสารมีการพัฒนาให้ใช้งานได้ทั้งในรูปแบบที่ไร้สายที่เรียกกันว่า Free-Space และรูปแบบที่ใช้สายที่สื่อสารผ่านทางเส้นใยแสง (Fiber Optic)

บทนี้เป็นการนำเสนอพื้นฐานของระบบสื่อสารเชิงแสง หลักการทำงานของระบบสื่อสารเชิงแสง การผสมสัญญาณเชิงแสง เพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการออกแบบงานวิจัยในบทที่ 4 ต่อไป

2.1 ความเป็นมาของระบบสื่อสารเชิงแสง

อดีตระบบการสื่อสารเกิดขึ้นมาจาก ทฤษฎีการสื่อสารทางไฟฟ้าของแซมมวล มอซ (Samuel F.B. Morse) ในปี พ.ศ. 2381 ทำให้เกิดการวิจัยเพื่อจะทำการส่งข่าวสารให้ได้ระยะทางไกลยิ่งขึ้น หลังจากนั้นได้ค้นพบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในปี พ.ศ. 2430 โดยเฮิร์ตซ์ (Hertz) จึงได้มีการพัฒนาระบบการสื่อสารขึ้นเป็นอย่างมาก โดยการนำเอาคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปใช้กันอย่างกว้างขวาง และทำให้เทคโนโลยีทางด้านการสื่อสารเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลให้ช่วงสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกใช้งานมากขึ้น

เนื่องจากการสื่อสารในระบบไฟฟ้าจะถูกส่งผ่านช่องสัญญาณสื่อสารของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะฝากข้อมูลไปกับตัวกลาง ปริมาณข้อมูลที่ถูกส่งผ่านตัวกลางไปนั้นจะสัมพันธ์กับความถี่ของคลื่นพาที่ใช้งาน ถ้ามีความถี่สูงขึ้นแบนด์วิดท์ก็จะสูงตามไปด้วย ทำให้ความจุของช่องสัญญาณมากขึ้น

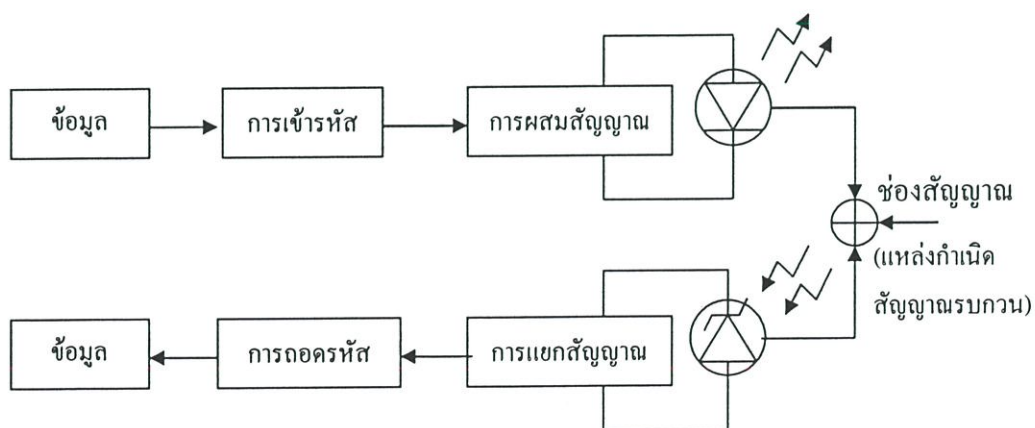
ปัจจุบันได้มีความต้องการช่องสัญญาณมากขึ้น การพิจารณาช่วงสเปกตรัมของคลื่นแสงที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่ในย่านความถี่ประมาณ 10^{14} - 10^{15} เฮิร์ตซ์ จึงมีความสำคัญมากขึ้น ซึ่งเมื่อเทียบกับคลื่นวิทยุ (Radio Frequency) ในย่านความถี่ประมาณ 10^6 - 10^9 เฮิร์ตซ์ ที่ใช้งานกันอยู่ทั่วไป แล้วพบว่าแบนด์วิดท์ของสัญญาณกว้างขึ้นถึงประมาณ 1 ล้านเท่า ซึ่งจะทำให้ข่าวสารที่

ส่งไปนั้นมีความจุของข่าวสารจำนวนมาก อีกทั้งได้มีการประดิษฐ์เลเซอร์ในปี พ.ศ.2503 การสื่อสารด้วยแสงเลเซอร์นี้มีข้อที่น่าดึงดูดอยู่หลายประการ โดยเฉพาะการส่งข้อมูลด้วยแสงเลเซอร์จะมีปริมาณข้อมูลที่ส่งในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรผัน ตามขนาดความกว้างของแบนด์วิดท์ของคลื่น เนื่องจากเลเซอร์มีขนาดความกว้างของแบนด์วิดท์ที่ค่าสูงมาก จึงสามารถส่งข้อมูลได้ครั้งละปริมาณมาก ซึ่งทำให้การส่งสัญญาณด้วยแสงมีการพัฒนามากขึ้น โดยยุคแรกนั้นจะนำไปใช้กับการสื่อสารระยะสั้นๆ และต่อมาจึงได้นำไปใช้กับการสื่อสารระยะไกลๆ จนถึงการสื่อสารระยะไกลระหว่างโลกและอวกาศ และการส่งสัญญาณระหว่างดาวเทียม เป็นต้น

เนื่องจากแบนด์วิดท์ที่ได้ของการสื่อสารเชิงแสงที่เพิ่มขึ้นนี้และการเข้ามาของการสื่อสารความเร็วสูงในอนาคตที่มีความต้องการอัตราการส่งผ่านข้อมูล (Throughput) สูงขึ้นทำให้มีการนำการสื่อสารเชิงแสงไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ อย่างแพร่หลายในปัจจุบันนี้ เช่น การเชื่อมโยงระหว่างดาวเทียม (Optical Intersatellite Link) การสื่อสารในอวกาศ (Deep Space Communications) หรือ การสื่อสารผ่านเส้นใยแสง (Fiber Optic Communications) เป็นต้น [2]

2.2 รูปแบบการสื่อสารเชิงแสง

ระบบสื่อสารทั่วไปนั้นประกอบด้วยส่วนประกอบไปด้วยภาคส่ง (Transmitter:Tx) ภาครับ (Receiver:Rx) และช่องสัญญาณการสื่อสาร (Channel) ในการทำงานของภาคส่งมีอยู่หลายส่วนด้วยกันซึ่งส่วนที่สำคัญส่วนหนึ่งคือส่วนของการผสมสัญญาณหรือเรียกว่าการมอดูเลชัน (Modulation) ซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกันเช่นการมอดูเลตเชิงมุม การมอดูเลตเชิงความถี่ ในส่วนของภาครับนั้นก็จะเป็นภาคของการมอดูเลตซึ่งจะต้องมีลักษณะการทำงานที่สอดคล้องกับส่วนของภาคส่ง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมระบบสื่อสารเชิงแสง

2.3 ช่องทางการสื่อสารสัญญาณในระบบสื่อสารเชิงแสง

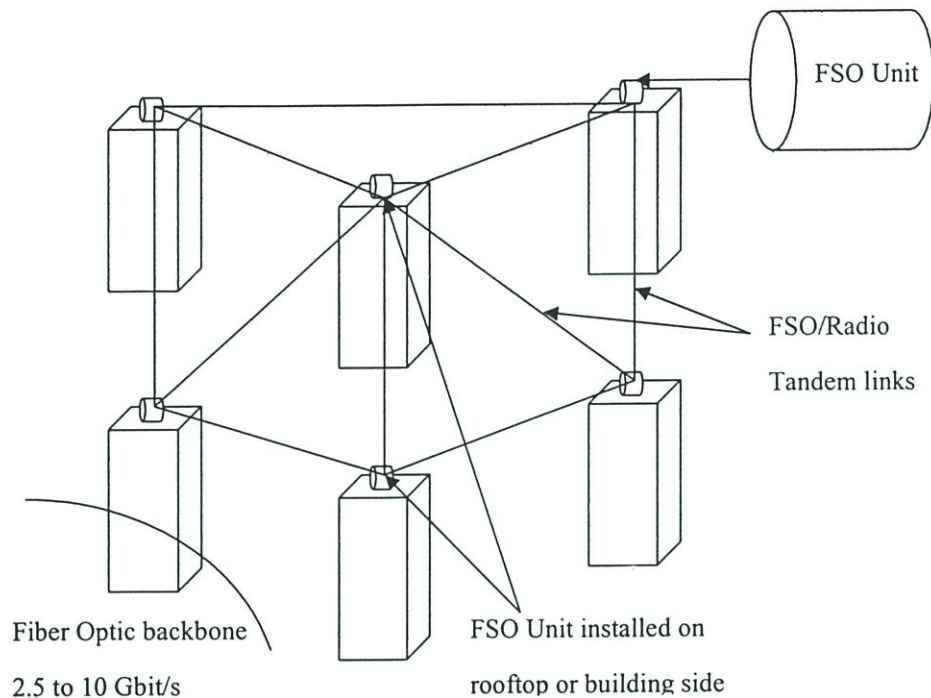
รูปแบบการสื่อสารเชิงแสงที่เป็นที่รู้จักกันในปัจจุบันได้แก่ ระบบสื่อสารทางแสงผ่านอากาศซึ่งเป็นระบบสื่อสารทางแสงแบบไร้สาย และระบบสื่อสารแบบใยแก้วนำแสงซึ่งเป็นระบบสื่อสารเชิงแสงแบบมีสาย ดังนั้นจึงมีผู้ที่สนใจและพัฒนาระบบสื่อสารเชิงแสงทั้งสองรูปแบบอย่างต่อเนื่องเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการใช้งานที่สูงขึ้นเป็นอย่างมาก

2.3.1 ระบบสื่อสารทางแสงผ่านอากาศ (Free-space optical communication system)

ระบบสื่อสารทางแสงผ่านอากาศ มีชื่อย่อทางเทคนิคว่า FSO ซึ่งเป็นชื่อย่อมาจาก Free-space optical communication system ระบบ FSO มีคุณสมบัติเป็นแบบไร้สาย (wireless) ชนิดเส้นตรงตามแนวสายตาหรือ LOS (Line-of-sight) ที่มีความสามารถในการสื่อสารข้อมูลที่มีแบนด์วิดท์สูงในระดับ Gb/s ได้ หลักการทำงานของ FSO เป็นไปในทำนองเดียวกับระบบเส้นใยแสงต่างกันตรงที่ตัวกลางที่ข้อมูลแสงเดินทางเป็นอากาศ

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของการนำ FSO เข้ามาใช้งานในย่านธุรกิจ ที่ต้องการสื่อสารข้อมูลกันระหว่างอาคารสำนักงานของกลุ่มธุรกิจที่อยู่ห่างกันไม่มาก ระบบนี้จะใช้เวลาในการติดตั้งไม่มาก เพียงแต่นำเทอร์มินอลของ FSO ซึ่งมีหน้าที่รับและส่งสัญญาณแสงไปติดตั้งบนหลังคาตึก แล้วก็เดินสายภายในอาคารเพิ่มเติมเพื่อต่อเข้ากับอุปกรณ์ภายในอาคาร โดยกลุ่มอาคารที่ติดต่อกันควรมีอย่างน้อยหนึ่งอาคารทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางต่อเชื่อมข้อมูลเข้ากับระบบแบ็กโบนหรือโครงข่ายสำหรับการติดต่อเชื่อมโยงกันระหว่างผู้ใช้ย่อยที่อาจเป็นคอมพิวเตอร์ จอภาพมอโนเตอร์ หรือโทรศัพท์ของเทอร์มินอลในแต่ละอาคาร ก็ใช้หลักการสื่อสารธรรมดาทั่วไป เพียงแต่สัญญาณแสงที่รับส่งระยะไกลจะถูกแปลงกลับมาเป็นสัญญาณไฟฟ้าส่งไปยังอุปกรณ์ต่างๆ ภายในอาคาร ตัวอย่างการใช้งานของระบบ FSO ได้แก่ การประชุมทางไกลหรือ VDO Conference ระหว่างกลุ่มที่ต่อ FSO ด้วยกันเอง หรืออาจมีการประชุมร่วมกับกลุ่มธุรกิจอื่นในต่างจังหวัดหรือต่างประเทศ โดยผ่านโครงข่าย และระบบ LAN และระบบ WAN (Wide Area Network) เป็นต้น โดยช่วงเวลาในการใช้งานเหมาะสำหรับกลุ่มธุรกิจที่ต้องการติดต่อสื่อสารเป็นแบบช่วงเวลาสั้นๆ ไม่กี่วัน หรือไม่กี่ชั่วโมง ที่ต้องการความรวดเร็วในการติดตั้งใช้งาน ที่สำคัญระบบนี้มีค่าใช้จ่ายต่ำ เพราะไม่ต้องคำนึงถึงการติดตั้งสายส่งสัญญาณระหว่างอาคารซึ่งมีราคาสูงมาก

ระบบ FSO ในปัจจุบันสามารถใช้ส่งข้อมูลได้ทั้งแบบอนาล็อกและดิจิทัลที่มีความเร็วสูงระดับ Gb/s โดยใช้แสงที่มีความยาวคลื่นเดียวเป็นคลื่นพาห้ (carrier) แต่ในอนาคตคาดว่าจะสามารถรับส่งข้อมูลได้สูงขึ้นอีกหลายเท่า เมื่อมีการใช้เทคนิคการทำงานแบบมัลติเพล็กซ์ข้อมูลเชิงแสงหรือ WDM (Wavelength Division Multiplexing) เข้ามาเพิ่ม ซึ่งเป็นเทคนิคที่ประกอบด้วยแสงหลายๆ ความยาวคลื่นส่งออกไปพร้อมกัน [3]



รูปที่ 2.2 ระบบ FSO เชื่อมโยงระหว่างตึกเพื่อสื่อสารข้อมูล เช่น VDO Conference



รูปที่ 2.3 องค์ประกอบพื้นฐานของระบบสื่อสารเส้นใยแสง

2.3.2 ระบบสื่อสารเส้นใยแสง (Fiber Optic Communications)

ระบบเส้นใยแก้วนำแสงมีองค์ประกอบพื้นฐานสามประการดังแสดงในรูปที่ 2.3 คือ ตัวกำเนิดแสง (Electrical-Optical Converter) เส้นใยแสง (Optical Fiber) และตัวรับแสง (Optical-Electrical Converter)

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงสามารถเดินทางได้ไกลจนสามารถนำสัญญาณเสียงหรือสัญญาณอื่นๆ เช่น ภาพข้อมูลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งที่อยู่ไกลกันมากตามที่ต้องการได้นั้น มิใช่มีแต่คลื่นวิทยุเท่านั้น คลื่นแสงหรือพลังงานแสงซึ่งจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็สามารถนำมาประยุกต์ในการนำสัญญาณจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งที่อยู่ห่างไกลได้เช่นกัน ต่างกันแต่ว่าในการนำสัญญาณดังกล่าวคลื่นวิทยุพร้อมสัญญาณที่ผสมอยู่จะกระจายไปในอากาศจากสายอากาศส่งไปในสายอากาศรับ สถานีรับจะจูน (Tune) รับคลื่นความถี่ที่ต้องการและถอดสัญญาณที่มีลักษณะเป็นสัญญาณเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่ผสมมากับคลื่นดังกล่าว เพื่อดำเนินการตามความต้องการต่อไป แต่ใน

กรณีของคลื่นแสงสัญญาณต่างๆ ที่ต้องการส่งในลักษณะสัญญาณไฟฟ้าจะถูกแปลงเป็นสัญญาณคลื่นแสงส่งผ่านไปตามตัวกลางตลอดเส้นทางจากจุดส่งจนถึงจุดรับที่ซึ่งสัญญาณแสงจะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับความเข้มของสัญญาณแสง เพื่อดำเนินการตามที่ต้องการต่อไป ตัวกลางที่นิยมใช้ในการให้คลื่นแสงเดินทางเพื่อการสื่อสารดังกล่าวได้แก่เส้นใยแสง (Optical Fiber)

โดยที่ในการสื่อสารทางแสงนั้นสามารถควบคุมสถานภาพแวดล้อมได้ เพราะเป็นการส่งคลื่นแสงไปตามสาย จึงได้มีการให้ความสำคัญด้านการพัฒนาอย่างมากทั้งในด้านเส้นใยแสงและอุปกรณ์แปลงสัญญาณ ฯลฯ จนมีผลให้เกิดข้อดีอื่นๆ ขึ้นหลายประการในปัจจุบัน เช่น สามารถทำให้การสูญเสียกำลังจากการเดินทางในเส้นใยแสงน้อยลง อุปกรณ์กำเนิดแสงที่มีการแตกกระจายของแสงน้อยลงทำให้สามารถมีแบนด์วิดท์ (Bandwidth) ของสัญญาณที่กว้างขึ้นเพราะมีการผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อย ฯลฯ ซึ่งเมื่อรวมกับข้อดีอื่นๆ เช่น การที่คลื่นแสงมีสเปกตรัมที่กว้างมาก เส้นใยแสงมีขนาดเล็กและเบา อีกทั้งไม่มีการรบกวนจากการเหนี่ยวนำเนื่องจากเส้นใยแสงไม่ใช่โลหะ ไม่เป็นสนิม ไม่ผุกร่อนและอุปกรณ์ที่ใช้ทำเส้นใยแสงนั้นหาได้ง่าย มีราคาถูก เช่นซิลิกอนออกไซด์ซึ่งมีอยู่ในทรายตามธรรมชาติ เป็นต้น ถ้าพิจารณาถึงข้อเสียของเส้นใยแสงนั้นจะเห็นว่าเส้นใยแสงแตกหักง่ายกว่าสายโลหะ และต้องการการเชื่อมต่อที่มีความแน่นอดูกต้อง จึงไม่เหมาะสมต่อการสื่อสารแบบเคลื่อนที่

ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้อดีข้อเสียแล้วจะพบว่าเส้นใยแสงมีข้อดีมากกว่า และเหมาะสมอย่างยิ่งกับการสื่อสารประจำที่ ทำให้ปัจจุบันนี้การสื่อสารทางแสงเป็นที่นิยมในการใช้งานมากขึ้นเรื่อยๆ เช่น ด้านการสื่อสารโทรคมนาคมและด้านโทรทัศนผ่านเส้นใยแสง เป็นต้น [4]

2.4 โฟตอน (Photon)

ธรรมชาติของแสงสามารถจะเปล่ง (Emitted) หรือแผ่รังสีจากอิเล็กตรอนที่วิ่งรอบนิวเคลียสของอะตอม แสงเป็นพลังงานที่อิเล็กตรอนปล่อยออกมาซึ่งเรียกกันว่า โฟตอน จะมีความแตกต่างไปจากอนุภาคของสสารทั่วไป ตรงที่โฟตอนไม่มีมวลและเคลื่อนที่ในสภาวะสุญญากาศด้วยความเร็ว คงที่ประมาณ 300,000 กิโลเมตรต่อวินาที หรือ 186,000 ไมล์ต่อวินาที และแสงยังสามารถที่จะเลี้ยวเบน เมื่อมี สิ่งกีดขวางได้เช่นเดียวกับคลื่น [5]

ในปี 1950 อัลเบิร์ต ไอสไตน์ ได้อธิบายแนวคิดพื้นฐานของโฟตอนซึ่งกล่าวถึงผลของโฟโตอิเล็กทริกที่แสงทำการเปลี่ยนรูปไปเป็นกระแสไฟฟ้า และอธิบายถึงแนวคิดของควอนตัมแสงซึ่งใช้ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวกับโฟตอน การแผ่กระจายของแสงไม่เหมือนกับการแผ่กระจายของคลื่นบริเวณผิวหน้าของน้ำที่มีความราบเรียบ แต่เหมือนพายุลูกเห็บซึ่งแต่ละโฟตอนเปรียบได้กับลูกเห็บแต่ละลูก เป็นการอธิบายตามทฤษฎีความสัมพันธภาพที่เป็นการเริ่มต้นสำหรับการค้นพบกลศาสตร์ควอนตัมและอื่นๆ ไปจนถึงการประดิษฐ์เลเซอร์

ในปัจจุบันการสื่อสารเชิงแสงนั้นใช้เลเซอร์และโฟโตนิกเทคโนโลยีในการรับส่งข่าวสาร ค่าที่แทนด้วยบิตเดี่ยวต้องมีการเข้ารหัสในรูปความเข้มของพัลส์แสงด้วยจำนวนโฟตอนนับพัน เทคนิคการตรวจนับโฟตอนในสเปกตรัมที่มองเห็นได้นั้นมีการพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง ปกติแล้วจะใช้สำหรับการตรวจจับแสงในระดับที่ต่ำ ในระบบสื่อสารที่มีความยาวคลื่นนั้นการตรวจจับโฟตอนเดี่ยวมีความยุ่งยากเนื่องจากแต่ละโฟตอนมีพลังงานต่ำ แต่สามารถแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้โดยการจำลองการทำงานของการทำงานของตรวจนับโฟตอนในความยาวคลื่นในระบบสื่อสารที่เหมาะสมในอินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs) อะวาเลนซ์โฟโตไดโอด ซึ่งเทคนิคนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับเครื่องมือทางด้านเส้นใยแสง [6]

การตรวจนับจำนวนโฟตอนนั้นพัลส์แสงนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับการสร้างการผสมสัญญาณทางด้านเชิงแสงที่มีการนำความเข้มแสงหลายๆ ระดับมาใช้ในการส่งสัญญาณ ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.8

2.5 ชนิดของช่องสัญญาณ

ช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารนั้นถือเป็นตัวกลางในการส่งผ่านสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับ ซึ่งช่องสัญญาณในระบบสื่อสารนั้นมีอยู่หลายประเภททั้งที่เป็นแบบ ช่องสัญญาณที่ใช้สายในการสื่อสาร หรือใช้ท่อนำสัญญาณโดยช่องสัญญาณในลักษณะนี้จะพบได้ในการใช้งานทั่วไป เช่น สายทองแดงในระบบโทรศัพท์ หรือเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งข้อมูลความเร็วสูง และช่องสัญญาณอีกแบบหนึ่งคือช่องสัญญาณแบบไร้สาย ซึ่งใช้การส่งคลื่นวิทยุในการติดต่อสื่อสารระหว่างภาคส่งและภาครับของระบบการสื่อสาร การใช้ช่องสัญญาณในลักษณะนี้จะพบได้ในระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือระบบการกระจายเสียงของ วิทยุ โทรทัศน์ เป็นต้น แต่ในทางปฏิบัติแล้วจะใช้ช่องสัญญาณทั้งสองแบบร่วมกัน ตามความเหมาะสม ตัวอย่างเช่นในระบบการสื่อสารของโทรศัพท์เคลื่อนที่นั้น การติดต่อระหว่างสถานีฐาน (Base Station) กับตัวโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile station) นั้นจะใช้ช่องสัญญาณแบบไร้สายและในส่วนของการติดต่อระหว่างสถานีฐาน (Base station) กับชุมสายโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Telephone Exchange : MTX) จะใช้สายเคเบิลหรือระบบไมโครเวฟ ซึ่งจะพบว่า กรณีนั้นช่องสัญญาณที่ใช้ในการติดต่อจะเป็นได้ทั้งช่องสัญญาณที่ใช้สายหรือไร้สายก็ได้ แต่ละช่องสัญญาณจะมีคุณสมบัติหรือคุณลักษณะ (Channel Characteristic) แตกต่างกันทั้งที่มีสัญญาณรบกวนหรือมีการลดทอน (Attenuation) และการซ้อนทับ (Intersymbol Interference) ในเส้นใยแสง เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาช่องสัญญาณสองรูปแบบคือช่องสัญญาณแบบเกาส์ (Additive White Gaussian Noise : AWGN) ซึ่งเป็นช่องสัญญาณสื่อสารที่ใช้งานโดยทั่วไปและช่องสัญญาณแบบปัวซอง (Poisson Noise) ซึ่งเป็นช่องสัญญาณที่ใช้งานในระบบสื่อสารเชิงแสง

2.5.1 ช่องสัญญาณแบบเกาส์ (Additive White Gaussian Noise : AWGN)

ช่องสัญญาณแบบเกาส์ (Additive White Gaussian Noise: AWGN) เป็นช่องสัญญาณที่เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารต่างๆ ซึ่งมีคุณลักษณะของช่องสัญญาณเป็นดังนี้

2.5.1.1 ความเป็นมาของการกระจายแบบเกาส์

การกระจายแบบเกาส์ (Normal Distribution or Gaussian Distribution) นำเสนอเป็นครั้งแรกโดย de Moivre ในบทความปี 1793 เป็นการประมาณค่าการกระจายแบบไบนอมิยัล (Binomial Distribution) ที่มีค่า n สูง ผลของงานวิจัยนี้ได้มีการทำวิจัยเพิ่มเติมโดย Laplace ในหนังสือ Analytical Theory of Probabilities ซึ่งเรียกว่าทฤษฎีของ de Moivre-Laplace หลังจากนั้น Laplace ได้นำทฤษฎีการกระจายแบบเกาส์ในการวิเคราะห์ข้อผิดพลาดของการทดลอง ในปี 1805 Legendre ได้นำเสนอวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least squares) ซึ่งถูกนำมาปรับเปลี่ยนให้เหมาะสมต่อการกระจายตัวแบบเกาส์ของข้อผิดพลาดโดยเกาส์ในปี 1809 [7]

2.5.1.2 รูปแบบความน่าจะเป็นแบบเกาส์

ตัวแปรสุ่มแบบเกาส์มีฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นดังนี้

$$p_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} e^{-(x-m_x)^2/2\sigma_x^2} \quad (2.1)$$

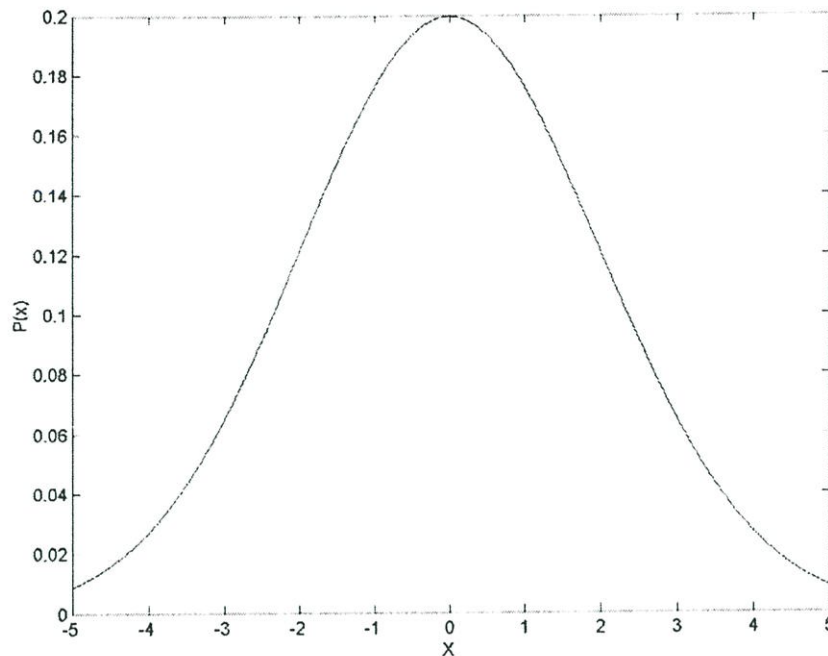
โดยที่ $\sigma_x > 0$ เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่า

เฉลี่ย $-\infty < m_x < \infty$ เป็นจำนวนจริงคงที่

ฟังก์ชันการกระจายของความน่าจะเป็นหาได้จาก

$$\begin{aligned} F_x(x) &= \int_{-\infty}^x p(u) du \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \int_{-\infty}^x e^{-(x-m_x)^2/2\sigma_x^2} du \\ &= \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{(x-m)/\sqrt{2}\sigma} e^{-t^2} du \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{2}\sigma}\right) \end{aligned} \quad (2.2)$$

โดยที่ $\operatorname{erf}(x)$ เป็น error function นิยามดังนี้



รูปที่ 2.4 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบเกาส์

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (2.3)$$

ซึ่ง PDF จะแสดงในรูปที่ 2.4

2.5.1.3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายแบบเกาส์

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายแบบเกาส์นั้นมีอยู่สองชนิดคือค่าเฉลี่ย (mean) และค่าความแปรปรวน (variance) ค่าเฉลี่ยของการกระจายแบบเกาส์เขียนสามารถหาได้จากสมการ

$$E(X) = \sum xP(X = x) \quad (2.4)$$

เมื่อนำค่า $P(X = x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} e^{-(x-m_x)^2/2\sigma_x^2}$ ไปแทนค่าในสมการจะได้

$$\begin{aligned} E(X) &= \sum_{x=0}^{\infty} x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} e^{-(x-m_x)^2/2\sigma_x^2} \\ &= m \end{aligned} \quad (2.5)$$

สรุปได้ว่าค่าเฉลี่ย (Mean) ของการกระจายแบบเกาส์เซียนมีค่าเท่ากับ m
ค่าความแปรปรวนของการกระจายแบบเกาส์เซียนสามารถหาได้จากสมการ

$$\text{var}(X) = E(X^2) - E^2(X) \quad (2.6)$$

เมื่อค่า $E(X) = \sum x^2 P(X = x)$

สามารถนำค่า $P(X = x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} e^{-(x-m_x)^2/2\sigma_x^2}$ ไปแทนค่าในสมการจะได้

$$\begin{aligned} \text{var}(X) &= \sum_{x=0}^{\infty} x^4 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} e^{-(x-m_x)^2/2\sigma_x^2} - \left(\sum_{x=0}^{\infty} x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} e^{-(x-m_x)^2/2\sigma_x^2} \right)^2 \\ &= \sigma^2 \end{aligned} \quad (2.7)$$

สรุปได้ว่าค่าความแปรปรวน (Variance) ของการกระจายเกาส์มีค่าเท่ากับ σ^2

จากคำพาราเมเตอร์ต่างๆ ที่กล่าวมาสามารถทำการจำลองการเกิดของสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียนโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาใช้ในการจำลองทำงานของระบบสื่อสารให้มีความสมบูรณ์ ดังที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.5.1.4 การสร้างสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เซียน

การสร้างสัญญาณรบกวนแบบเกาส์สามารถแบ่งได้เป็นสองแบบ [8] คือ การสร้างสัญญาณรบกวนแบบเกาส์โดยใช้อุปกรณ์อนาล็อก และการสร้างสัญญาณรบกวนเทียม (Pseudo random noise) โดยใช้อุปกรณ์ทางด้านดิจิทัล ซึ่งการสร้างสัญญาณรบกวนโดยใช้อุปกรณ์อนาล็อกนั้นจะมีความเที่ยงตรงเมื่อสภาพแวดล้อมเปลี่ยนแปลงไป ส่วนการสร้างโดยใช้อุปกรณ์ทางด้านดิจิทัลจะให้ความเที่ยงตรงและแน่นอนมากกว่าจึงนิยมสร้างและใช้ในการจำลองการทำงาน of ระบบสื่อสารเป็นอย่างมาก ซึ่งการสร้างสัญญาณรบกวนแบบเกาส์โดยใช้อุปกรณ์ทางด้านดิจิทัลจะสร้างจากตัวเลขแบบสุ่มโดยใช้วิธีการ transformation หรือการปฏิบัติงาน (Operation) ของตัวแปรสุ่มแบบยูนิฟอร์ม (Uniform random number generator) ซึ่งวิธีการที่เป็นที่รู้จักโดยทั่วไปมีสี่วิธี [9] คือ วิธี Ziggurat วิธี polar วิธี central limit และวิธี Box-Muller ซึ่งวิธีต่างๆ จะใช้ตัวแปรแบบสุ่มซึ่งมีการกระจายแบบยูนิฟอร์ม ซึ่งวิธีการสร้างตัวเลขสุ่มซึ่งมีการกระจายแบบยูนิฟอร์มจะใช้วิธีการบันทึกตัวเลขแบบสุ่มในตาราง (store table) และ Linear congruential algorithm ซึ่งรายละเอียดของ Linear congruential algorithm และการสร้างสัญญาณรบกวนแบบเกาส์แต่ละวิธีอธิบายได้ดังนี้

ก. Linear congruential algorithm

Linear congruential algorithm เป็นการสร้างตัวเลขสุ่มซึ่งมีการกระจายแบบยูนิฟอร์ม ซึ่งอัลกอริทึมมีดังนี้

$$X[n] = (aX[n-1] + c) \bmod m \quad (2.8)$$

โดย c ไม่เท่ากับ 0 a คือ multiplier c คือ increment m คือ modulus อัลกอริทึมนี้เรียกว่า mixed congruential generator ซึ่งค่าการกระจายแบบยูนิฟอร์มที่เป็นไปได้สูงสุดเท่ากับ m ซึ่งถ้า c เท่ากับ 0 จะได้

$$X[n] = (aX[n-1]) \bmod m \quad (2.9)$$

โดย a คือ multiplier c คือ increment m คือ modulus อัลกอริทึมนี้เรียกว่า multiplicative congruential generator [10] ซึ่งค่าการกระจายแบบยูนิฟอร์มที่เป็นไปได้สูงสุดเท่ากับ $m-1$ อัลกอริทึมนี้จะไม่ให้ $X[N] = 0$

ข. วิธี Central limit

การสร้างสัญญาณรบกวนแบบเกาส์โดยใช้ทฤษฎี Central limit ถ้า X เป็นตัวแปรสุ่มที่มีค่าเฉลี่ย m_x และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ_x ดังนั้น ตัวแปรสุ่ม X_N [11][12]

$$X_N = \frac{1}{\sigma_N \sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i - m_x) \quad (2.10)$$

โดย x_i ตัวเลขสุ่มซึ่งมีการกระจายแบบยูนิฟอร์ม การสร้างสัญญาณรบกวนแบบเกาส์โดยใช้ทฤษฎี Central limit หรือผลรวมของ N แบบ uniform ถ้าค่า N มีค่าไม่มากจะให้หาง (tails) ของ p.d.f. ที่ไม่ดี (poor) ซึ่งถ้ากำหนดค่า N มากจะทำให้ทำงานช้า

ค. วิธี Ziggurat

การสร้างสัญญาณรบกวนแบบเกาส์โดยวิธี Ziggurat จะใช้การกำเนิดตัวแปรสุ่มแบบเกาส์จากการกระจายแบบ Uniform แบบ Portable Mapping [9] ซึ่งวิธีนี้ได้รับการพัฒนาโดย Marsaglia และ Tsang วิธี Ziggurat นั้นจะเป็นอัลกอริทึมที่ทำงานได้รวดเร็ว แต่จะการสร้างจะทำงานผิดพลาดในส่วนของ หาง (tails) ของ p.d.f. (Probability Density Function)

ง. วิธี Box-Muller

การสร้างสัญญาณรบกวนแบบเกาส์โดยวิธี Box-Muller นั้นอัลกอริทึมจะสร้างจากตัวเลขสุ่มแบบ uniform สองตัว ซึ่งเป็นอิสระต่อกัน โดยมีค่าจาก $[0, 1]$ ซึ่งตัวแปรสุ่มสามารถคำนวณได้จาก [ต]

$$x_1 = \sqrt{-2\sigma^2 \ln(u_1)} \cos(2\pi u_2) \quad (2.11)$$

$$x_2 = \sqrt{-2\sigma^2 \ln(u_1)} \sin(2\pi u_2) \quad (2.12)$$

ที่ u_1 และ u_2 เป็นตัวเลขสุ่มแบบ uniform ซึ่งการแปลง (transformation) โดยใช้ polar coordination จะได้

$$x_1 = r \cos(\theta) \quad (2.13)$$

$$x_2 = r \sin(\theta)$$

ซึ่ง $r = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$ และ $\theta = \tan^{-1} \frac{x_2}{x_1}$

การสร้างสัญญาณรบกวนแบบเกาส์โดยวิธี Box-Muller [8] นี้ให้ความเที่ยงตรงสูงจึงเป็นที่นิยมใช้งานในการจำลองการทำงานของระบบสื่อสารโดยซอฟต์แวร์

จ. วิธี Polar

การสร้างสัญญาณรบกวนแบบเกาส์วิธี Polar เป็นปรับปรุงวิธี Box-Muller โดยใช้เทคนิคการกำจัด (rejection) โดยจะตัดการคำนวณ sine และ cosine ซึ่งตัวเลขสุ่มแบบเกาส์หาได้จาก

$$x_1 = v_1 \sqrt{-2\sigma^2 \frac{\ln(S)}{S}} \quad (2.14)$$

$$x_2 = v_2 \sqrt{-2\sigma^2 \frac{\ln(S)}{S}} \quad (2.15)$$

ที่ u_1 และ u_2 เป็นตัวเลขสุ่มแบบ uniform $[-1, 1]$ และ S เป็นผลรวมของ v_1^2 และ v_2^2 ซึ่งการแปลง (transformation) โดยใช้ polar coordination จะได้

$$v_1 = r \cos(\theta) \quad (2.16)$$

$$v_2 = r \sin(\theta)$$

ซึ่ง $S = r^2$ ตัวเลขสุ่มแบบเกาส์จากการแทน polar coordination หาได้จาก

$$x_1 = \cos(\theta)\sqrt{-2\sigma^2 \ln(S)} \quad (2.17)$$

$$x_2 = \sin(\theta)\sqrt{-2\sigma^2 \ln(S)} \quad (2.18)$$

การสร้างสัญญาณรบกวนแบบเกาส์วิธี Polar จะทำงานเร็วกว่าวิธี Box-Muller แต่ให้ความเที่ยงตรงที่น้อยกว่า [9]

สำหรับการสร้างทางฮาร์ดแวร์ด้านดิจิทัลนิยมใช้วิธี Box-Muller และวิธี central limit รวมกัน เนื่องจากการสร้างวิธี Box-Muller จะให้ค่า p.d.f. ที่ไม่เรียบ แต่เมื่อนำผลที่ได้จากวิธี Box-Muller มารวมกันแบบวิธี central limit ทำให้ค่า p.d.f. เรียบขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกรูปแบบของการสร้างสัญญาณรบกวนแบบเกาส์เขียนแบบ Box-Muller เนื่องจากมีความเที่ยงตรงสูง

2.5.2 ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง (Poisson Noise)

สัญญาณรบกวนที่มีลักษณะการกระจายตัวแบบปัวส์ซองมีชื่อเรียกว่าช็อตนอยส์ (shot noise) เป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ไดโอด และทรานซิสเตอร์ ซึ่งมีสาเหตุมาจากลักษณะธรรมชาติการไหลของกระแสที่มีความไม่ต่อเนื่อง มักจะมีการกระเพื่อมตัวขึ้นลงอย่างสุ่ม (Random) เช่น วงจรโฟโตดีเทคเตอร์ (photodetector) ที่ได้รับแสงที่มีระดับความเข้มคงที่ค่าหนึ่งอย่างต่อเนื่อง จะมีอิเล็กตรอนถูกปล่อยออกจากขั้วแคโทด (cathode) ไปยังขั้วอานอด (anode) การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนแต่ละตัวนั้นก่อให้เกิดพัลส์เล็กๆ ขึ้นหนึ่งครั้ง ดังนั้นปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขั้วอานอดจึงมีค่าเท่ากับผลรวมของพัลส์กระแส แต่การปล่อยอิเล็กตรอนมิได้เกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งโดยธรรมชาติแล้วอิเล็กตรอนจะถูกปล่อยออกอย่างสุ่มจึงเป็นสาเหตุให้จำนวนอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมีจำนวนที่ไม่แน่นอนและแกว่งขึ้นลงตามเวลา ส่งผลให้ปริมาณกระแสขณะใดขณะหนึ่งที่ไหลผ่านวงจรมีความไม่ต่อเนื่องและแปรตามเวลาอย่างสุ่ม [1]

2.5.2.1 ความเป็นมาของความน่าจะเป็นแบบปัวส์ซอง

ความน่าจะเป็นแบบปัวส์ซองมีลักษณะคล้ายกับการกระจายแบบไบโนเมียล (Binomial) ได้รับการคิดค้นโดยนักคณิตศาสตร์ชาวฝรั่งเศสที่ชื่อ Siméon-Denis Poisson (1781–1840) มีการตีพิมพ์ทฤษฎีนี้เมื่อปีค.ศ.1983 พัฒนาเพื่อใช้ทำนายความน่าจะเป็นของเหตุการณ์สุ่ม ตัวอย่างเช่น การประมาณค่าปริมาณการติดต่อโดยเฉลี่ยในระบบการสื่อสารจะใช้ความน่าจะเป็นแบบปัวส์ซองในการทำนายค่าความน่าจะเป็นที่การติดต่อมีค่าน้อยที่สุดและสูงที่สุดในการ ในระยะเวลาที่กำหนด [13] เป็นต้น

2.5.2.2 รูปแบบความน่าจะเป็นแบบปัวส์ซอง (Poisson Distribution)

ความน่าจะเป็นแบบปัวส์ซองเป็นการพิจารณาระบบซึ่งมีเหตุการณ์เกิดขึ้นอย่างแรนดอม ในแต่ละช่วงเวลา โดยมีค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดเท่ากับ λ เหตุการณ์ต่อวินาที

กำหนดให้ $m(t)$ คือจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างช่วงเวลา $[0, t]$ ดังนั้น $m(t)$ จึงเป็นกระบวนการเร็นดอมที่มีค่าเป็นตัวเลขจำนวนเต็ม และมีค่าเพิ่มขึ้นหรือคงที่อยู่ตลอดเวลา และแปรตามเวลาอย่างต่อเนื่อง

ให้แบ่งเวลา $[0, t]$ ออกเป็นช่วงสั้นๆ จำนวน n ช่วง โดยแต่ละช่วงมีคาบความยาวที่เท่ากันเท่ากับ $\delta = t/n$ โดยกำหนดให้เงื่อนไขต่อไปนี้เป็นจริงคือ

- ความน่าจะเป็นที่จะมีเหตุการณ์เกิดขึ้นมากกว่าหนึ่งเหตุการณ์ในช่วงเวลา δ มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับความน่าจะเป็นที่จะมีเหตุการณ์เกิดขึ้นหนึ่งครั้งหรือไม่มีเหตุการณ์เกิดขึ้นเลย
- การเกิดของเหตุการณ์ในช่วงเวลา δ หนึ่งเป็นอิสระและไม่ขึ้นกับสิ่งที่เกิดขึ้นกับช่วงเวลา δ อื่นๆ

จากเงื่อนไขทั้งสองข้อทำให้กระบวนการเร็นดอม $m(t)$ สามารถประมาณได้เป็นกระบวนการนับแบบไบนอมิยัล (Binomial Counting Process) ที่นับจำนวนครั้งของการทดลองที่ประสบความสำเร็จจากการทดลองทั้งหมด n ครั้ง

ถ้ากำหนดให้ความน่าจะเป็นของการทดลองที่สำเร็จหรือจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ มีค่าเท่ากับ p ค่าเฉลี่ยของจำนวนครั้งที่ทดลองสำเร็จหรือจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา $[0, t]$ คือ np จากค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดของเหตุการณ์มีค่าเท่ากับ λ ต่อวินาที ดังนั้นจำนวนเหตุการณ์โดยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในเวลา $[0, t]$ มีค่าเท่ากับ λt จึงสามารถสรุปได้ว่า $\lambda t = np$

ถ้ากำหนดให้ $n \rightarrow \infty$ นั่นคือ $\delta \rightarrow 0$ และ $p \rightarrow 0$ โดยที่ $\lambda t = np$ เป็นค่าคงที่ตลอดเวลา ดังนั้นการกระจายแบบไบนอมิยัลจะมีแนวโน้มเข้าสู่การกระจายแบบปัวส์ซองที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ λt [10]

รูปแบบการกระจายปัวส์ซอง (Poisson distribution) เป็นรูปแบบการกระจายที่ใช้สำหรับตัวแปรสุ่มไม่ต่อเนื่อง (Discrete) ซึ่งมีรูปแบบของสมการเป็นฟังก์ชันที่มีลักษณะแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลดังนี้

$$e^\lambda = 1 + \lambda + \frac{\lambda^2}{2!} + \frac{\lambda^3}{3!} + \dots \quad (2.19)$$

สามารถทำให้เป็นรูปแบบการสุ่มแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete random variable) โดยการหารด้วย $e^{-\lambda}$ ทั้งสองข้างของสมการ จะได้

$$1 = e^{-\lambda} + \lambda e^{-\lambda} + \frac{\lambda^2}{2!} e^{-\lambda} + \frac{\lambda^3}{3!} e^{-\lambda} + \dots \quad (2.20)$$

ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$1 = \frac{\lambda^0}{0!} e^{-\lambda} + \frac{\lambda^1}{1!} e^{-\lambda} + \frac{\lambda^2}{2!} e^{-\lambda} + \frac{\lambda^3}{3!} e^{-\lambda} + \dots \quad (2.21)$$

เมื่อผลรวมของฟังก์ชันทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 1 และทุกค่าเป็นค่าบวก สามารถสรุปได้ว่าเป็นค่าความน่าจะเป็นของฟังก์ชันซึ่งมีสมการทั่วไปเท่ากับ

$$P(X = x) = \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda} \quad \text{โดยที่ } x = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2.22)$$

กระบวนการเรณคอมดงสมการเรียกว่ากระบวนการปัวส์ซอง (Poisson Process)

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function: PDF) แบบปัวส์ซองสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$p_x(x) = \frac{dF_x(x)}{dx} \quad (2.23)$$

$p_x(x)$ เป็นค่าความน่าจะเป็นที่ค่า x อยู่ระหว่าง $x-dx$ ถึง x ซึ่งจะได้ Probability Density Function เท่ากับ

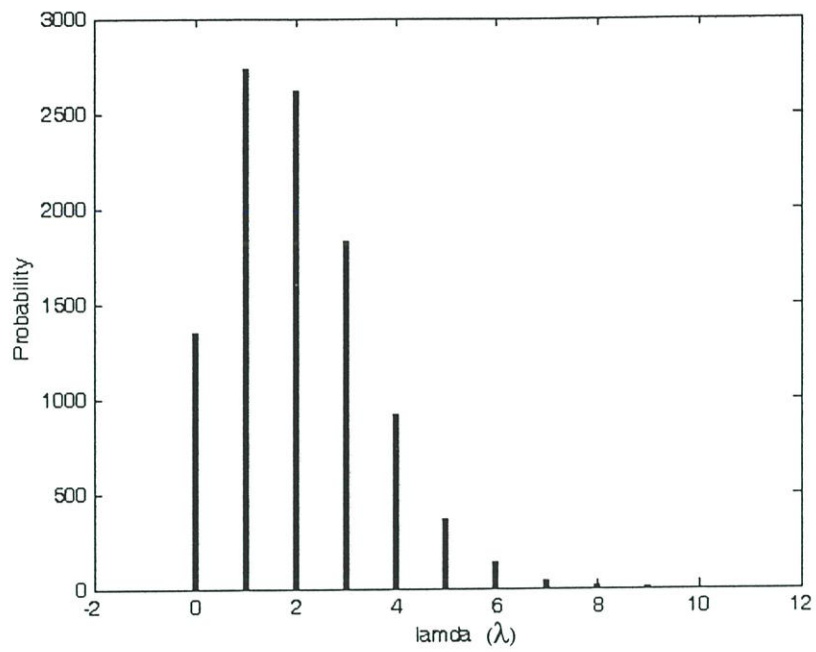
$$F_x(x) = \int_{-\infty}^{\infty} p_x(x) dx \quad (2.24)$$

$$P(a < X < b) = F_x(b) - F_x(a) = \int_a^b p_x(x) dx \quad (2.25)$$

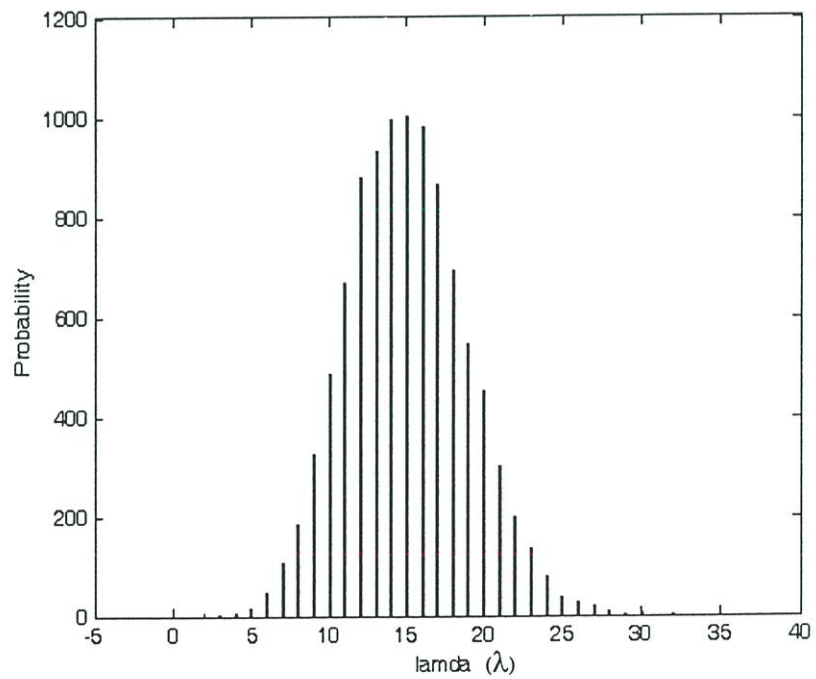
เมื่อแทนค่าจะได้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบปัวส์ซองดังนี้

$$\text{Prob}(k) = \int_{k-\epsilon}^{k+\epsilon} p_\lambda(m) dm = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \quad (2.26)$$

จากฟังก์ชันความน่าจะเป็นพบว่าลักษณะกราฟของการกระจายแบบปัวส์ซองนั้นจะเบ้ไปทางด้านของค่าเฉลี่ยดังแสดงในรูปที่ 2.5 แต่เมื่อมีค่า λ สูงมากกว่า 12 จะมีลักษณะการกระจายที่คล้ายกับการกระจายแบบยูนิฟอร์มที่เป็นรูปประฆังคว่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.5 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบปัวส์ซง เมื่อค่า lamda (λ) เท่ากับ 2



รูปที่ 2.6 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบปัวส์ซง เมื่อค่า lamda (λ) เท่ากับ 15

2.5.2.3 พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระจายแบบปัวส์ซอง

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายแบบปัวส์ซองนั้นมีอยู่ 2 ชนิดคือค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าความแปรปรวน (Variance)

ค่าเฉลี่ยของการกระจายแบบปัวส์ซองสามารถหาได้จากสมการ (2.4) ซึ่งเมื่อนำค่า

$$P(X = x) = \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda} \text{ ไปแทนค่าในสมการจะได้}$$

$$\begin{aligned} E(X) &= \sum_{x=0}^{\infty} x \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda} \\ &= \lambda \end{aligned} \quad (2.27)$$

สรุปได้ว่าค่าเฉลี่ย (Mean) ของการกระจายแบบปัวส์ซองมีค่าเท่ากับ λ

ค่าความแปรปรวนของการกระจายแบบปัวส์ซองสามารถหาได้จากสมการ (2.6) ซึ่งเมื่อนำค่า

$$P(X = x) = \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda} \text{ ไปแทนค่าในสมการจะได้}$$

$$\begin{aligned} \text{var}(X) &= \sum_{x=0}^{\infty} x^2 \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda} - \left(\sum_{x=0}^{\infty} x \frac{\lambda^x}{x!} e^{-\lambda} \right)^2 \\ &= \lambda \end{aligned} \quad (2.28)$$

สรุปได้ว่าค่าความแปรปรวน (Variance) ของการกระจายแบบปัวส์ซองมีค่าเท่ากับ λ [14]

จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่กล่าวมาสามารถทำการจำลองการกระจายแบบปัวส์ซองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อนำมาใช้ในการจำลองทำงานของระบบสื่อสาร ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

2.5.2.4 การสร้างความหนาแน่นความน่าจะเป็นแบบปัวส์ซอง

การสร้างความหนาแน่นของความน่าจะเป็นแบบปัวส์ซองที่มีลักษณะแบบตัวแปรสุ่มแบบไม่ต่อเนื่องทำให้ไม่สามารถคำนวณค่าได้โดยตรงจากสมการของค่า Probability Density Function เหมือนกับความน่าจะเป็นแบบเกาส์ แต่สามารถทำการคำนวณโดยอาศัยการสะสมค่าแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าในสมการ ซึ่งมีลักษณะการคำนวณอยู่สองรูปแบบคือการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีแบบโดยตรง (Direct Method) และการคำนวณแบบโดยอ้อม (Reject Method) [9] เพื่อนำไปใช้สำหรับกระบวนการสร้างสัญญาณรบกวนแบบปัวส์ซองและการกำเนิดของโฟตอนในพัลส์แสงที่มีลักษณะการเกิดแบบอาศัยค่าเฉลี่ยสำหรับการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ ซึ่งจะมีการออกแบบการทดสอบในบทที่ 4

ก. การสร้างโดยใช้ทฤษฎีโดยตรง (Direct Method)

การคำนวณโดยใช้ทฤษฎีโดยตรงนั้นเป็นการพิจารณาที่ค่า λ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 12 เนื่องจากเมื่อค่า λ มากกว่า 12 นั้น ค่า $e^{-\lambda}$ จะมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถประมาณค่าโดยโปรแกรมได้ ขั้นตอนการสร้างความน่าจะเป็นแบบปัวส์ซองเป็นดังนี้ [9]

- กำหนดค่าเริ่มต้น (m) เป็น -1 ค่าสุ่มเริ่มต้นที่เกิดจากกระบวนการสุ่มแบบยูนิฟอร์ม (t) เท่ากับ 1 และกำหนดค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบเพื่อหยุดการสุ่มค่า (g) ซึ่งมาจากสมการความน่าจะเป็นแบบปัวส์ซอง เท่ากับ $e^{-\lambda}$
- นำค่า t มาเปรียบเทียบกับค่า g โดยที่ถ้า $t > g$ จะทำการเพิ่มค่า m ขึ้น 1 ค่า
- ทำการสุ่มค่าขึ้นมาโดยกระบวนการแบบยูนิฟอร์ม (Uniform Random) แล้วนำไปคูณกับค่า t แล้วทำตามขั้นตอนที่ 2 ทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนค่า $t < g$ จึงหยุด จะได้ค่า m

ข. การสร้างโดยใช้ทฤษฎีโดยอ้อม (Reject Method)

การคำนวณโดยอ้อมเป็นการคำนวณเพื่อแก้ไขค่าที่ไม่สามารถคำนวณได้ที่เกิดจากค่า $e^{-\lambda}$ ลดลงต่ำมากจนไม่สามารถหาค่าได้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ วิธีการโดยอ้อมนั้นจะใช้กับค่า λ ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 12 ขึ้นไป ซึ่งลักษณะของการกระจายตัวแบบปัวส์ซองจะออกมาในรูปของระฆังคว่ำคล้ายกับการกระจายแบบเกาส์ [9]

2.6 การผสมสัญญาณเชิงแสง

เทคนิคการผสมสัญญาณสำหรับการสื่อสารเชิงแสงมีการแยกเป็นสองกลุ่มหลักได้แก่ เทคนิคการผสมสัญญาณแบบการตรวจจับโดยตรง (Direct Detection) และเทคนิคการผสมสัญญาณแบบร่วมนัย (Coherent Detection) ซึ่งการตรวจจับโดยตรงเป็นการส่งสัญญาณในลักษณะเบสแบนด์ (Baseband Transmissions) ที่มีสถานะเป็น “1” และ “0” สำหรับแหล่งกำเนิดแสง (Optical Source) เลเซอร์จะทำการส่งในลักษณะของการกระพริบของเลเซอร์ “เปิด” และ “ปิด” ตามลำดับ ส่วนการตรวจจับแบบร่วมนัยเป็นเทคนิคการผสมสัญญาณที่เหมือนกับการสื่อสารที่ใช้ความถี่ RF ซึ่งสัญญาณที่ตกกระทบที่ส่วนหน้า (Front End) เป็นการรวมกันของสัญญาณที่เข้ามา กับสัญญาณที่กำเนิดจาก Local Oscillator โดยการกระทำการตรวจจับแบบร่วมนัย จะได้ความไว (Sensitivity) ในการตรวจจับสัญญาณที่สูงกว่าแบบการตรวจจับโดยตรง

2.6.1 การผสมสัญญาณเชิงแสงโดยใช้การตรวจจับแบบโดยตรง (IM/DD)

โมเดลของระบบการสื่อสารแบบการตรวจจับโดยตรงแสดงได้ดังรูปที่ 2.7 โดยข่าวสารที่จะทำการส่งจะถูกทำการผสมกับคลื่นพาห้ทางแสงที่ส่วนของตัวผสมสัญญาณและทำการส่งไปยัง

ภากรับ จากนั้นระบบของเลนส์และตัวตรวจจับสัญญาณแสงจะทำการตรวจจับกำลังงานชั่วขณะ (Instantaneous power) ที่มาถึงภากรับโดยตรง [15]

การผสมสัญญาณแบบการตรวจจับโดยตรงสัญญาณไบนารีจะอยู่ในลักษณะ “เปิด” และ “ปิด” ของสัญญาณที่ภาคส่ง ซึ่งบอกถึงความแตกต่างของรูปแบบของคลื่นสัญญาณ โดยรูปแบบคลื่นทั่วไปของการตรวจจับโดยตรงจะเป็นการผสมสัญญาณแบบ Pulse Code Modulation (PCM) ที่เข้ารหัสแบบ NRZ (Nonreturn to zero) หรือแบบ RZ (Return to zero) สำหรับการสื่อสารเชิงแสงทั่วไปใช้แบบ biphase (Manchester) ซึ่งคุณสมบัติของรูปคลื่นมีองค์ประกอบสัญญาณ DC ค่ามี symbol/bit synchronization ในตัวเอง บางครั้งเรียกว่า self-clocking code แต่จะมีข้อเสียคือมีการขยายของแบนด์วิดท์ซึ่งไม่ได้รับความนิยมในการสื่อสารที่ต้องการความเร็วสูง

2.6.2 การผสมสัญญาณเชิงแสงโดยใช้การตรวจจับแบบร่วมนัย (Heterodyne Detection)

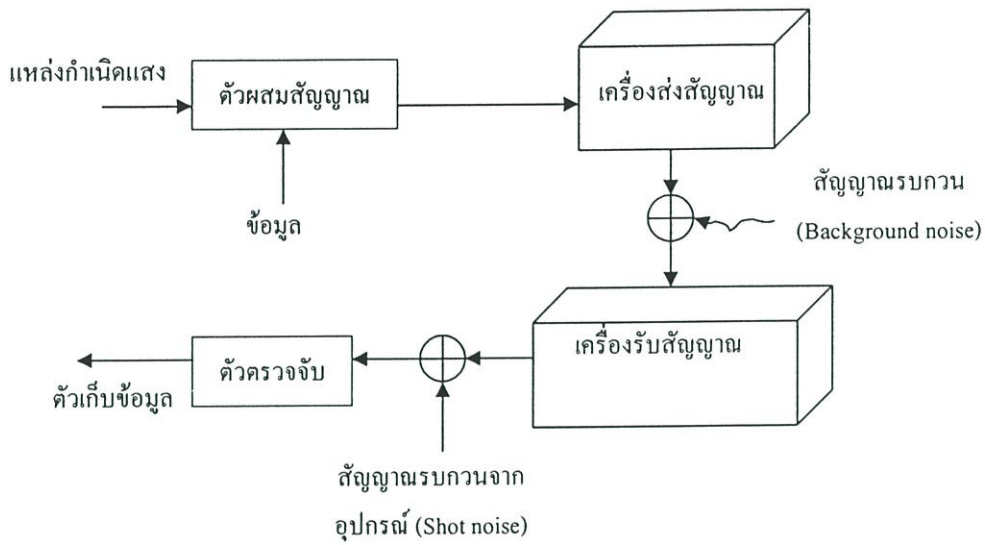
จากการตรวจจับโดยตรงจะสังเกตเห็นว่าจะเกิดสัญญาณรบกวนขึ้นถึง 2 ส่วนด้วยกันคือ สัญญาณรบกวนจากภายนอกและภายใน โดยจาก Background Noise ที่เข้ามาที่ตัวตรวจจับสัญญาณ และ Shot Noise ที่เกิดจากกระบวนการในตัวตรวจจับเอง ทางภากรับจะต้องต้านทานสัญญาณรบกวนเหล่านี้ให้ได้ เพื่อให้สามารถที่นำข้อมูลจากภาคส่งกลับคืนมาได้ ผลของระบบที่มีการตรวจจับแบบนี้ จะขึ้นอยู่กับความสามารถของระดับกำลังงานสัญญาณที่ส่งเท่านั้น

ในการตรวจจับแบบร่วมนัยที่ภากรับจะมีส่วนของ Local OSC laser เพิ่มเข้ามาโดยจะเป็นตัวกำเนิด Light wave field ไปผสมกับสนามทางแสงที่เข้ามาตลอดวงจรส่วนหน้า (Front end) ของ ตัวกระจกสะท้อน (Mirror) และทำการรวมคลื่นสัญญาณไปเข้าสู่ตัวตรวจจับสัญญาณแสง เพื่อเป็นการปรับปรุงการตรวจจับสัญญาณที่รับได้ โดยรูปแบบของระบบการสื่อสารแบบการตรวจจับโดยตรงแสดงได้ดังรูปที่ 2.8

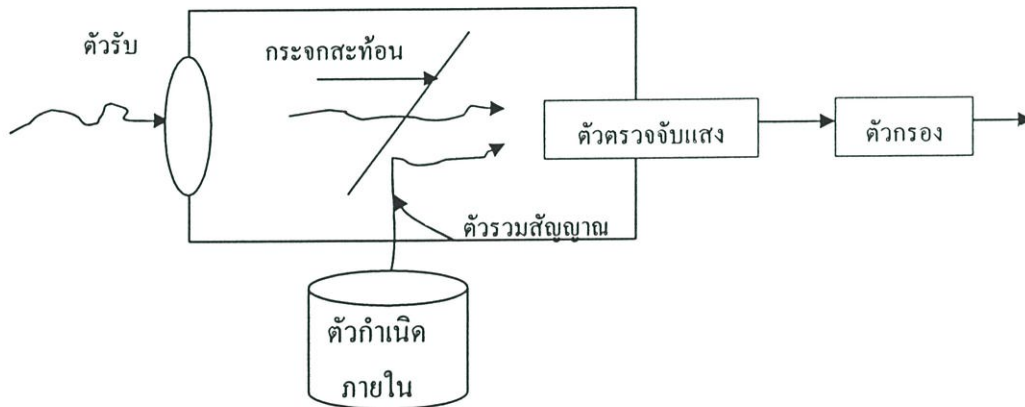
กระบวนการผสมนี้สามารถแยกได้เป็นสองชนิดคือ สัญญาณแบบ Heterodyne และ Homodyne โดยแบบ homodyne เป็นรูปแบบที่พัฒนามาจาก heterodyne ซึ่งจะมีความซับซ้อนมาก และไม่สามารถทำให้เป็นจริงได้ในอนาคตอันใกล้

การตรวจจับสัญญาณแบบ Heterodyne ระบบทั้งหมดจะมีความซับซ้อนและการลงทุนที่สูงกว่าแบบการตรวจจับโดยตรงแต่จะมีความไว (Sensitivity) ในการตรวจจับสัญญาณที่สูงกว่าแบบการตรวจจับโดยตรง การผสมสัญญาณที่ใช้จะเป็นการผสมสัญญาณเชิงแอมพลิจูด (Amplitude Shift Keying: ASK) การผสมสัญญาณเชิงมุม (Phase Shift Keying: PSK) และการผสมสัญญาณเชิงความถี่ (Frequency Shift Keying: FSK) ซึ่งเหมือนกับการผสมสัญญาณต่างๆ ไปในการสื่อสารความถี่วิทยุ (RF Communications) [15]

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผสมสัญญาณเชิงแสงที่มีการตรวจจับ โดยตรงซึ่งมีอยู่หลายวิธีการ ซึ่งจะกล่าวต่อไปในหัวข้อ 2.7



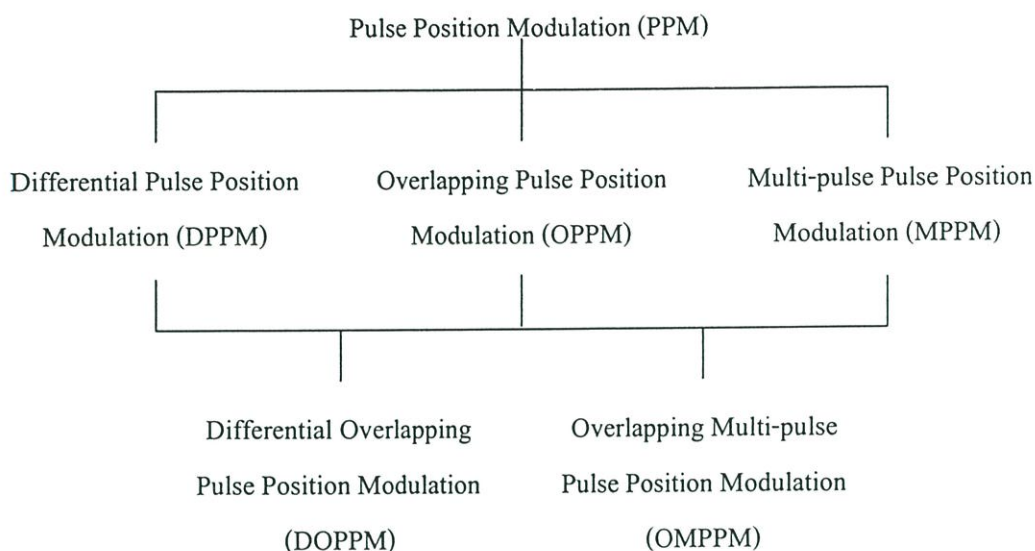
รูปที่ 2.7 รูปแบบการผสมสัญญาณเชิงแสงโดยใช้การตรวจจับแบบโดยตรง



รูปที่ 2.8 ภาครับแบบ Heterodyne Detection

2.7 รูปแบบการผสมสัญญาณเชิงแสง

การผสมสัญญาณที่มีการตรวจจับโดยตรงนั้นมีหลายรูปแบบได้แก่ การผสมสัญญาณแบบ Pulse Width Modulation (PWM) การผสมสัญญาณแบบ Pulse Frequency Modulation (PFM) และการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน (PPM) แต่เนื่องจากการผสมสัญญาณแบบ PWM และ PFM ไม่เหมาะต่อการใช้งานมากนัก จึงได้พิจารณาเฉพาะการผสมสัญญาณแบบ PPM ซึ่งเป็นเทคนิคการผสมสัญญาณเชิงแสงที่นิยมใช้ในปัจจุบัน จากข้อมูลการสำรวจในวงการสื่อสารเชิงแสงในปัจจุบันมีการพัฒนาของการผสมสัญญาณแบบ PPM จากรูปแบบง่ายๆ ไปจนถึงเทคนิคการผสมสัญญาณขั้นสูง ดังรูปที่ 2.9

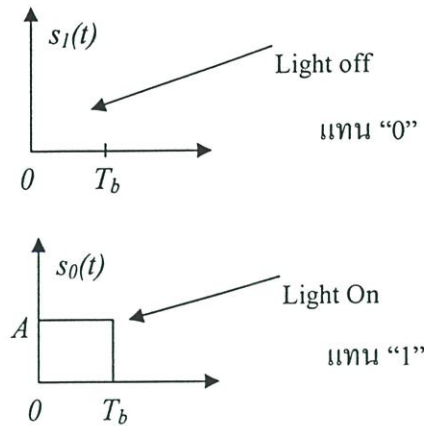


รูปที่ 2.9 การผสมสัญญาณรูปแบบต่างๆ ที่พัฒนาจากการผสมสัญญาณแบบ PPM

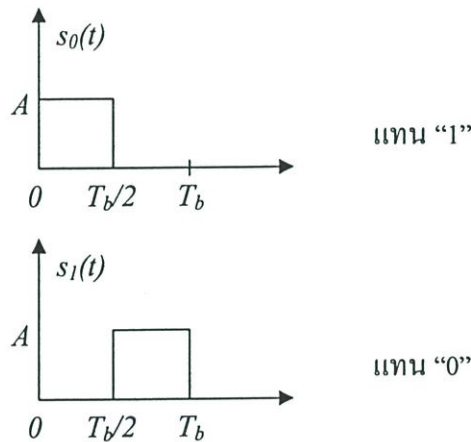
จากรูปที่ 2.9 การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ได้ถูกพัฒนามาเรื่อยๆ จนถึงปัจจุบันซึ่งเป็นการผสมสัญญาณแบบลูกผสม (Hybrid Modulation) เช่น Differential Overlapping Pulse Position Modulation (DOPPM), Overlapping Multi-pulse Pulse Position Modulation (OMPPM) ซึ่งเป็นลูกผสมระหว่างการผสมสัญญาณที่พัฒนามาจากการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน เช่น Differential Pulse Position Modulation (DPPM), Overlapping Pulse Position Modulation (OPPM), Multi-pulse Pulse Position Modulation (MPPM) ที่ใช้การส่งแบบหลายพัลส์ และการใช้เทคนิค Differential และ Overlapping ที่ช่วยเพิ่มอัตราการส่งผ่านข้อมูล (Throughput) ของการผสมสัญญาณแบบเดิมให้สูงขึ้นด้วย โดยเทคนิคการ Differential นั้นจะทำให้ความยาวของบิตอกสัญญาณที่ทำการส่งสั้นลงทำให้สามารถเพิ่มจำนวนสัญลักษณ์ในการส่งได้มากขึ้น ส่วนวิธีการ Overlapping นั้นเป็นวิธีที่ทำให้เกิดการเหลื่อมล้ำระหว่างสัญลักษณ์ทำให้เพิ่มวิสัยสามารถของการผสมสัญญาณให้สูงขึ้น ซึ่งจะไม่มีผลต่อแบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณเนื่องจากการเหลื่อมล้ำกันอยู่

2.7.1 การผสมสัญญาณแบบ On-off Keying หรือ Unipolar Line-Coding

การผสมสัญญาณแบบ On-off Keying (OOK) เป็นกรรมวิธีพื้นฐานสำหรับการผสมสัญญาณในขั้นสูงแบบอื่นๆ ซึ่งวิธีการส่งสัญญาณนั้นมีรูปแบบที่ง่ายต่อการเข้าใจ โดยข้อมูลดิจิทัลที่ส่งผ่านช่องสัญญาณจะได้รับการพิจารณาครั้งละ 1 บิต และจะมีสัญญาณอยู่สองรูปแบบที่ส่งออกเพื่อแทนข้อมูลดิจิทัลดังกล่าวซึ่งได้แก่การส่งสัญญาณแบบมีพัลส์แสง และแบบไม่มีพัลส์แสง [15] ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 รูปแบบการส่งสัญญาณแบบ On-off keying



รูปที่ 2.11 รูปแบบการส่งสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

2.7.2 การผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน (Binary Pulse Position Modulation: BPPM) หรือ Manchester Pulsed Signals

การผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเป็นกรรมวิธีพื้นฐานที่ง่ายที่สุดของการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ซึ่งจะมีการพิจารณาข้อมูลดิจิทัลที่ส่งผ่านช่องสัญญาณครั้งละ 1 บิตเช่นเดียวกับการผสมสัญญาณแบบ OOK แต่มีลักษณะของสัญญาณที่ใช้ในการส่งแตกต่างกัน [15] ซึ่งรูปแบบของการส่งสัญญาณแสดงดังรูปที่ 2.11

2.7.3 การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน (Pulse Position Modulation: PPM)

การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเป็นกระบวนการผสมสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูงในการสื่อสารเชิงแสง โดยจะทำการส่งพัลส์แสงเพียงหนึ่งพัลส์ในหนึ่งบิตของสัญญาณ ซึ่งในแต่ละพัลส์สามารถแทนค่าข้อมูลได้ตั้งแต่ 2 บิตขึ้นไป [15] โดยมีลักษณะการส่งสัญญาณดังรูปที่ 2.12

จากรูปกำหนดให้ในหนึ่งบล็อกสัญญาณจะทำการแบ่งย่อยออกเป็นสล็อตจำนวน M สล็อต โดยที่ M มีค่าเท่ากับ 2^k ซึ่ง k คือจำนวนบิตที่ใช้ในการผสมสัญญาณในแต่ละคาบเวลา T ในแต่ละสล็อตนั้นจะมีค่าคาบเวลาเท่ากับ T/M ซึ่งจะมีรูปแบบของสัญญาณที่แทนค่าของชุดบิตข้อมูลจำนวน M สัญญาณ [17] สามารถแทนค่าได้ดังสมการ

$$\int_0^T s_i(t)s_k(t)dt = A\delta_{ik} \quad (2.29)$$

โดยที่ $i, k = 0, 1, \dots, M-1$

A คือพลังงานของสัญญาณ

$$\delta_{ik} = \begin{cases} 1, & i = k \\ 0, & i \neq k \end{cases}$$

เมื่อแทนค่า $k = 2$ ดังนั้นค่า $M = 4$ ดังนั้นมีรูปแบบของการส่งสัญญาณทั้งสี่สัญญาณซึ่งแทนค่าสัญลักษณ์ 00, 01, 10 และ 11 ตามลำดับ มีลักษณะดังรูปที่ 2.13

2.7.3.1 อัตราการส่งผ่านข้อมูล (Throughput) ของการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

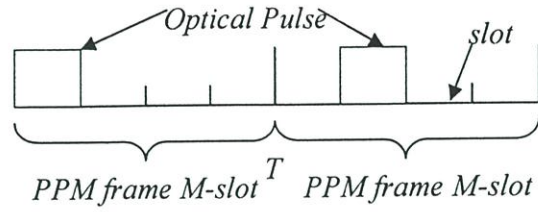
การพิจารณาอัตราการส่งผ่านข้อมูลของการมอดูเลตจะต้องพิจารณาภายใต้เงื่อนไขของกำลังงานและความกว้างของพัลส์ที่เหมือนกันและมีค่าคงที่ ถ้า Q เป็นจำนวนสล็อตในหนึ่งสัญลักษณ์ (symbol) T_s เป็นความกว้างในหนึ่งสล็อต (pulse width) และ r เป็นอัตราการส่งมีหน่วยเป็น nat/sec ในการเปรียบเทียบอัตราการส่งผ่านข้อมูลของการผสมสัญญาณในแต่ละแบบในเทอมของ nat/slot ภายใต้เงื่อนไขความกว้างของพัลส์ที่เหมือนกัน ดังนั้นจะได้ขอบเขตอัตราการส่งผ่านข้อมูลของ PPM [16] คือ

$$rT_s = \frac{\ln(Q)}{Q} \leq \frac{\ln(3)}{3} \quad \text{nat/slot} \quad (2.30)$$

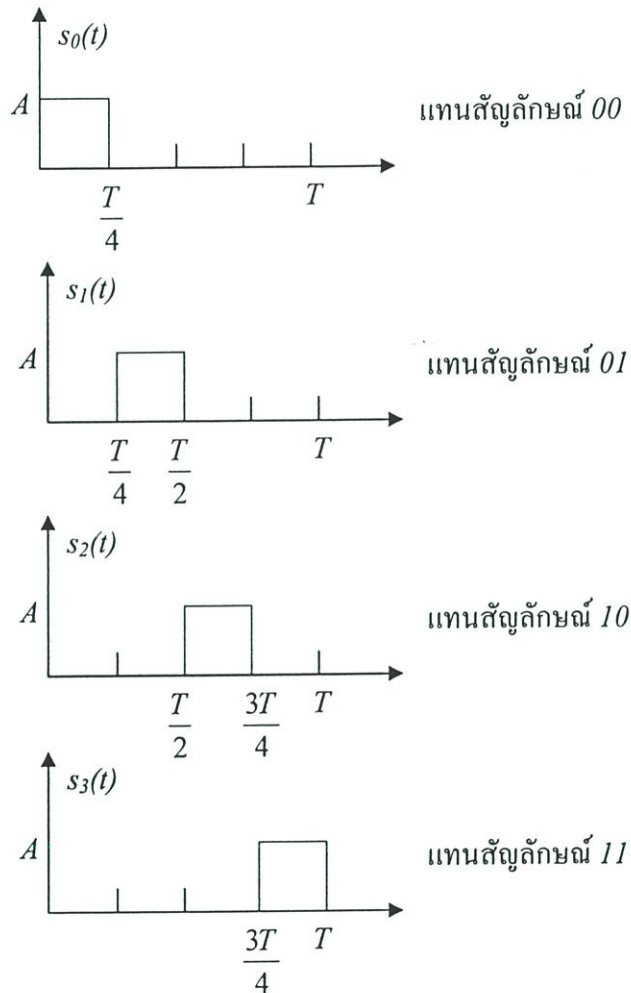
ค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูลของ PPM จะมีค่าสูงสุดได้ไม่เกิน 3-ary PPM ที่ขนาดของ T_s คงที่

2.7.4 การผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation (MPPM)

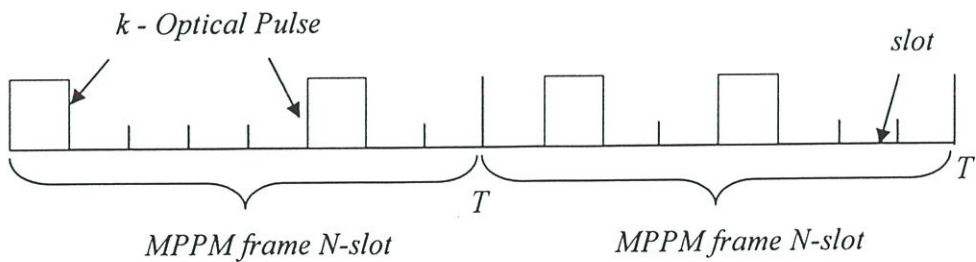
การผสมสัญญาณแบบ MPPM เป็นกระบวนการผสมสัญญาณที่พัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดท์ โดยจะทำการส่งพัลส์แสงจำนวน k พัลส์ในหนึ่งบล็อกสัญญาณ ซึ่งในแต่ละบล็อกสัญญาณจะมีจำนวนสล็อตเท่ากับ N สล็อต [18] โดยมีลักษณะการส่งสัญญาณดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.12 รูปแบบการส่งสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างของรูปแบบการแทนค่าของสัญญาณเมื่อค่า $k = 2$ ดังนั้นค่า $M = 4$



รูปที่ 2.14 รูปแบบการส่งสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation

จากรูปกำหนดให้ในหนึ่งบล็อกสัญญาณจะทำการแบ่งย่อยออกเป็นสล็อตจำนวน N สล็อต โดยที่ N เป็นค่าที่กำหนดขึ้นให้สอดคล้องกับจำนวนรูปแบบของการส่งสัญญาณ k มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ $N/2$ ซึ่งสามารถนำค่าทั้งสองมาหาความสัมพันธ์เพื่อหาจำนวนรูปแบบทั้งหมดที่สามารถทำการส่งแบบ Multi-pulse ได้ดังนี้

$$M = \binom{N}{k} = \frac{N!}{k!(N-k)!} \quad (2.31)$$

M คือจำนวนรูปแบบทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการส่งสัญญาณในหนึ่งบล็อกสัญญาณในแต่ละคาบเวลา T ในแต่ละสล็อตนั้นจะมีค่าคาบเวลาเท่ากับ T/N จำนวนบิตที่สามารถใช้ในการส่งสัญญาณมีค่าเท่ากับ $\log_2 M$ บิต

แทนค่า $N = 4$ และ $k = 2$ ดังนั้นค่า $M = 6$ ดังนั้นมีรูปแบบของการส่งสัญญาณทั้งหมด 6 รูปแบบ สามารถแทนจำนวนบิตจำนวน 3 บิต ซึ่งแทนค่าสัญลักษณ์ 000, 001, 010, 011, 100 และ 101 ตามลำดับ มีลักษณะดังรูปที่ 2.15

2.7.4.1 อัตราการส่งผ่านข้อมูล (Throughput) ของการผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse

Pulse Position Modulation

จากรูปแบบของ MPPM มีค่าเป็น $M = \binom{N}{k}$ โดยที่ค่า k เป็นจำนวนของ k พัลส์ที่ส่งไปในหนึ่งสัญลักษณ์ซึ่งอยู่ในช่วง $1 \leq k \leq \frac{N}{2}$ ดังนั้นอัตราการส่งผ่านข้อมูลของ MPPM

$$rT_s = \frac{\ln \left[\binom{N}{k} \right]}{N} \quad \text{nat/slot} \quad (2.32)$$

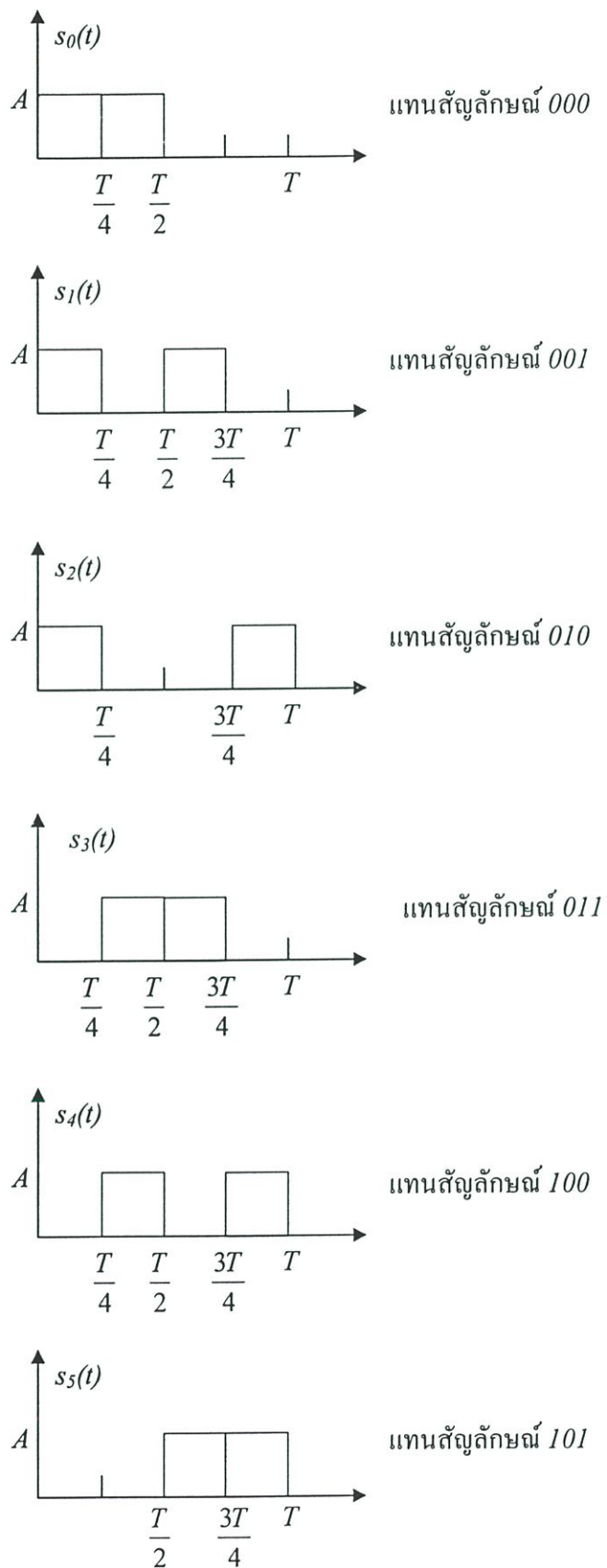
สามารถหาขอบเขตอัตราการส่งผ่านข้อมูลของ MPPM จากตัวอย่างใน Cover and Thomas จะได้

$$h\left(\frac{k}{N}\right) - \frac{\ln(1+N)}{N} \leq rT_s \leq h\left(\frac{k}{N}\right) \quad (2.33)$$

เมื่อ $h(x)$ เป็น Binary entropy function

$$h(x) = -x \ln(x) - (1-x) \ln(1-x) \quad (2.34)$$

และ $\frac{k}{N}$ เป็นเหมือนกับค่าโอกาสการเกิดของพัลส์สล็อตในลำดับของ MPPM [16]



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างของรูปแบบการแทนค่าของสัญญาณเมื่อค่า $N=4$, $k=2$ ดังนั้นค่า $M=6$

2.7.5 การผสมสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation (OPPM)

การผสมสัญญาณแบบ OPPM เป็นกระบวนการผสมสัญญาณที่พัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดท์ โดยการนำเอาเทคนิคการเหลื่อมล้ำ (overlapping) ใช้งานร่วมกับ การผสมสัญญาณแบบ PPM ซึ่งวิธีนี้จะยอมให้มีหลายตำแหน่งพัลส์ ต่อความกว้างพัลส์ และให้มีการเหลื่อมล้ำระหว่างสัญลักษณ์ ซึ่งจะไม่มีผลต่อแบนด์วิดท์ในการส่งเนื่องจากการเหลื่อมล้ำกัน อยู่ [19][20] โดยมีลักษณะการส่งสัญญาณดังรูปที่ 2.16

จากรูปกำหนดให้ N เป็นจำนวนของ pulse-position ต่อความกว้างพัลส์และ Q เป็นจำนวนของพัลส์ ที่ไม่ถูก overlap ในหนึ่งบล็อกลักษณะ ซึ่งสามารถนำค่าทั้งสองมาหาความสัมพันธ์เพื่อหาจำนวนรูปแบบทั้งหมดที่สามารถทำการส่งแบบ Overlapping ได้ดังนี้

$$M = N(Q-1)+1 \quad (2.35)$$

M คือจำนวนรูปแบบทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการส่งสัญญาณในหนึ่งบล็อกลักษณะ ในแต่ละคาบเวลา T ในแต่ละสล็อตนั้นจะมีคาบเวลาเท่ากับ T/NQ จำนวนบิตที่สามารถใช้ในการส่งสัญญาณมีค่าเท่ากับ $\log_2 M$ บิต

แทนค่า $N = 3$ และ $Q = 2$ ดังนั้นค่า $M = 4$ ดังนั้นมีรูปแบบของการส่งสัญญาณทั้งสิ้นสัญญาณ สามารถแทนจำนวนบิตจำนวน 2 บิต ซึ่งแทนค่าสัญลักษณ์ 00, 01, 10 และ 11 ตามลำดับ มีลักษณะดังรูปที่ 2.17

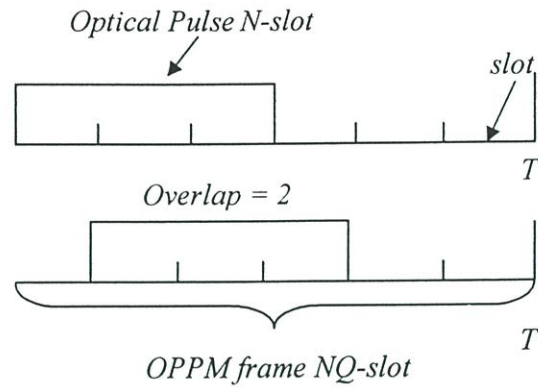
2.7.5.1 อัตราการส่งผ่านข้อมูล (Throughput) ของการผสมสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation

จากงานวิจัยของ G.M.Lee และ G.W.Schroeder [19] นำเสนอว่า OPPM เป็นรูปแบบการผสมสัญญาณที่เหมือนกับ PPM เพียงแต่จะยอมให้มี Pulse-position ต่อ pulse width มากกว่าหนึ่งตำแหน่ง แต่ยังคงไว้ซึ่งคุณสมบัติที่ดีของ PPM เช่น พลังงานในสัญญาณที่เท่ากัน

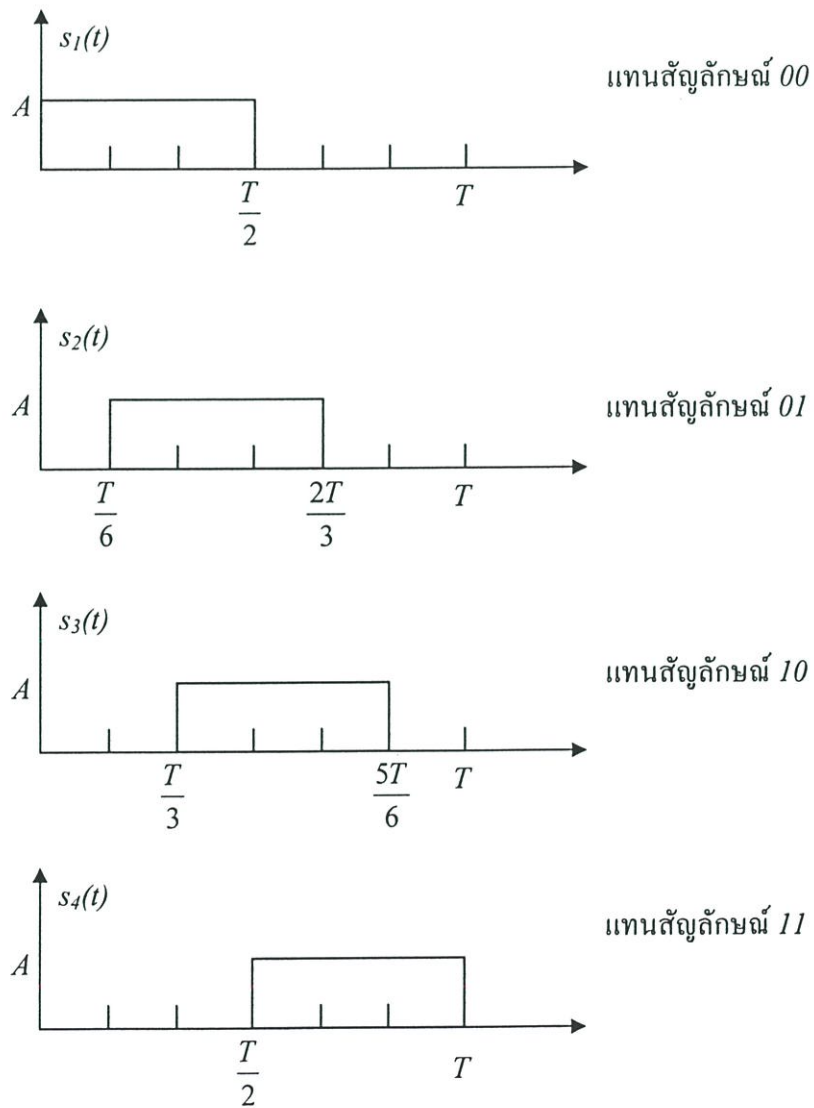
ถ้า Q เป็นจำนวน Pulse-position ในหนึ่ง สัญลักษณ์ โดยที่ $Q = \frac{T}{T_s}$ และ N เป็นจำนวนของ Pulse-position ต่อ pulse width (Index of overlap) เมื่อจำนวนของ OPPM Symbols ทั้งหมด หา ค่าได้จากสมการสำหรับที่ $N = 1$ ค่า OPPM Symbols จะมีค่าเท่ากับ PPM Symbols ดังนั้นจะได้ขอบเขต Throughput ของ OPPM มีค่าเท่ากับ

$$rT_s = \frac{\ln(N(Q-1)+1)}{Q} \leq \frac{\ln(N+1)}{2} \quad (2.36)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่า การเพิ่มค่า N จะทำให้ Throughput ของ OPPM เพิ่มขึ้นแต่จะมี ปัญหาเกี่ยวกับการ Synchronization และ โอกาสการเกิดการผิดพลาดเพิ่มเข้ามาด้วย [16]



รูปที่ 2.16 รูปแบบการส่งสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation



รูปที่ 2.17 ตัวอย่างของรูปแบบการแทนค่าของสัญญาณเมื่อค่า $N = 3$, $Q = 2$ ดังนั้นค่า $M = 4$

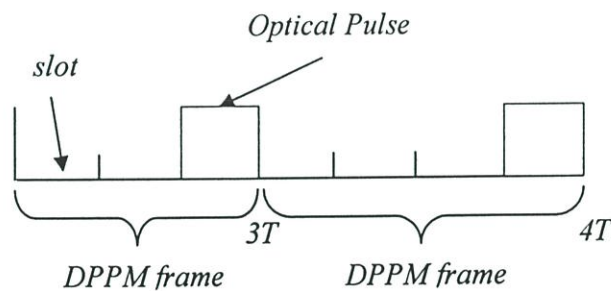
2.7.6 การผสมสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation (DPPM)

การผสมสัญญาณแบบ DPPM เป็นกระบวนการผสมสัญญาณที่พัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดท์ โดยใช้เทคนิค Differential มาใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบ PPM ซึ่งได้มาจากงานวิจัยของ D.Zwillinger [21] จะได้รูปแบบของการส่งสัญญาณดังรูปที่ 2.19 พบว่าสล็อตหลังพัลส์แสงในบล็อกลักษณะจะถูกทำการตรวจจับสัญญาณ (Detect) แล้วทำการลบทิ้งด้วยเทคนิค Differential และบล็อกลักษณะถัดมาจะเริ่มหลังพัลส์แสงในบล็อกลักษณะก่อนหน้านั้น ซึ่งจะทำให้ความยาวของบล็อกลักษณะที่ทำการส่งสั้นลงมีบล็อกลักษณะในการส่งมากขึ้น ทำให้สามารถเพิ่มจำนวนสัญลักษณ์จากการมอดูเลตแบบ PPM เดิม จำนวนสล็อต สูงสุดในการผสมสัญญาณแบบ DPPM มีค่าเท่ากับ 2^k โดยที่ k คือจำนวนบิตที่ใช้ในการผสมสัญญาณในแต่ละคาบเวลา T ซึ่งสามารถคำนวณหาจำนวนรูปแบบพัลส์ของการผสมสัญญาณแบบ DPPM ทั้งหมดเป็น

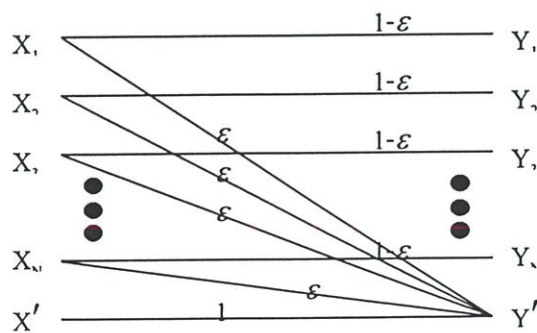
$$M = (N + 1) - \text{array } z \text{ channel} \tag{2.37}$$

$$\text{refer } N - \text{array } z \text{ channel}$$

โดยที่ $N =$ จำนวนความแตกต่างของ nonblank inputs ไปยัง z channel



รูปที่ 2.18 รูปแบบการส่งสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation



รูปที่ 2.19 รูปแบบของช่องสัญญาณแบบ (N+1)-ary Z

ตารางที่ 2.1 ข้อดีและข้อด้อยของการผสมสัญญาณแต่ละรูปแบบ

การผสมสัญญาณ	ข้อดี	ข้อด้อย
OOK	มีรูปแบบการผสมสัญญาณที่ง่าย ไม่ซับซ้อน	การใช้ตำแหน่งตัดสินใจทำให้เกิดความผิดพลาดสูง
BPPM	การเปรียบเทียบค่าในแต่ละคาบเวลา ทำให้มีการตัดสินใจดีกว่า OOK	ส่งข้อมูลได้เพียงบิตเดียวเท่านั้น
PPM	สามารถส่งบิตข้อมูลได้จำนวนมาก	การส่งบิตข้อมูลที่มีคาบเวลามากทำให้โอกาสเกิดสัญญาณรบกวนมาก
MPPM	เป็นการส่งหลายพัลส์แสงในคาบเวลาเดียวกันทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิดท์	เมื่อมีสัญญาณรบกวนมากกว่าพัลส์แสงใดพัลส์หนึ่งเพียงอันเดียวก็ทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจ
OPPM	การเหลื่อมล้ำของสัญญาณทำให้สัญญาณรบกวนที่เกิดนอกขอบเขตไม่มีผลต่อการตัดสินใจ	ความซับซ้อนในการสร้างรูปแบบในการส่งมากขึ้นเมื่อมีค่า N และ Q ที่สูงขึ้น
DPPM	สามารถส่งสัญญาณได้มากและเร็วขึ้น มี Throughput ที่สูงขึ้น	การสูญเสียโดยธรรมชาติของการชิงโครไนซ์ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของ DPPM channel ลดลง

2.8 การสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ

การสื่อสารเชิงแสงแบบโฟตอนหลายระดับ (Multilevel Photon Communication) เป็นการผสมสัญญาณที่นำเอาคุณลักษณะของแสงที่สามารถมีได้หลายความเข้มแสงและตัวตรวจนับแบบโฟตอนมาใช้งาน ลักษณะของระบบการสื่อสารเชิงแสงแบบโฟตอนนั้นจะมีความคล้ายคลึงกับการผสมสัญญาณแบบแอมพลิจูดที่มีหลายระดับสัญญาณยกเว้นแต่ค่าสัญญาณใน Constellations ซึ่งจะกำหนดโดยค่าของความเข้มของพัลส์แสง การศึกษาการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับนั้นเริ่มทำการศึกษาที่ระดับสัญญาณของโฟตอนแบบสี่ระดับ เพื่อเป็นพื้นฐานของการผสมสัญญาณของโฟตอนในระดับสูงที่มีความซับซ้อนมากขึ้นต่อไป ซึ่งเป็นการผสมสัญญาณที่เสนอโดย Tomohiko Uyematsu Kenichiro Kikuchi และ Kohichi Sakaniwa [22]

2.8.1 การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ (4-level Photon Communication)

การผสมสัญญาณแบบโฟตอนสี่ระดับเป็นกรรมวิธีการผสมสัญญาณของโฟตอนหลายระดับที่ง่ายที่สุด โดยข้อมูลดิจิทัลที่ส่งผ่านช่องสัญญาณจะได้รับการพิจารณาครั้งละ 2 บิต ซึ่งจะสามารถแทนด้วยสัญญาณพัลส์จำนวนสี่รูปแบบ ที่มีขนาดความกว้างพัลส์เท่ากับ T วินาที และมี

ค่าเฉลี่ยของโฟตอนเท่ากับ α_i ($i = 0, 1, 2, 3$) [22] ซึ่งลักษณะของสัญญาณทั้งสี่รูปแบบแสดงได้ดังรูปที่ 2.21

เมื่อค่าความน่าจะเป็นของการเกิดสัญญาณทั้งหมดมีค่าเท่ากัน ค่าเฉลี่ยของกำลังงานของการส่งมีค่าเท่ากับ

$$P_4 = \frac{1}{4T} \sum_{i=0}^3 \alpha_i \quad (2.38)$$

ลักษณะของสัญญาณของทั้ง 4 รูปแบบเป็นดังนี้

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 0 \\ \alpha_1 &= \frac{1}{9} (\alpha - 4n + 4\sqrt{n(\alpha + n)}) \\ \alpha_2 &= \frac{4}{9} (\alpha - n + \sqrt{n(\alpha + n)}) \\ \alpha_3 &= \alpha \end{aligned} \quad (2.39)$$

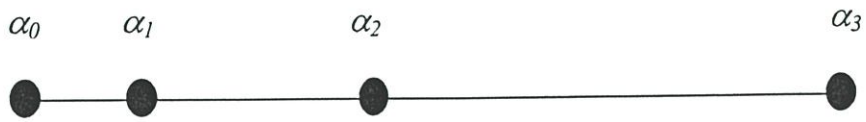
โดยสามารถแสดงรูปแบบของแต่ละระดับสัญญาณ ดังรูปที่ 2.21

ที่ภาครับของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับจะมีรูปแบบของการตัดสินใจอยู่สองรูปแบบ ซึ่งรูปแบบแรกเป็นรูปแบบที่นำเสนอขึ้นเรียกว่าการตัดสินใจแบบประมาณ ส่วนแบบที่สองจะเป็นการตัดสินใจแบบคำนวณ [23] ส่วนรายละเอียดของการประมาณค่าและการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

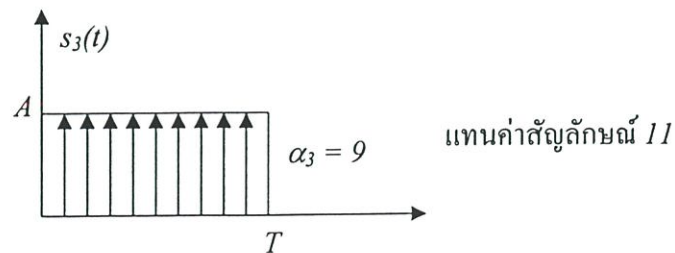
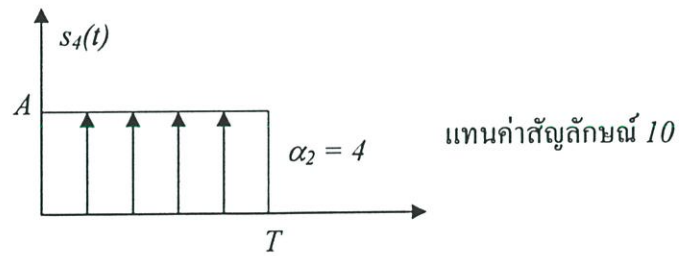
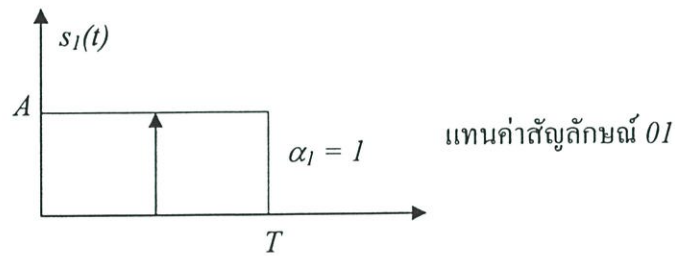
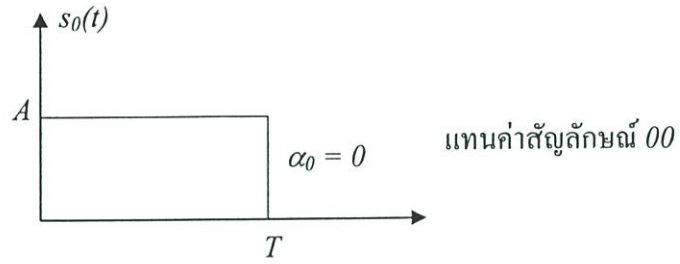
2.8.2 การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

การสื่อสารของโฟตอนแบบหลายระดับสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน (Binary Pulse Position Modulation : BPPM) โดยนำมาประยุกต์ใช้งานกับการสื่อสารแบบโฟตอนสามระดับซึ่งสามารถแทนด้วยสัญญาณแบบไบนารีขนาด 3 บิต ซึ่งจะสามารถแทนด้วยสัญญาณพัลส์จำนวน 6 รูปแบบ ซึ่งมีขนาดความกว้างพัลส์เท่ากับ $T/2$ วินาที และมีค่าเฉลี่ยของโฟตอนเท่ากับ α_i ($i = 0, 1, 2$) ลักษณะของสัญญาณของทั้งหกรูปแบบเป็นดังรูปที่ 2.22

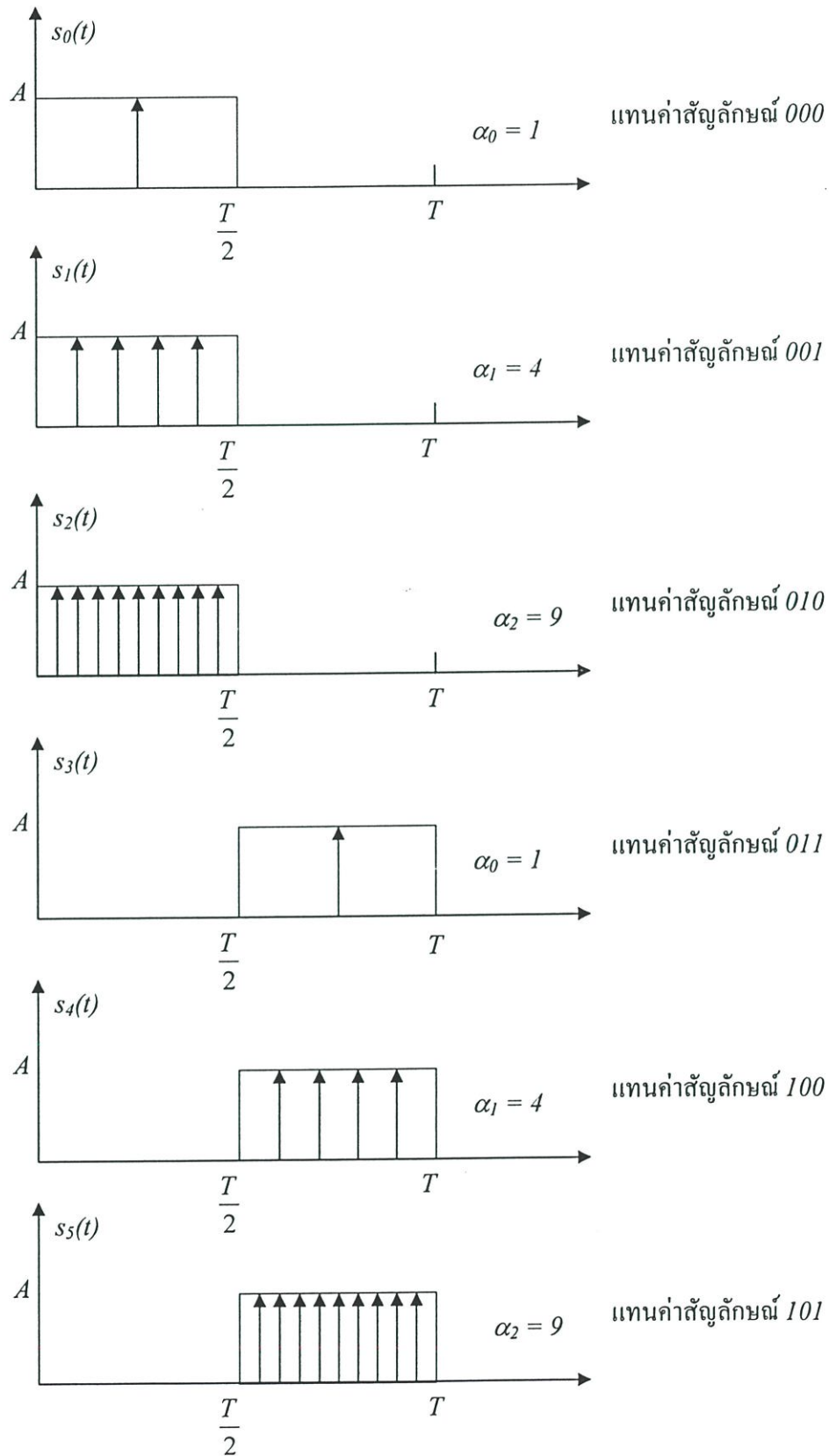
จากพื้นฐานที่กล่าวมาทั้งหมดนี้จะนำมาทำการออกแบบทดสอบกระบวนการผสมสัญญาณในรูปแบบต่างๆ โดยใช้พื้นฐานของระบบสื่อสารโดยทั่วไป เพื่อดูประสิทธิภาพของการทำงานของการผสมสัญญาณในรูปแบบต่างๆ และออกแบบรูปแบบการผสมสัญญาณเชิงแสงรูปแบบใหม่เพื่อนำมาใช้งานต่อไปในอนาคต



รูปที่ 2.20 รูปแบบของสัญญาณแบบโพตอนี่ระดับ



รูปที่ 2.21 รูปแบบของระดับสัญญาณสำหรับการผสมสัญญาณแบบโพตอนี่ระดับ



รูปที่ 2.22 รูปแบบของระดับสัญญาณสำหรับการผสมสัญญาณแบบโพตอนที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบ ไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

บทที่ 3

รหัสแก้ไขความผิดพลาดของข้อมูล

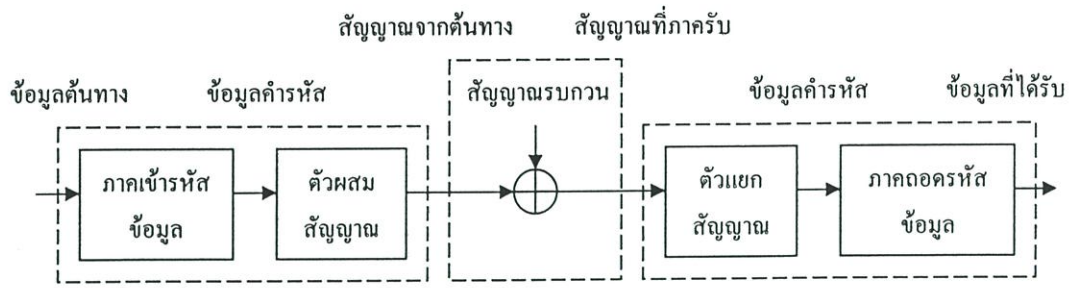
รหัสแก้ไขความผิดพลาด (Error Control Coding) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแก้ไขความผิดพลาดจากการรับส่งข้อมูลในระบบสื่อสารดิจิทัล ซึ่งความผิดพลาดที่เกิดขึ้นนั้นเกิดจากสาเหตุหลายประการ และสาเหตุเหล่านี้ไม่สามารถคาดคะเนเวลาการเกิดได้ โดยเฉพาะสาเหตุที่สำคัญคือการรบกวนจากสัญญาณรบกวน (Noise) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้รหัสดังกล่าวเพื่อป้องกันหรือแก้ไขความผิดพลาดจากสาเหตุเหล่านี้

ในบทนี้จะกล่าวถึงรหัสแก้ไขความผิดพลาดแบบคอนวูลูชัน และการถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บีซึ่งเป็นวิธีการแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลที่รับได้จากสัญญาณรบกวนให้ถูกต้องที่มีประสิทธิภาพส่งผลให้ข้อมูลที่ถูกส่งไปในระบบสื่อสารนั้นมีความน่าเชื่อถือ

3.1 หลักการทำงานพื้นฐานของวิธีการเข้ารหัส

วิธีการเข้ารหัสถูกพัฒนาขึ้นเพื่อลดอัตราการเกิดความผิดพลาดของข้อมูลที่ถูกส่งผ่านระบบสื่อสาร สามารถทำให้อัตราการเกิดความผิดพลาดของข้อมูลลดลงโดยปราศจากการเพิ่มกำลังของเครื่องส่งให้สูงขึ้นได้ ซึ่งในการทำงานนั้นข้อมูลดิจิทัลที่ถูกส่งผ่านระบบสื่อสารจะถูกนำมาผ่านกระบวนการเข้ารหัส (Encoding) เพื่อแปลงลักษณะของข้อมูลให้กลายเป็นข้อมูลเข้ารหัส (Codeword) โดยเป็นรูปแบบของข้อมูลดิจิทัลที่ถูกส่งผ่านระบบสื่อสาร สำหรับภาครับจะมีการนำข้อมูลที่แสดงถึงข้อมูลเข้ารหัสที่ถูกต้องมาผ่านกระบวนการถอดรหัส (Decoding) เพื่อแปลงข้อมูลให้กลายเป็นข้อมูลดิจิทัลเพื่อนำไปใช้งานต่อไป พร้อมทั้งทำการแก้ไขข้อมูลให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

รูปแบบของรหัสที่ถูกใช้งานมีหลายรูปแบบด้วยกัน โดยทั่วไปแล้วมีการแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ รหัสแบบบล็อกและรหัสแบบคอนวูลูชัน สำหรับรหัสแบบบล็อกเป็นรูปแบบแรกของรหัสที่ถูกพัฒนาขึ้นถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานหลายประเภท ตัวอย่างเช่น รหัสแฮมมิง (Hamming Code) และรหัสรีด-โซโลมอน (Reed Solomon Code) ที่ถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์สำหรับบันทึกข้อมูลเพื่อป้องกันความผิดพลาด เป็นต้น สำหรับรหัสแบบคอนวูลูชันถูกพัฒนาขึ้นเพื่อรองรับการใช้งานสำหรับระบบสื่อสารที่มีการส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วสูง เช่น ระบบสื่อสารผ่านดาวเทียม และ ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ เป็นต้น โดยมีการพัฒนารูปแบบในการทำงานของภาคถอดรหัสเพื่อรองรับการทำงานของรหัสแบบคอนวูลูชันหลายรูปแบบ เช่น วิธีการถอดรหัสแบบ Sequential Decoding วิธีการ Majority-Logic หรือ Threshold Decoding และ วิธีการ Maximum a Posteriori (MAP)



รูปที่ 3.1 แบบจำลองระบบสื่อสารที่มีการนำวิธีการเข้ารหัสมาใช้งาน

สำหรับวิธีการถอดรหัสที่นิยมใช้งานได้แก่วิธี Viterbi decoding เนื่องจากประสิทธิภาพในการแก้ไขข้อผิดพลาดมีความเหมาะสมและวงจรที่ใช้งานไม่ซับซ้อน เนื่องจากความต้องการในการใช้งานระบบสื่อสารที่มีการส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วที่สูงขึ้นภายใต้ขนาดแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณที่จำกัด ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนารูปแบบของรหัสให้สามารถใช้งานร่วมกับระบบสื่อสารที่มีการมอดูเลตแบบหลายระดับได้ ตัวอย่างเช่นรหัส Trellis-Coded Modulation (TCM) ซึ่งเป็นวิธีการที่ถูกพัฒนาขึ้นมาจากรหัสคอนโวลูชัน [24]

3.2 รหัสแบบคอนโวลูชัน

การเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการถอดรหัสแบบวิเทอโรบี (Viterbi Algorithm) ซึ่งเป็นวิธีการป้องกันการผิดพลาดล่วงหน้า (Forward Error Correction :FEC) เป็นเทคนิครูปแบบหนึ่งที่ใช้แก้ไขการผิดพลาดของข้อมูลที่รับได้จากสัญญาณรบกวนให้ถูกต้องที่มีประสิทธิภาพ ทำให้ข้อมูลที่ส่งไปในระบบสื่อสารนั้นมีความน่าเชื่อถือมากขึ้น สำหรับการถอดรหัสคอนโวลูชันนั้นถูกค้นพบโดย Elias ในปี 1955 ซึ่งวิธีการถอดรหัส คอนโวลูชัน มีอยู่หลายแบบด้วย แต่วิธีการถอดรหัสแบบวิเทอโรบีซึ่งเป็นวิธีที่มีการนิยมใช้งานมากที่สุด การถอดรหัสแบบวิเทอโรบีค้นพบโดยไวเทอโรบีในปี 1967 ซึ่งจะมีลักษณะการทำงานของไวเทอโรบี เป็นแบบ Maximum-likelihood decoding algorithm ซึ่งหมายถึงในการทำงานของการถอดรหัสนั้น จะทำการค้นหาเส้นทางของข้อมูลในแผนภาพทรีลลิส (Trellis Diagram) ที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ส่งมามากที่สุด [25]

3.2.1 หลักการเข้ารหัส

การทำงานของวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชันนั้น ข้อมูลอินพุต (k) จะถูกส่งเข้าสู่วงจรเข้ารหัสคอนโวลูชันอย่างต่อเนื่องตามลำดับเวลาการทำงานของ ชิฟรียิสเตอร์ ข้อมูลจากการเข้ารหัส (n) เกิดจากการนำข้อมูลอินพุต (k) และข้อมูลภายในชิฟรียิสเตอร์มาบวกแบบมอดูโล 2 (Modulo 2) ตาม

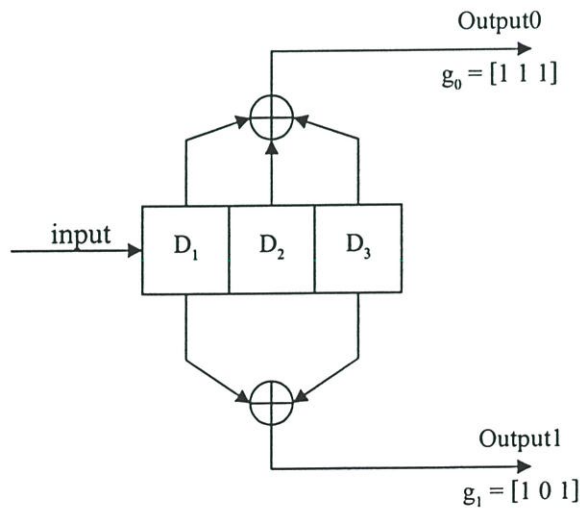
จำนวนของค่า Constraint Length (K) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงจำนวนของข้อมูลอินพุต (k) และจำนวนของชิพริจิสเตอร์ที่จะนำมารวมกันแบบมอดูโล 2 เพื่อที่จะหาค่าเอาต์พุตจากการเข้ารหัส ส่วนค่า Generator Polynomial (g) เป็นค่าที่ใช้แสดงตำแหน่งของข้อมูลภายในชิพริจิสเตอร์ที่จะนำมารวมกันแบบมอดูโล 2 ค่า Generator Polynomial นี้นิยมเขียนในรูปแบบของเลขฐานแปด เช่น ตำแหน่งข้อมูลที่จะนำมารวมกันแบบมอดูโล 2 เป็น “111” นิยมเขียนเป็น 7_8 ตัวอย่างวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชันแสดงดังรูปที่ 3.2

ในส่วนของอัตราการเข้ารหัส R เป็นอัตราส่วนของจำนวนข้อมูลอินพุต (k) ต่อข้อมูลเอาต์พุต (n) หรือ $\frac{k}{n}$ โดยจำนวนเอาต์พุตของการเข้ารหัสคอนโวลูชันมีจำนวนมากกว่าอินพุต จากรูปที่ 3.2 วงจรมีอัตราส่วนการเข้ารหัสเท่ากับ $\frac{1}{2}$ ค่า Constraint Length เท่ากับ 3 และค่า Generator Polynomials g_0 เท่ากับ 7_8 และ g_1 เท่ากับ 5_8

3.2.2 การวิเคราะห์การทำงานของวงจรเข้ารหัส

การวิเคราะห์การทำงานของวงจรเข้ารหัสคอนโวลูชันนี้จะใช้ค่า Generator Polynomial ในการคำนวณหาผลลัพธ์ที่ได้จากการเข้ารหัส ซึ่งวงจรของการเข้ารหัสนั้นค่า Generator Polynomial จะแสดงในรูปแบบตัวเลขฐานสอง ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 3.2

$$\begin{aligned} g_0 &= [1 \ 0 \ 0] \\ g_1 &= [1 \ 1 \ 1] \end{aligned} \tag{3.1}$$



รูปที่ 3.2 การเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน ที่ $K=3$

การคำนวณหาค่าเอาต์พุตที่ได้จากการเข้ารหัสนั้นจะนำค่า Generator Polynomial มาทำการคอนโวลูชัน (Convolution) กับข้อมูลอินพุตดังสมการ

$$Output_i = [Input] * g_i \quad (3.2)$$

ตัวอย่างในกรณีวงจรเข้ารหัสที่แสดงดังรูปที่ 3.2 สมมติให้ข้อมูลที่ต้องการเข้ารหัสคือ “1 0 0 1” การคำนวณหาค่าเอาต์พุตที่ได้จากการเข้ารหัสสามารถคำนวณหาค่าได้ดังนี้

$$Output_0 = [1 0 0 1] * [1 0 0] = 1 0 0 1 0 0 \quad (3.3)$$

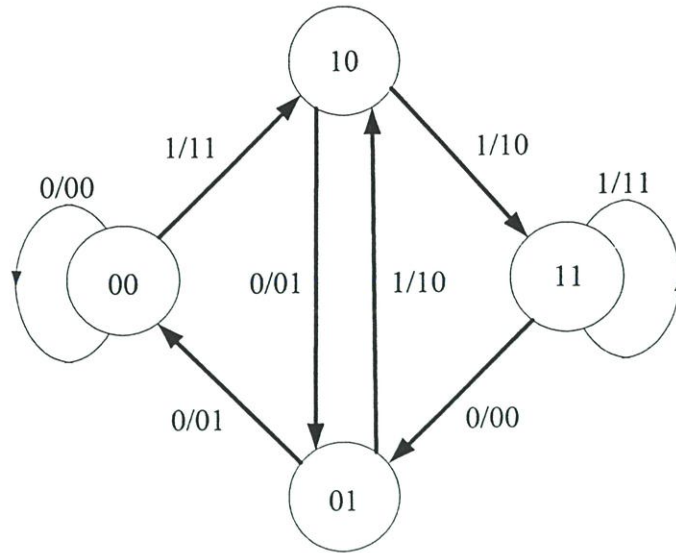
$$Output_1 = [1 0 0 1] * [1 1 1] = 1 1 1 1 1 1 \quad (3.4)$$

ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการเข้ารหัสข้อมูลนั้นเกิดจากข้อมูลที่ได้จาก $Output_0$ และ $Output_1$ ซึ่งเมื่อนำมารวมกันจะมีค่าเท่ากับค่ารหัส ดังนี้ “11 01 01 11 01 01”

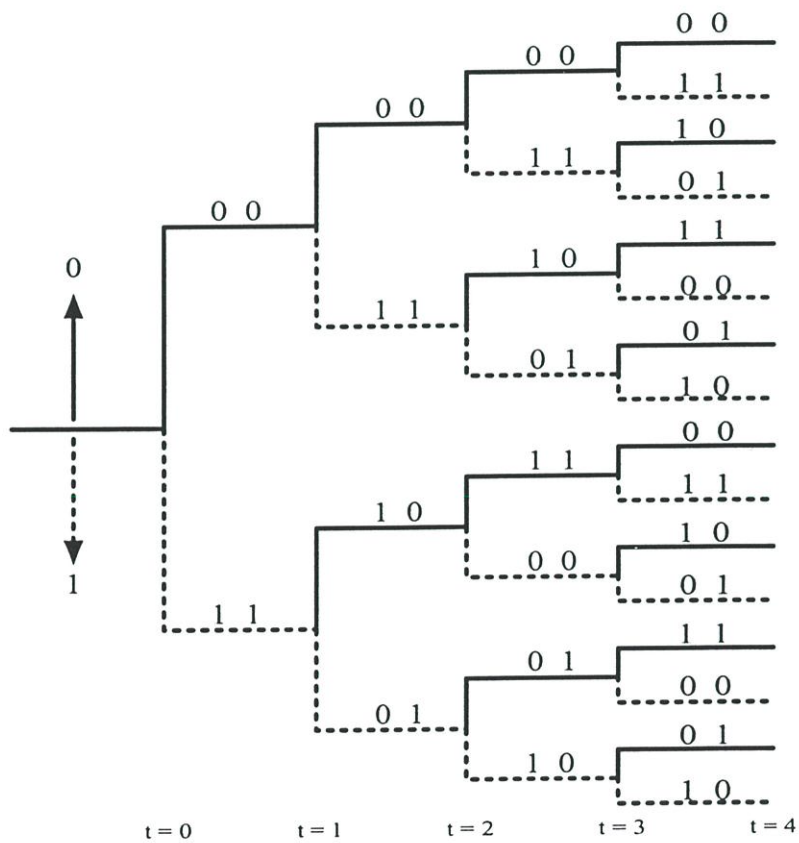
3.2.3 แผนภาพแสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัส

ในการวิเคราะห์การทำงานของวงจรเข้ารหัสแบบ คอนโวลูชัน นั้น นอกจากจะมีการใช้สมการของ Generator polynomial ในการแสดงลักษณะของวงจรเข้ารหัสแล้ว จะมีวิธีการแสดงการทำงานต่างๆ ของวงจรเข้ารหัส โดยการใช้รูปภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ในวงจรเข้ารหัสข้อมูลที่ถูกป้อนเข้ามา ณ เวลานั้น และ ค่าของค่ารหัสที่จะถูกส่งออกไป เมื่อมีข้อมูลในกรณีต่างๆ ป้อนเข้ามา ซึ่งรูปแบบของภาพที่ใช้แสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัสนั้น จะมีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบด้วยกัน ได้แก่ แผนภาพแสดงสถานะ (State Diagram) แผนภาพแบบต้นไม้ (Tree Diagram) และแผนภาพแบบทรีลิส (Trellis Diagram) ซึ่งจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

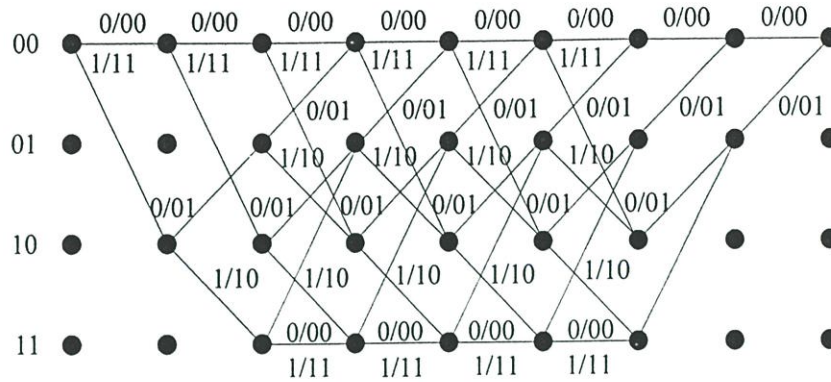
รูปแบบแรกคือแบบแผนภาพแสดงสถานะจะแสดงค่าของข้อมูลใน shift register และ เอาท์พุทของตัวเข้ารหัส ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.3 ตัวเลขที่อยู่ในวงกลมแต่ละวงนั้น จะหมายถึงสภาวะต่างๆ ของข้อมูลที่ถูกเก็บไว้ใน Shift register ซึ่งในกรณีของวงจรเข้ารหัสที่ใช้เป็นตัวอย่างนั้น จำนวนสถานะ(State)ทั้งหมดเท่ากับ 4 สถานะ และสำหรับลูกศรที่ถูกแสดงไว้ในรูปนั้นจะแสดงถึงลักษณะของการเปลี่ยนแปลงการทำงานจากสถานะหนึ่งไปเป็นอีกสถานะหนึ่ง ซึ่งจะขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ป้อนเข้ามา ณ เวลานั้นๆ เช่นกรณีที่ข้อมูลที่ถูกเก็บไว้มีค่าเป็น 00 เมื่อมีข้อมูล 1 ป้อนเข้ามาจะมีผลทำให้ข้อมูลที่เก็บไว้ถูกเปลี่ยนไปเป็น 10 และจะมีการส่งค่า 11 ออกไปจากวงจร (แทนด้วยสัญลักษณ์ 1/11 ดังรูปที่ 3.3) แต่ถ้าหากว่ามีการป้อนข้อมูล 0 เข้ามา วงจรก็จะยังคงมีสภาวะเป็น 00 เหมือนเดิมและจะมีการส่งค่า 00 ออกไปจากวงจร (แทนด้วยสัญลักษณ์ 0/00 ดังรูปที่ 3.3)



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงสถานะ (State Diagram)



รูปที่ 3.4 แผนภาพแบบต้นไม้ (Tree Diagram)



รูปที่ 3.5 แผนภาพแบบทรีลิส (Trellis Diagram)

สำหรับแผนภาพแบบต้นไม้ นั้นจะเป็นการพิจารณาถึงลักษณะของการทำงานของวงจรเข้ารหัสข้อมูล โดยที่จะมีการพิจารณาถึงค่าของผลลัพธ์ที่ได้หลังจากการป้อนข้อมูลต่างๆ เข้าไปในวงจรเข้ารหัสเป็นหลัก ซึ่งจะมีลักษณะของแผนภาพแบบต้นไม้ ดังรูปที่ 3.4 สำหรับการแสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนั้นจะเป็นการพิจารณาการทำงานโดยการคำนึงถึงข้อมูลที่ป้อนเข้ามาและที่จะถูกส่งออกไปจากภาคเข้ารหัสเป็นหลัก ซึ่งในการพิจารณานั้นจะเริ่มค้น ณ ตำแหน่งรากของแผนภาพแบบต้นไม้ซึ่งในรูปที่ 3.4 นั้น จะอยู่ในตำแหน่งซ้ายมือสุดของรูป ซึ่งจะมีการนำข้อมูลที่ถูกรับเข้ามาภายในวงจรเข้ารหัสเป็นตัวกำหนดทิศทางการเดินทางของข้อมูลในแผนภาพแบบต้นไม้ โดยในกรณีของแผนภาพแบบต้นไม้ตัวอย่างนั้น จะกำหนดให้มีการเลื่อนตำแหน่งไปทางข้างบนเมื่อมีการรับข้อมูล 0 เข้ามา และจะเลื่อนตำแหน่งลงล่างเมื่อมีการรับข้อมูล 1 เข้ามา ซึ่งหลังจากที่มีการเลื่อนตำแหน่งที่ใช้พิจารณาแล้ว จะมีการพิจารณาถึงข้อมูลที่ถูกรับออกไปจากภาคเข้ารหัส ณ เวลานั้นๆ จากข้อมูลที่อยู่เหนือเส้นทางในตำแหน่งที่มีการพิจารณา

การแสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัสโดยใช้แผนภาพแบบทรีลิสนั้น จะเป็นการนำการแสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัสโดยใช้แผนภาพแสดงสถานะมาทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบให้อยู่ในอีกลักษณะหนึ่ง ที่แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลต่างๆภายในวงจรเข้ารหัส, ข้อมูลที่ป้อนเข้ามาและค่ารหัสที่จะถูกส่งออกไป ณ เวลาต่างๆ โดยที่จะมีลักษณะของแผนภาพแบบทรีลิส ดังรูปที่ 3.5

จากรูปจะเป็นการแสดงการทำงานของวงจรเข้ารหัสข้อมูลแบบคอนโวลูชันในรูปที่ 3.2 ที่มีการนำข้อมูลในอดีตจำนวน 2 บิต มาทำการประมวลผลร่วมกับข้อมูล ณ เวลานั้น (จำนวน state ทั้งหมดใน trellis diagram จะมีค่าเท่ากับ $2^2 = 4$ state) และจะมีข้อมูลป้อนเข้ามาภายในวงจรครั้งละ 1 บิต ($k=1$) ซึ่งในกรณีนี้ จะมีข้อมูลที่จะเข้ารหัสทั้งหมด 6 บิต ซึ่งเส้นทางต่างๆ ที่อยู่ในแผนภาพแบบทรีลิส นั้น จะแสดงถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลง สถานะของวงจรและตัวเลข x/y ที่อยู่เหนือทางเดินในแต่ละเส้นทางนั้น จะแสดงถึงข้อมูลที่ป้อนเข้ามา และค่ารหัส (Codeword) ที่จะถูก

ส่งออกไปเมื่อมีการป้อนข้อมูลนั้นเข้ามา ซึ่งเมื่อพิจารณาลักษณะของแผนภาพแบบทรีลิสแล้วจะพบว่ารูปแบบของแผนภาพแบบทรีลิสในแต่ละสถานะการทำงานนั้น จะมีลักษณะที่คล้ายกันแต่จะมีความแตกต่างกันเฉพาะส่วนหัวและท้าย ซึ่งเป็นผลมาจากข้อมูลที่เก็บอยู่ในวงจรมานั้นจะมีค่าที่เริ่มต้นจากสถานะที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด และจะจบลงที่สถานะข้อมูลเป็น 0 เช่นกัน ดังนั้นเส้นทางอื่นๆ ที่ไม่ผ่านจุดที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด ณ จุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายนั้นจะไม่ถูกนำมาพิจารณาดังนั้นขนาดของความยาวในแผนภาพแบบทรีลิสนั้นจึงขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ถูกลำเอียงเข้ารหัส

3.2.4 การถอดรหัสแบบคอนโวลูชัน

การถอดรหัสคอนโวลูชันนั้นมีขั้นตอนที่ซับซ้อนกว่าวิธีการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน ซึ่งวิธีที่ใช้ในการถอดรหัสคอนโวลูชันนั้นมี 3 วิธี คือ Sequential Decoding, Threshold Decoding และ Viterbi Decoding ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ [25]

- วิธี Sequential Decoding เป็นวิธีการถอดรหัสคอนโวลูชันแบบแรกที่น่าเสนอโดย Wozencraft ในปี 1961 วิธีการถอดรหัสใช้แผนภาพทรีมาใช้ในการค้นหาเส้นทางของข้อมูล วิธีนี้มีข้อเสียคือใช้เวลาในการถอดรหัสนานและมีการทำงานที่ซับซ้อน
- วิธี Threshold Decoding เป็นวิธีที่น่าเสนอโดย Massey ในปี 1963 การถอดรหัสด้วยวิธีนี้ใช้หน่วยตัดสินใจที่เรียกว่า Threshold Gate ในการพิจารณาตัดสินใจความผิดพลาด ซึ่งวิธีนี้มีความซับซ้อนน้อยแต่มีประสิทธิภาพการถอดรหัสที่ต่ำ
- วิธี Viterbi Decoding เป็นวิธีที่น่าเสนอโดย A. J. Viterbi ในปี 1967 สำหรับการถอดรหัสวิธีนี้จะใช้อัลกอริทึมที่เรียกว่า Maximum Likelihood Decoding และแผนภาพทรีลิสในการถอดรหัส

3.2.5 การถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บี (Viterbi Algorithm)

การถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บีจะมีลักษณะการทำงานเป็นแบบ Maximum-likelihood Decoding Algorithm ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการทำงานนั้น จะได้เส้นทางเพียงหนึ่งเส้นทางจากเส้นทางทั้งหมดในแผนภาพแบบทรีลิสที่มีลักษณะที่เหมือนกับข้อมูลที่รับได้มากที่สุด ซึ่งการถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บีนั้น จะมีรูปแบบสำหรับการถอดรหัสที่ใช้งานอยู่ 2 ลักษณะด้วยกัน ได้แก่ แบบหยาบ (Hard-Decision) และแบบละเอียด (Soft-Decision)

สำหรับการทำงานของวงจรถอดรหัสที่ใช้กระบวนการตัดสินใจแบบหยาบนั้น จะเป็นการพิจารณาข้อมูลที่รับเข้ามา โดยพิจารณาว่าข้อมูลที่รับเข้ามาในแต่ละบิตนั้น มีค่าของข้อมูลเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น ส่วนการถอดรหัสที่มีการใช้กระบวนการตัดสินใจแบบละเอียดจะเป็นการพิจารณาถึงข้อมูลที่รับเข้ามาได้โดยการทำการตัดสินใจระดับของข้อมูลที่รับเข้ามาได้โดยการแบ่งระดับของสัญญาณที่ใช้ในการคำนวณหาค่าเมตริกซ์ที่มากกว่า 2 ระดับ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นั้น จะได้ข้อมูลรายละเอียดของข้อมูลที่ส่งมาที่มากกว่ากรณีของการตัดสินใจแบบหยาบ ซึ่งข้อมูลที่ี้ได้จากการ

ตัดสินใจ (soft-output) นั้น จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าเมตริกซ์เพื่อเปรียบเทียบข้อมูลที่รับเข้ามา ณ เวลานั้นๆ กับข้อมูลที่อยู่ในเส้นทางต่างๆ ณ เวลานั้น ซึ่งจะมีรูปแบบที่ใช้ในการคำนวณที่แตกต่างกันไป โดยในการทำงานต่างๆ ของวิธีไวเทอร์บีนั้นจะต้องมีการคำนวณหาความแตกต่างระหว่างข้อมูลที่รับเข้ามาและค่าที่อยู่ในเส้นทางต่างๆ เพื่อใช้ในกระบวนการตัดสินใจ โดยกระบวนการที่ใช้ในการทำการหาเส้นทางที่ดีที่สุดนั้น จะใช้วิธีการทำงานที่มีชื่อว่าไวเทอร์บีอัลกอริธึมซึ่งจะเป็นกระบวนการที่ใช้ในการค้นหาเส้นทางที่อยู่ในแผนภาพทริลิสที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่รับได้มากที่สุดเพื่อที่จะนำข้อมูลในเส้นทางนั้นมาคำนวณค่าของข้อมูลที่ถูกส่งมา โดยที่ในกระบวนการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้วิธีไวเทอร์บีนั้นมีขั้นตอนในการทำงานดังต่อไปนี้

- พิจารณาแบ่งข้อมูลที่รับเข้ามาออกเป็นข้อมูลย่อยๆ จำนวน m ช่วง ซึ่งแต่ละช่วงนั้นมีขนาดของข้อมูลเท่ากับ n บิต
- ทำการวาดแผนภาพทริลิสที่มีจำนวนสถานะในการทำงานเท่ากับ m สถานะ โดยจะมีการพิจารณาเฉพาะเส้นทางที่มีความเป็นไปได้ว่าจะถูกส่งมาเท่านั้น โดยสำหรับที่สถานะของแผนภาพทริลิสตั้งแต่ $K-1$ ขึ้นไปนั้น ให้วาดเฉพาะเส้นทางที่จะพุ่งเข้าหาสถานะของวงจรที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด
- กำหนดค่าตัวแปร l เท่ากับ 1 และทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของตัวแปรเมตริกซ์ในสถานะเริ่มต้นที่มีข้อมูลเป็น 0 ทั้งหมด ให้มีค่าของเมตริกซ์เท่ากับ 0
- ทำการคำนวณหาความแตกต่างของข้อมูล (distance) ระหว่างข้อมูลที่รับได้ชุดที่ l กับข้อมูลในเส้นทางในการเปลี่ยนแปลงสถานะในแผนภาพทริลิสจากสถานะที่ l ไปเป็น $l+1$
- นำค่าที่คำนวณได้นั้นไปบวกกับค่าเมตริกซ์สะสมของสถานะ l เพื่อคำนวณค่าของเมตริกซ์สะสมในสถานะที่ $l+1$ เพื่อใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดในการเปลี่ยนแปลงข้อมูลไปยังสถานะอื่นๆ โดยในแต่ละสถานะนั้น จะมีจำนวนเส้นทางทั้งหมดจำนวน $2k$ เส้นทางที่จะพุ่งเข้าสถานะเดียวกัน
- พิจารณา ณ ตำแหน่งในสถานะที่ $l+1$ ในแต่ละสถานะนั้น ทำการเลือกเส้นทางที่มีค่าเมตริกซ์สะสมที่มีค่าน้อยที่สุดที่พุ่งเข้าหาในแต่ละสถานะ โดยที่เส้นทางที่ถูกเลือกนั้นจะถูกเรียกว่า “Survivor” ซึ่งจะเป็นเส้นทางที่ถูกเก็บไว้ทำการคำนวณในสถานะต่อไป และสำหรับเส้นทางอื่นๆ ที่ไม่ได้ถูกเลือกนั้น จะถูกเรียกว่า “Forgetting” โดยจะถูกทิ้งออกไปจากระบบการตัดสินใจ
- ถ้าหากว่า l นั้นมีค่าเท่ากับ m แล้วให้ทำงานในขั้นตอนต่อไปได้ แต่ถ้ายังมีค่าน้อยกว่าจะมีต้องมีการเพิ่มค่า l ขึ้นอีก 1 จากนั้นจึงกลับไปทำงานที่ขั้นตอนที่ 4 ใหม่

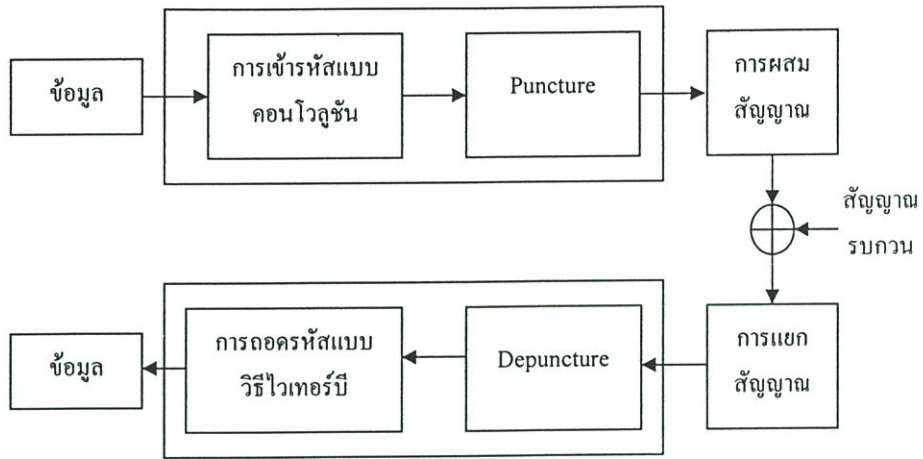
- เริ่มต้นพิจารณา ณ สถานะที่ $m+1$ ที่มีสถานะของข้อมูลสถานะเป็น 0 ทั้งหมด ทำการเลือกเส้นทางที่เป็น “Survival” ซึ่งเป็นเส้นทางที่ถูกเลือกที่เหลืออยู่ย้อนกลับไปจนกระทั่งถึงสถานะเริ่มต้นของการทำงานที่มีสถานะในการทำงานเป็น 0 ทั้งหมด ซึ่งเส้นทางที่ได้นั้น จะเป็นเส้นทางที่มีลักษณะที่ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้รับเข้ามามากที่สุด ซึ่งจะถูกนำไปใช้ในการคำนวณหาข้อมูลข่าวสารที่ถูกส่งมา โดยข้อมูลข่าวสารที่จะถูกส่งออกไปจากภาคถอดรหัสสั้นนั้น จะเป็นการส่งข้อมูลทั้งหมดที่อยู่ในเส้นทางส่งออกไป ยกเว้นข้อมูล 0 จำนวน $k(K-1)$ บิต ที่อยู่ท้ายสุดนั้น จะถูกตัดทิ้งไป

3.2.6 การลดจำนวนบิตข้อมูล (Punctuation)

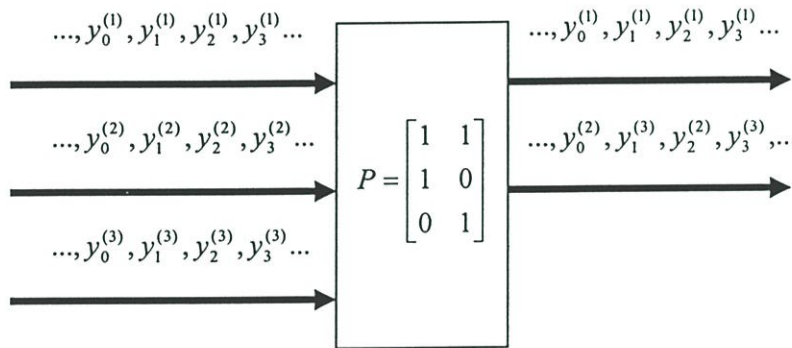
ภาคลดจำนวนบิตข้อมูล (Punctured) ถูกนำมาใช้ในวงจรเข้ารหัสในตำแหน่งหลังจากการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน ดังรูปที่ 3.6 โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทำให้จำนวนบิตของข้อมูลที่จะถูกส่งผ่านระบบสื่อสารนั้นมีจำนวนที่ลดลง โดยจะเป็นการการลบข้อมูลที่จะทำการส่งบางส่วนออกไปตามรูปแบบที่มีการกำหนดไว้ โดยในการแสดงถึงรูปแบบในการทำงานนั้น จะมีการแสดงถึงรูปแบบในการลบข้อมูลที่จะทำการส่งโดยใช้ตัวแปรเมตริกซ์ที่จะแสดงถึงรูปแบบในการลบข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัส ดังเช่นเมื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสจากวงจรเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันจะมีลักษณะของข้อมูลที่ได้จากการ puncture เป็นดังรูปที่ 3.7 แสดงถึงการทำงานของภาคลดจำนวนบิตนั้นเป็นการลดจำนวนบิตของข้อมูลในส่วนของข้อมูลที่ได้จากการทำงานของวงจรเข้ารหัสที่มีการเข้ารหัสในอัตรา $1/3$ โดยข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสเป็น $y_k^{(1)}, y_k^{(2)}$ และ $y_k^{(3)}$ ตามลำดับ โดยจะใช้การสลับกันส่งข้อมูลระหว่างสัญญาณ $y_k^{(2)}$ และ $y_k^{(3)}$ ดังนั้นจะทำให้อัตราการเข้ารหัสข้อมูลของการเข้ารหัสสั้นมีค่าที่เพิ่มขึ้นจาก $1/3$ เป็น $1/2$

ในทางกลับกันเมื่อข้อมูลต่างๆ นั้นถูกส่งมาถึงปลายทาง จะต้องมีการนำข้อมูลมาทำการ Depuncture เพื่อเปลี่ยนแปลงรูปแบบของข้อมูลที่ได้รับได้ให้กลับมาอยู่ในรูปแบบเดิม จากตัวอย่างในรูปที่ 3.8 เป็นกระบวนการ Depuncture ของรูปที่ 3.7 ซึ่งสมมติให้ข้อมูลที่ได้รับมามีค่าเป็น $y_k^{(1)}$ และ $y_k^{(2)}$ สำหรับหลักการทำงานของกระบวนการ Depuncture คือการเพิ่มบิตที่ไม่ทราบค่าซึ่งในที่นี้สมมติให้เป็นค่า C ในตำแหน่งที่ได้ทำการ Puncture ออกไป จากตัวอย่างในรูปที่ 3.8 นั้นจะทำการเพิ่มค่า C ในตำแหน่งที่ 3 เมื่อมีคาบเวลาในการส่งเป็นคู่ และเพิ่มค่า C ในตำแหน่งที่ 2 เมื่อมีคาบเวลาในการส่งเป็นคู่ ซึ่งค่า C นั้นเป็นค่าที่สามารถคำนวณได้จากความน่าจะเป็นของข้อมูลจากภาคส่ง

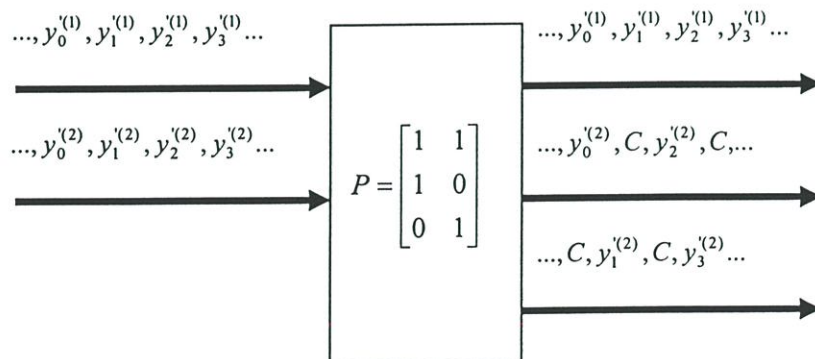
สำหรับในงานวิจัยนี้เป็นการนำรหัสแบบคอนโวลูชันมาใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณเชิงแสงในรูปแบบต่างๆ และการสื่อสารแบบโพตตอนหลายระดับเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูล และมีการประยุกต์ใช้งานของรหัสแบบคอนโวลูชันที่มีการลดจำนวนบิตข้อมูลเพื่อให้ได้รูปแบบของข้อมูลที่เหมาะสมต่อการใช้รหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนโวลูชัน



รูปที่ 3.6 การทำงานของรหัสแบบคอนโวลูชันที่มีการลดจำนวนบิตข้อมูล



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างวิธีการ Punctuation



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างวิธีการ Depunctuation

บทที่ 4

วิธีการทดสอบและข้อกำหนด

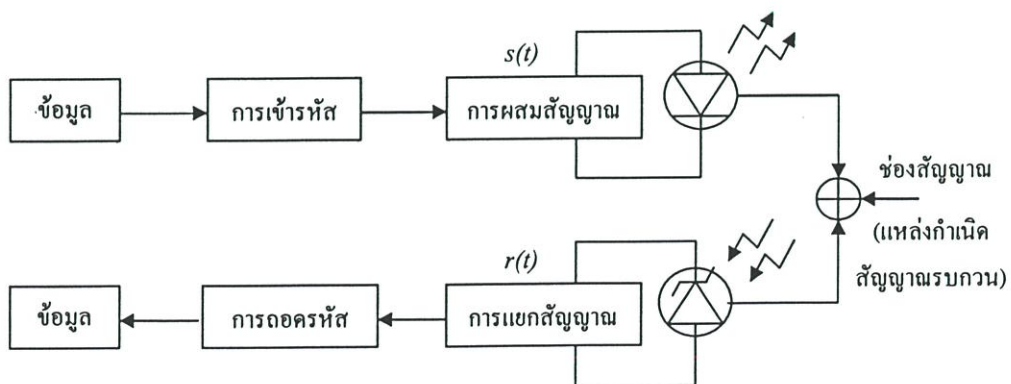
บทนี้กล่าวถึงรูปแบบของการออกแบบการจำลองการทำงานของการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ การสื่อสารแบบโพดอนี่ระดับเปรียบเทียบกับสมการการคำนวณหาอัตราความผิดพลาดและการนำมาประยุกต์ใช้งานกับรหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนโวลูชัน ซึ่งได้แบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยๆ ดังต่อไปนี้

4.1 การออกแบบระบบสื่อสาร

การทำงานของระบบสื่อสารนั้นสามารถออกแบบจำลองการทำงานของระบบเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบสื่อสาร โดยการตรวจสอบหาอัตราความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูล ซึ่งในการออกแบบจำลองการทำงานเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานนั้นประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญได้แก่ ภาคส่ง (Transmitter: Tx) ภาครับ (Receiver: Rx) และช่องสัญญาณสื่อสาร (Channel) ซึ่งในแต่ละส่วนมีส่วนประกอบย่อยๆ ดังรูปที่ 4.1 และมีหลักการออกแบบจำลองการทำงานดังต่อไปนี้

4.1.1 กระบวนการสร้างข้อมูลแบบสุ่ม (Data Random Generator)

กระบวนการสร้างข้อมูลแบบสุ่มเป็นกระบวนการเริ่มต้นของการจำลองการทำงานของระบบสื่อสาร ซึ่งเป็นกระบวนการสุ่มข้อมูลดิจิทัลที่จะใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบสื่อสาร โดยจำนวนของข้อมูลที่เกิดขึ้นในการสุ่มนี้ต้องมีสัดส่วนที่เท่ากัน ตัวอย่างเช่นเมื่อต้องการส่งข้อมูลครั้งละ 1 บิต จำนวน 1000 บิต ข้อมูลที่เกิดจากกระบวนการสุ่มนี้จะมีค่าเป็นดิจิทัล "0" จำนวน 500 บิต และมีค่าเป็นดิจิทัล "1" จำนวน 500 บิต เป็นต้น



รูปที่ 4.1 รูปแบบของระบบสื่อสารเชิงแสง

4.1.2 การเข้ารหัสข้อมูล (Encoding)

การเข้ารหัสข้อมูลเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเพื่อทำการแก้ไขข้อผิดพลาดในการรับส่งข้อมูลเพื่อให้ประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลสูงขึ้นจากเดิมนั้นคือมีค่าอัตราความผิดพลาดของบิตลดลง ซึ่งการเข้ารหัสข้อมูลนั้นมีอยู่หลายวิธีด้วยกันเช่นการเข้ารหัสแบบบล็อกเชิงเส้น (Linear Block Code) การเข้ารหัสแบบ BCH ซึ่งรหัสแต่ละแบบก็จะมีคุณสมบัติในการเพิ่มประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลที่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเข้ารหัสแบบคอนวูลูชันซึ่งเป็นรหัสชนิดหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการแก้ไขข้อผิดพลาดที่เป็นที่ยอมรับและรู้จักกันโดยทั่วไป

4.1.3 การผสมสัญญาณ (Modulation)

กระบวนการผสมสัญญาณเป็นกระบวนการจัดรูปแบบของสัญญาณให้เหมาะสมในการรับส่งข้อมูล การผสมสัญญาณในปัจจุบันมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกันเช่น การผสมสัญญาณเชิงมุม การผสมสัญญาณเชิงความถี่ การผสมสัญญาณเชิงแสง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบในส่วนของการผสมสัญญาณเชิงแสงที่มีการตรวจจับแบบ โดยตรง ตัวอย่างเช่น การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน การผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation เป็นต้น

4.1.4 ช่องสัญญาณ (Channel)

ช่องสัญญาณนั้นถือเป็นตัวกลางในการส่งผ่านสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับ และเป็นส่วนที่มีความสำคัญสำหรับระบบสื่อสาร สำหรับการจำลองการทำงานของช่องสัญญาณในที่นี้เป็นการออกแบบสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ ซึ่งช่องสัญญาณแต่ละรูปแบบนั้นมีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานำสัญญาณรบกวนจำนวน 2 รูปแบบคือสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจริงในระบบสื่อสารและสัญญาณรบกวนแบบพัลส์ชองซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสารเชิงแสง

4.1.5 การแยกสัญญาณ (Demodulation)

กระบวนการแยกสัญญาณเป็นกระบวนการที่มีความสอดคล้องกับกระบวนการผสมสัญญาณว่าที่ภาคส่งมีการผสมสัญญาณแบบใด และมีกระบวนการตัดสินใจที่เหมาะสมเพื่อให้สัญญาณที่ได้รับมีความใกล้เคียงกับข้อมูลที่มาจากภาคส่งมากที่สุด ซึ่งในการทำวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผสมสัญญาณเชิงแสงจึงได้ทำการศึกษากระบวนการแยกสัญญาณทางแสงที่มีความสอดคล้องกับการผสมสัญญาณทางแสงแบบต่างๆ เช่น การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน การผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation เป็นต้น

4.1.6 การถอดรหัสข้อมูล (Decoding)

การถอดรหัสข้อมูลเป็นกระบวนการที่ต้องมีความสอดคล้องกับกระบวนการเข้ารหัสว่ามีการเข้ารหัสแบบใด กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีรูปแบบที่สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดที่

เกิดขึ้นจากการตัดสินใจผิดพลาดในส่วนของ การแยกสัญญาณให้มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่เกิดจากกระบวนการสุ่มมากที่สุด ซึ่งในการทำวิจัยนี้ได้เลือกการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันมาใช้งานและได้เลือกศึกษากระบวนการถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บี

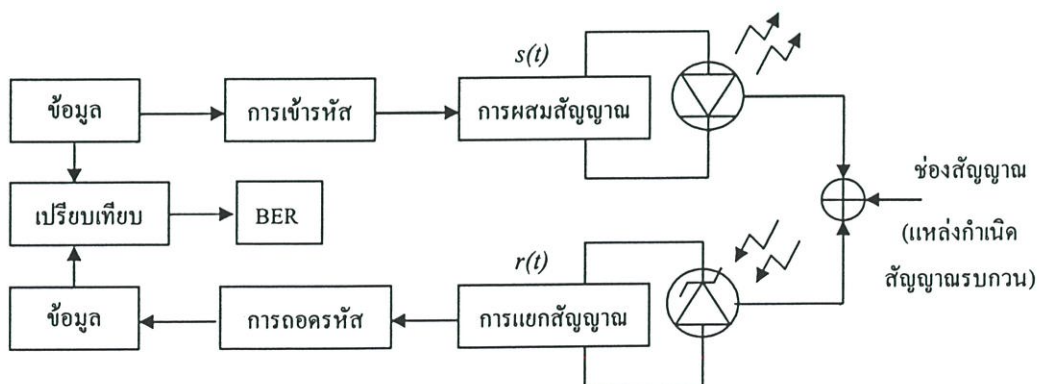
4.1.7 การหาค่าอัตราความผิดพลาดของข้อมูล

กระบวนการนี้เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากภาคถอดรหัสหรือจากภาคการแยกสัญญาณมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่สร้างขึ้นแบบสุ่ม เพื่อตรวจสอบว่าอัตราส่วนข้อมูลที่ผิดพลาดจากการรับส่งเป็นจำนวนเท่าใดเมื่อเทียบกับจำนวนข้อมูลทั้งหมดที่ส่งผ่านระบบสื่อสาร ผลที่เกิดขึ้นนี้จะนำเสนอในรูปแบบกราฟซึ่งเมื่อใช้ช่องสัญญาณแบบเกาส์จะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานต่อสัญญาณรบกวน (E_b/N_0) และอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate: BER) ส่วนช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของโฟตอนที่เกิดขึ้นในพัลส์แสง ($K_s/Slot$) และอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate: BER)

จากกระบวนการทั้งหมดที่กล่าวมานั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 แล้วนำมาทำการออกแบบจำลองกระบวนการขึ้นบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB ซึ่งเป็นโปรแกรมที่สามารถทำการประมวลผลและแสดงผลการจำลองการทำงานในรูปแบบกราฟที่สามารถนำมาวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแต่ละรูปแบบได้

4.2 การออกแบบช่องสัญญาณ

ช่องสัญญาณในระบบการสื่อสารนั้นถือเป็นตัวกลางในการส่งผ่านสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับและเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากเป็นส่วนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวน ซึ่งช่องสัญญาณที่เป็นที่รู้จักในปัจจุบันนี้มีอยู่หลายรูปแบบด้วยกันแต่ในที่นี้จะทำการพิจารณาออกแบบเพียง 2 ช่องสัญญาณได้แก่ช่องสัญญาณแบบเกาส์ (Additive white Gaussian noise: AWGN) ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง (Poisson Channel)



รูปที่ 4.2 รูปแบบของการจำลองการทำงานของระบบสื่อสารเชิงแสง

4.2.1 ช่องสัญญาณแบบเกาส์

ช่องสัญญาณแบบเกาส์เป็นช่องสัญญาณที่เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารต่างๆ เป็นช่องสัญญาณที่เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปและมีการทดสอบประสิทธิภาพอยู่มากมายหลายรูปแบบ ซึ่งมีผู้นำเสนอวิธีการสร้างสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ไว้หลายวิธีด้วย แต่วิธีที่เหมาะสมกับการทดสอบทางด้านซอฟต์แวร์คือวิธีการของ Box-muller ซึ่งในการทดสอบการทำงาน of ช่องสัญญาณแบบเกาส์จะเป็นการทดสอบเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ σ^2 เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายของสัญญาณรบกวนเมื่อค่า σ^2 สูงขึ้น

4.2.2 ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง

ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองเป็นช่องสัญญาณสื่อสารที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารทางแสงซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณที่เกิดขึ้นจากตัวจับสัญญาณที่ภาครับ วิธีการสร้างช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองมีอยู่ 2 รูปแบบ ดังที่นำเสนอในหัวข้อ 2.4.2.4 ซึ่งในการทดสอบการทำงาน of ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองจะเป็นการทดสอบเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ λ เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายของสัญญาณรบกวนเมื่อค่า λ สูงขึ้น

จากการทดสอบการทำงาน of ช่องสัญญาณทั้งสองแบบที่กล่าวมาแล้วนั้นสามารถนำโปรแกรมที่ได้มาใช้งานกับการจำลองการทำงาน of ระบบสื่อสารที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1 ซึ่งจะนำมาใช้งานร่วมกับกระบวนการผสมสัญญาณแบบต่างๆ ที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 2.7 เพื่อเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ

4.3 การออกแบบการผสมสัญญาณเชิงแสง

การออกแบบการผสมสัญญาณเป็นการจำลองการทำงาน of ระบบสื่อสารเพื่อคำนวณค่าอัตราความผิดพลาดบิต (Bit Error Rate, BER) ของระบบสื่อสารมาเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดของข้อมูล (Probability of Error, PE)

4.3.1 การออกแบบสัญญาณแบบ On-Off Keying

การผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying เป็นวิธีการผสมสัญญาณที่ง่าย แต่สามารถแทนข้อมูลได้เพียงครั้งละ 1 บิตเท่านั้น กระบวนการตรวจจับสัญญาณจะทำการตรวจสอบว่าสัญญาณที่ได้รับมามากกว่าค่า Threshold หรือ ไม่ วิธีการออกแบบการทำงาน of การผสมสัญญาณสามารถทำได้โดยแทนค่าข้อมูล “1” ด้วยค่า 1 และแทนค่าข้อมูล “0” ด้วยค่า 0 ส่วนการแยกสัญญาณสามารถทำได้โดยทำการตัดสินใจโดยการคำนวณหาค่า Threshold แล้วเปรียบเทียบสัญญาณที่รับได้กับค่า Threshold ที่คำนวณได้ ถ้าสัญญาณที่ได้รับมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า Threshold จะตัดสินใจให้เป็นค่าดิจิทัล “1” และถ้าค่าที่ได้รับมีค่าน้อยกว่าค่า Threshold จะตัดสินใจให้เป็นค่าดิจิทัล “0”

สมการหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาด (PE) ในช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองคือ

$$PE = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{m_T} \frac{(K_s + K_b)^k e^{-(K_s + K_b)}}{k!} + \frac{1}{2} \sum_{k=m_T}^{\infty} \frac{K_b^k e^{-K_b}}{k!} \quad (4.1)$$

โดยที่
$$m_T = \frac{K_s}{\log\left(1 + \frac{K_s}{K_b}\right)}$$

K_s คือจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อสล็อต

K_b คือจำนวนสัญญาณรบกวนเฉลี่ยต่อสล็อต

สมการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาด ในช่องสัญญาณแบบเกาส์คือ

$$PE(\alpha_{opt}) = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}}\right) \quad (4.2)$$

โดยที่
$$\alpha_{opt} = \frac{E_b}{2}$$

E_b คือค่าพลังงานที่ใช้ในการส่งต่อบิต

N_0 คือค่าของสัญญาณรบกวน

4.3.2 การออกแบบสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

การผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเป็นวิธีการผสมสัญญาณพื้นฐานของการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่แทนข้อมูลได้เพียงครั้งละ 1 บิต เป็นวิธีการที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้แบนด์วิดท์เพิ่มขึ้น กระบวนการตรวจจับสัญญาณก็เพียงตรวจสอบว่ามีสัญญาณพัลส์ที่ตำแหน่งใดของคาบเวลา ซึ่งวิธีการออกแบบการทำงานของสัญญาณสามารถทำได้โดยการแทนค่าข้อมูล "1" ด้วยสัญญาณในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ 0 ถึง $T_b/2$ ด้วยค่า 1 โดยให้เป็นสัญญาณที่ 1 และค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ $T_b/2$ ถึง T_b ด้วยค่า 0 โดยให้เป็นสัญญาณที่ 2 ส่วนการแทนค่าข้อมูล "0" นั้นจะแทนค่าสัญญาณด้วยค่า 0 ในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ 0 ถึง $T_b/2$ โดยให้เป็นสัญญาณที่ 1 และแทนค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ $T_b/2$ ถึง T_b ด้วยค่า 1 โดยให้เป็นสัญญาณที่ 2 ส่วนการแยกสัญญาณสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบสัญญาณที่รับได้ในแต่ละครั้งคาบเวลา ถ้าสัญญาณที่ 1 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ 0 ถึง $T_b/2$ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสัญญาณที่ 2 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ $T_b/2$ ถึง T_b จะตัดสินใจให้เป็นค่าดิจิทัล "1" และถ้าสัญญาณที่ 1 หรือสัญญาณ

ที่ได้รับในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ 0 ถึง $T_c/2$ มีค่าน้อยกว่าสัญญาณที่ 2 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วง
ในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ $T_c/2$ ถึง T_c จะตัดสินใจให้เป็นค่าดิจิทัล "0"

สมการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาด ในช่องสัญญาณแบบบิวส์
ชองคือ

$$PE = \sum_{k_1=0}^{\infty} \sum_{k_2=k_1+1}^{\infty} Pos(k_1, K_s + K_b) Pos(k_2, K_b) + \frac{1}{2} \sum_{k_1=0}^{\infty} Pos(k_1, K_s + K_b) Pos(k_1, K_b) \quad (4.3)$$

โดยที่ $Pos(k, m) = \frac{m^k e^{-m}}{k!}$

$$m = K_s + K_b \text{ หรือ } m = K_b$$

สมการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาด ในช่องสัญญาณแบบเกาส์คือ

$$PE = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (4.4)$$

4.3.3 การออกแบบสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเป็นวิธีการผสมสัญญาณสามารถเพิ่ม
ประสิทธิภาพการใช้แบนด์วิดท์มากขึ้นเมื่อแทนจำนวนบิตข้อมูลในการส่งสัญญาณเพิ่มขึ้น
กระบวนการตรวจจับสัญญาณเป็นการตรวจสอบว่ามีสัญญาณพัลส์ที่ตำแหน่งใดของคาบเวลา ซึ่ง
วิธีการออกแบบการทำงานของระบบผสมสัญญาณสามารถทำได้โดยการแทนค่าข้อมูลจะทำการแทน
ค่าสัญลักษณ์ในตำแหน่งต่างๆ ของสล็อตโดยแทนค่าของสัญลักษณ์ที่มีค่า 0 ถึง $M-1$ ในตำแหน่ง
สล็อตที่ 1 ไปจนถึงสล็อตที่ M ตามลำดับ ซึ่งในตำแหน่งสล็อตที่แทนนั้นจะแทนด้วยค่า 1 ส่วนใน
สล็อตอื่นๆ จะมีค่าเป็น 0 ดังนี้

$$\begin{aligned} s_0 &= (1, 0, \dots, \dots, 0) \\ s_1 &= (0, 1, \dots, \dots, 0) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ s_{M-2} &= (0, \dots, \dots, 1, 0) \\ s_{M-1} &= (0, \dots, \dots, 0, 1) \end{aligned} \quad (4.5)$$

ส่วนในกระบวนการแยกสัญญาณนั้นสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบสัญญาณที่รับเข้า
มาในแต่ละคาบเวลา โดยเลือกสัญญาณในสล็อตที่มีค่าสูงที่สุดแปลงออกมาเป็นค่าแบบสัญลักษณ์
ซึ่งในการทดสอบการจำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบกับอัตราความผิดพลาดทางทฤษฎีนั้นจะใช้

การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีจำนวนบิตเท่ากับ 2 ซึ่งจะได้สัญลักษณ์จำนวน 4 ค่า

สมการหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดทางสัญลักษณ์ (PWE) ในช่องสัญญาณแบบบิตส์ของคือ

$$PWE = 1 - \frac{\exp[-(K_s + MK_b)]}{M} - \sum_{k_1=1}^{\infty} Pos(k_1, K_s + K_b) \left[\sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_2, K_s + K_b) \right]^{M-1} - \sum_{r=1}^{M-1} \frac{(M-1)!}{r!(M-1-r)!(r+1)} \sum_{k=1}^{\infty} Pos(k, K_s + K_b) [Pos(k, K_b)]^r \left[\sum_{j=0}^{k-1} Pos(j, K_b) \right]^{M-1-r} \quad (4.6)$$

สมการหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดทางสัญลักษณ์ในช่องสัญญาณแบบเกาส์คือ

$$PWE = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \{1 - [1 - Q(y)]^{M-1}\} e^{-(y - \sqrt{2E_b/N_0})^2/2} dy \quad (4.7)$$

4.3.4 การออกแบบสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation

การผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation เป็นวิธีการผสมสัญญาณสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้แบนวิธได้มากกว่าการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเนื่องมีการส่งพัลส์แสงจำนวน N พัลส์แสงในคาบเวลาที่เท่ากันและสามารถแทนจำนวนบิตได้มากกว่าเมื่อมีการเพิ่มจำนวนพัลส์ในคาบเวลา กระบวนการตรวจจับสัญญาณเป็นการตรวจสอบว่ามีสัญญาณพัลส์ที่สูงสุด N ค่าในคาบเวลา ซึ่งวิธีการออกแบบการทำงานของ การผสมสัญญาณสามารถทำได้โดยการแทนค่าข้อมูลจะทำการแทนค่าสัญลักษณ์ในตำแหน่งต่างๆ ของสล็อตโดยแทนในตำแหน่งต่างๆ ที่กำหนดขึ้นจำนวน k สล็อตต่อหนึ่งคาบเวลา

ส่วนกระบวนการแยกสัญญาณนั้นสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบสัญญาณที่รับเข้ามาในแต่ละคาบเวลา โดยเลือกสัญญาณในสล็อตที่มีค่าสูงที่สุดและน้อยลงมาตามลำดับจำนวน k สล็อตแปลงออกมาเป็นค่าแบบสัญลักษณ์ ซึ่งในการทดสอบการจำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบกับอัตราความผิดพลาดทางทฤษฎีนั้นจะใช้การผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation ที่มีจำนวนสล็อตเท่ากับ 4 และจำนวนพัลส์แสงต่อคาบเวลาเท่ากับ 2 ซึ่งจะได้สัญลักษณ์จำนวน 6 ค่า

สมการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดทางสัญลักษณ์ในช่องสัญญาณแบบบิตส์ของคือ

$$\begin{aligned}
PWE = & 1 - \frac{\exp[-(K_s + (N-1)K_b)]}{N-1} + \frac{2\exp[-(2K_s + NK_b)]}{N} - 2 \sum_{k_1=2}^{\infty} Pos(k_1, K_s + K_b) \\
& \times \sum_{k_2=1}^{k_1-1} Pos(k_2, K_s + K_b) \sum_{l=0}^{N-2} \frac{(N-2)!}{l!(N-2-l)!(l+1)} [Pos(k_2, K_b)] \left[\sum_{j=0}^{k_2-1} Pos(j, K_b) \right]^{N-2-l} \\
& - \sum_{k=1}^{\infty} [Pos(k, K_s + K_b)]^2 \sum_{l=0}^{N-2} \frac{2 \times (N-2)!}{l!(N-2-l)!(l+1)(l+2)} [Pos(k, K_b)] \left[\sum_{j=0}^{k-1} Pos(j, K_b) \right]^{N-2-l} \quad (4.8)
\end{aligned}$$

4.3.5 การออกแบบสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation

การผสมสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation เป็นวิธีการผสมสัญญาณใช้เทคนิคการเหลื่อมล้ำของสัญญาณ (Overlapping) ซึ่งวิธีนี้ยอมให้มี N สล็อตต่อความกว้างพัลส์ และให้มีการเหลื่อมล้ำระหว่างสัญลักษณ์ ซึ่งจะไม่มีผลต่อแบนด์วิดท์ในการส่ง กระบวนการตรวจจับสัญญาณเป็นการตรวจสอบว่ามีสัญญาณพัลส์ในสล็อตที่ติดกัน N สล็อตสูงสุดในคาบเวลา ซึ่งวิธีการออกแบบการทำงานของ การผสมสัญญาณสามารถทำได้โดยการแทนค่าข้อมูลจะทำการแทนค่าสัญลักษณ์โดยการแบ่งสัญญาณเป็นจำนวน M สล็อตแต่แทนค่าสัญญาณพัลส์เพียง N สล็อตที่ติดกัน

ส่วนกระบวนการแยกสัญญาณนั้นสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบสัญญาณที่รับได้ในแต่ละคาบเวลา โดยเลือกสัญญาณในกลุ่มสล็อตที่มีค่าสูงที่สุด แปลงออกมาเป็นค่าแบบสัญลักษณ์ ซึ่งในการทดสอบการจำลองการทำงานของ การผสมสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation ที่มีจำนวนบิตเท่ากับ 2 มีการแทนค่าของพัลส์ที่ไม่เกิดการเหลื่อมล้ำกันเท่ากับ 2 และจำนวนสล็อตต่อพัลส์แสงเท่ากับ 3 ซึ่งจะได้สัญลักษณ์จำนวน 4 ค่า

4.3.6 การออกแบบสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation

การผสมสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation เป็นวิธีการผสมสัญญาณใช้เทคนิคที่ใช้เทคนิค Differential โดยสล็อตหลังพัลส์แสงในบิตอกสัญญาณจะถูกทำการตรวจจับสัญญาณด้วยเทคนิค Differential ทำให้จำนวนสล็อตที่ใช้ในการส่งมีจำนวนลดลง กระบวนการตรวจจับสัญญาณเป็นการตรวจสอบว่ามีสัญญาณพัลส์เกิดขึ้นที่ตำแหน่งใดของคาบเวลาเช่นเดียวกับการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน แต่เนื่องจากกระบวนการ Differential ที่เกิดขึ้นในตำแหน่งหลังพัลส์จึงทำให้ความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนน้อยกว่าการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน สำหรับวิธีการออกแบบการทำงานของ การผสมสัญญาณสามารถทำได้โดยการแทนค่าข้อมูลจะทำการแทนค่าสัญลักษณ์ในตำแหน่งต่างๆ ของสล็อต โดยแทนค่าของสัญลักษณ์ที่มีค่า 0 ถึง $M-1$ ในตำแหน่งสล็อตที่ 1 ไปจนถึงสล็อตที่ M ตามลำดับ ซึ่งในตำแหน่งสล็อตที่แทนนั้นจะแทนด้วยค่า 1 ส่วนในสล็อตอื่นๆ ก่อนหน้าตำแหน่งพัลส์จะมีค่าเป็น 0 ดังนี้

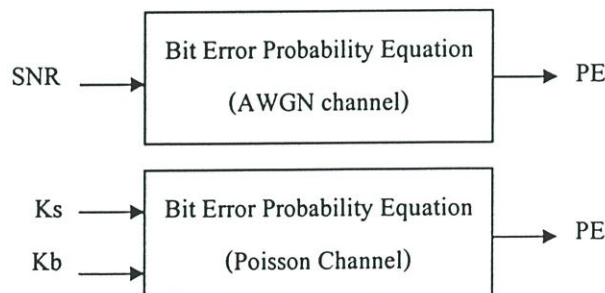
$$\begin{aligned}
 s_0 &= (1) \\
 s_1 &= (0, 1) \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 s_{M-2} &= (0, \dots, \dots, 1) \\
 s_{M-1} &= (0, \dots, \dots, 0, 1)
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

ส่วนกระบวนการแยกสัญญาณนั้นสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบสัญญาณที่รับได้ในแต่ละคาบเวลา โดยเลือกสัญญาณในสล็อตที่มีค่าสูงที่สุด แปลงออกมาเป็นค่าแบบสัญลักษณ์ ซึ่งในการทดสอบการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีจำนวนบิตเท่ากับ 2 ซึ่งจะได้สัญลักษณ์จำนวน 4 ค่า

ในการศึกษาการผสมสัญญาณทั้ง 6 รูปแบบนั้นจะทำการศึกษาจากการนำค่า BER ที่ได้จากการผสมสัญญาณในแต่ละรูปแบบซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 มาเปรียบเทียบกับค่า PE ที่คำนวณจากสมการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่เหมาะสมกับรูปแบบการผสมสัญญาณดังรูปที่ 4.3 โดยในกรณีที่สัญญาณรบกวนเป็นแบบเกาส์นั้นจะคำนวณค่า PE เมื่อค่าของอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (SNR) เปลี่ยนแปลงจาก 0 ถึง 10 dB และกรณีที่สัญญาณรบกวนแบบปัวส์ซองนั้นจะคำนวณค่า PE เมื่อจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อสล็อต (K_s) เปลี่ยนแปลงจาก 0 ถึง 10 โฟตอนต่อสล็อตและค่าของสัญญาณรบกวนเฉลี่ย (K_b) คงที่ที่ 1 โฟตอนต่อสล็อต

4.3.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยเงื่อนไขค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูล

การส่งสัญญาณในระบบสื่อสารนั้นสิ่งที่สำคัญคือจำนวนข้อมูลข่าวสารจริงที่ส่งไปในระบบสื่อสาร ซึ่งในการเปรียบเทียบนั้นจะดูจากจำนวนบิตข้อมูลจริงที่ใช้ในการผสมสัญญาณแต่ละรูปแบบว่าเป็นเท่าใด แล้วนำการผสมสัญญาณแต่ละแบบนั้นมาเปรียบเทียบกันดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 การคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาด ของช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ และแบบปัวส์ซอง

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ โดยพิจารณาจากค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูล (Throughput)

การผสมสัญญาณ	Throughput = 1 b/sec/Hz	Throughput = 2 b/sec/Hz	Throughput = 3 b/sec/Hz
OOK	BPPM		
BPPM	OOK		
4-PPM		4-DPPM, (3,2) OPPM	
8-PPM			(4,2) MPPM
(4,2) MPPM			8-PPM
(3,2) OPPM		4-PPM, 4-DPPM	
4-DPPM		4-PPM, (3,2) OPPM	

4.3.8 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยเงื่อนไขจำนวนสล็อตที่เท่ากัน

สำหรับจำนวนสล็อตที่ใช้ในการผสมสัญญาณนั้นมีผลต่อการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันเป็นอย่างมากอันเนื่องมาจากการผสมสัญญาณนั้นอาศัยตำแหน่งการเกิดของพัลส์ในการแทนค่าของข้อมูลที่ใช้ในการส่งซึ่งสามารถสรุปผลของการทดสอบได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ โดยพิจารณาจากจำนวนสล็อตที่เท่ากัน

การผสมสัญญาณ	จำนวนสล็อตเท่ากับ 4	จำนวนสล็อตเท่ากับ 6
4-PPM	(4,2) MPPM, (2,2) OPPM , 4-DPPM	
(4,2) MPPM	4-PPM, (2,2) OPPM, 4-DPPM	
(6,2) MPPM		(3,2) OPPM
(2,2) OPPM		
(3,2) OPPM		(6,2) MPPM
4-DPPM	4-PPM, (4,2) MPPM, (2,2) OPPM	

4.4 การออกแบบสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ

การสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับเป็นการนำหลักการของการส่งสัญญาณเชิงแสงที่ใช้ระดับของความเข้มแสงเป็นตัวกำหนดจำนวนโฟตอนที่เกิดขึ้นในพัลส์ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการส่งสัญญาณแบบแอมพลิจูดมอดูเลชัน (Amplitude Modulation) สำหรับในการทดสอบนี้เป็นการ

ออกแบบการทำงานและนำเสนอหลักการคำนวณหาค่าอัตราความผิดพลาดทางทฤษฎีที่ใช้งานกับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ และการนำไปประยุกต์ใช้งานกับการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

4.4.1 การออกแบบการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ

การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับเป็นกระบวนการผสมสัญญาณที่ใช้แทนข้อมูลเพียง 2 บิต โดยแบ่งความเข้มของแสงออกเป็นสี่ระดับ ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดจำนวนโฟตอนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นได้แก่ $\alpha_0 = 0$, $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 4$ และ $\alpha_3 = 9$ ซึ่งกระบวนการตรวจจับสัญญาณเป็นการอาศัยตำแหน่งการตัดสินใจ ซึ่งงานวิจัยนี้มีการนำเสนอการหาค่าตำแหน่งของการตัดสินใจอยู่สองวิธีได้แก่ วิธีการตัดสินใจโดยการใช้ค่าประมาณจำนวนเท่าของจำนวนโฟตอนที่ใช้ส่งสัญญาณ และวิธีการตัดสินใจโดยการคำนวณโดยตรงทางทฤษฎี

ก. วิธีการตัดสินใจโดยการใช้ค่าประมาณจำนวนเท่าของจำนวนโฟตอนที่ใช้ส่งสัญญาณ

สำหรับวิธีการตัดสินใจโดยการใช้ค่าประมาณจำนวนเท่าของจำนวนโฟตอนที่ใช้ส่งสัญญาณนั้นอาศัยการประมาณจำนวนเท่าจากค่าของ Threshold ของการผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying ซึ่งมีสมการดังนี้

$$m_T = \frac{K_s}{\log\left(1 + \frac{K_s}{K_b}\right)} \quad (4.10)$$

ซึ่งค่าของตำแหน่งของการตัดสินใจนั้นมีจำนวน 3 ค่า จะมีความสัมพันธ์กับจำนวนโฟตอนเฉลี่ยที่ใช้ในการส่ง เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} m_{T1} &= m_T \\ m_{T2} &= 4m_T \\ m_{T3} &= 9m_T \end{aligned} \quad (4.11)$$

สมการหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาด (PE) คือ

$$\begin{aligned} PWE = & 1 - \frac{1}{4} \sum_{k=0}^{m_{T1}} \frac{K_b^k e^{-K_b}}{k!} - \frac{1}{4} \sum_{k=m_{T1}}^{m_{T2}} \frac{(K_s + K_b)^k e^{-(K_s + K_b)}}{k!} - \frac{1}{4} \sum_{k=m_{T2}}^{m_{T3}} \frac{(4K_s + K_b)^k e^{-(4K_s + K_b)}}{k!} \\ & - \frac{1}{4} \sum_{k=m_{T3}}^{\infty} \frac{(9K_s + K_b)^k e^{-(9K_s + K_b)}}{k!} \end{aligned} \quad (4.12)$$

ข. วิธีการตัดสินใจโดยการคำนวณโดยตรงทางทฤษฎี

สำหรับวิธีการตัดสินใจโดยการคำนวณโดยตรงทางทฤษฎีนั้นจะใช้เงื่อนไขจุดตัดของสมการ 2 สมการเป็นจุดที่ตัดสินใจว่าจุดใดเหมาะสมต่อการเป็นตำแหน่งตัดสินใจ (Decision point) เนื่องจากเป็นจุดที่สมการ 2 สมการมีค่าเท่ากัน ซึ่งหลักการคำนวณหาตำแหน่งการตัดสินใจนี้ได้แสดงวิธีการคำนวณไว้ในภาคผนวก ก ตำแหน่งของการตัดสินใจทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าตำแหน่งการตัดสินใจโดยการคำนวณโดยตรงทางทฤษฎี

สมการที่ 1	สมการที่ 2	ค่าตำแหน่งการตัดสินใจ
$P(m) = \frac{(Kb)^m e^{-(Kb)}}{m!}$	$P(m) = \frac{(Ks + Kb)^m e^{-(Ks+Kb)}}{m!}$	$m_{T1} = \frac{Ks}{\log(Ks + Kb) - \log(Ks)}$
$P(m) = \frac{(Ks + Kb)^m e^{-(Ks+Kb)}}{m!}$	$P(m) = \frac{(4Ks + Kb)^m e^{-(4Ks+Kb)}}{m!}$	$m_{T2} = \frac{3Ks}{\log(4Ks + Kb) - \log(Ks + Kb)}$
$P(m) = \frac{(4Ks + Kb)^m e^{-(4Ks+Kb)}}{m!}$	$P(m) = \frac{(9Ks + Kb)^m e^{-(9Ks+Kb)}}{m!}$	$m_{T3} = \frac{5Ks}{\log(9Ks + Kb) - \log(Ks + Kb)}$

สำหรับสมการหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดนั้นมีลักษณะเช่นเดียวกับวิธีการตัดสินใจแบบประมาณค่า โดยนำค่าการตัดสินใจแบบการคำนวณทางทฤษฎีไปแทนที่ในสมการเท่านั้น

4.4.2 การออกแบบการสื่อสารแบบโพตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

การสื่อสารแบบโพตอนสี่ระดับสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน (Binary Pulse Position Modulation: BPPM) โดยนำมาประยุกต์ใช้งานกับการสื่อสารแบบโพตอนสามระดับซึ่งสามารถแทนด้วยสัญญาณแบบไบนารีขนาด 3 บิต ซึ่งจะสามารถแทนด้วยสัญญาณพัลส์จำนวน 6 รูปแบบ ซึ่งมีขนาดความกว้างพัลส์เท่ากับ $T/2$ วินาที และมีค่าเฉลี่ยของโพตอนคือ $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 4$ และ $\alpha_3 = 9$ ซึ่งกระบวนการจับสัญญาณนั้นอาศัยการเปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดของพัลส์แสงว่าเกิดในคาบเวลาใด และจากนั้นก็ทำการตัดสินใจโดยอาศัยค่าตำแหน่งการตัดสินใจ ซึ่งมีการนำตำแหน่งการตัดสินใจของการสื่อสารแบบโพตอนสี่ระดับมาใช้งานดังนี้

$$\begin{aligned} m_{T1} &= 4m_T \\ m_{T2} &= 9m_T \end{aligned} \quad (4.13)$$

สมการหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาด (PE) คือ

$$\begin{aligned}
PWE = & 1 - \frac{1}{3} \sum_{k_1=1}^{m_{T1}} \sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_1, K_s + K_b) Pos(k_2, K_b) - \frac{1}{3} \sum_{k_1=m_{T1}}^{m_{T2}} \sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_1, 4K_s + K_b) Pos(k_2, K_b) \\
& - \frac{1}{3} \sum_{k_1=m_{T2}}^{\infty} \sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_1, 9K_s + K_b) Pos(k_2, K_b) - \frac{1}{6} \sum_{k_1=0}^{m_{T1}} Pos(k_1, K_s + K_b) Pos(k_1, K_b) \\
& - \frac{1}{6} \sum_{k_1=m_{T1}}^{m_{T2}} Pos(k_1, 4K_s + K_b) Pos(k_1, K_b) - \frac{1}{6} \sum_{k_1=m_{T2}}^{\infty} Pos(k_1, 9K_s + K_b) Pos(k_1, K_b) \quad (4.14)
\end{aligned}$$

ในการทดสอบการทำงานนั้นได้นำวิธีการหาค่าตำแหน่งการตัดสินใจทั้งสองวิธีที่ใช้งานกับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ ดังอธิบายไว้ในหัวข้อ 4.6.1 มาทดสอบ และนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของ การตัดสินใจทั้งสองรูปแบบ

นอกจากนี้ยังมีวิธีการเพิ่มระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยเพื่อให้รูปแบบของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน สามารถใช้งานได้กับข้อมูลที่เป็นไปได้ทั้งหมดคือ 2^3 เท่ากับ 8 บิต ซึ่งมีสมการการหาค่าจำนวนโฟตอนเฉลี่ยในแต่ละระดับดังนี้

$$\sqrt{m_n} = 2\sqrt{m_{n-1}} - \sqrt{m_{n-2}}, \quad n \geq 3 \quad (4.15)$$

จากสมการนั้นต้องทราบค่าจำนวนโฟตอนเฉลี่ยอย่างน้อย 2 ค่า เพื่อหาค่าจำนวนโฟตอนเฉลี่ยในระดับที่สูงขึ้นถัดไป ซึ่งในที่นี้ค่าของ m_{n-1} มีค่าเท่ากับ 9 และ m_{n-2} มีค่าเท่ากับ 4 เมื่อนำมาคำนวณหาค่าจำนวนโฟตอนเฉลี่ยตัวที่ 4 คือ $\sqrt{m_4} = 2\sqrt{9} - \sqrt{4}$ จะได้ m_4 เท่ากับ 16 ดังนั้นจำนวนโฟตอนเฉลี่ยทั้งหมดมีค่าเป็นดังนี้ $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 4, \alpha_3 = 9$ และ $\alpha_4 = 16$

เมื่อนำทฤษฎีการเพิ่มจำนวนโฟตอนเฉลี่ยมาใช้งานร่วมกับการตัดสินใจแบบคำนวณนั้นจะได้ผลของการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีโดยใช้พื้นฐานสมการทางทฤษฎีของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีการใช้งานของค่าโฟตอนเฉลี่ยเพียงสามระดับมาคำนวณ จะได้สมการดังนี้

$$\begin{aligned}
PWE = & 1 - \frac{1}{4} \sum_{k_1=1}^{m_{T1}} \sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_1, K_s + K_b) Pos(k_2, K_b) - \frac{1}{4} \sum_{k_1=m_{T1}}^{m_{T2}} \sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_1, 4K_s + K_b) Pos(k_2, K_b) \\
& - \frac{1}{4} \sum_{k_1=m_{T2}}^{m_{T3}} \sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_1, 9K_s + K_b) Pos(k_2, K_b) - \frac{1}{4} \sum_{k_1=m_3}^{\infty} \sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_1, 16K_s + K_b) Pos(k_2, K_b) \\
& - \frac{1}{8} \sum_{k_1=0}^{m_{T1}} Pos(k_1, K_s + K_b) Pos(k_1, K_b) - \frac{1}{8} \sum_{k_1=m_{T1}}^{m_{T2}} Pos(k_1, 4K_s + K_b) Pos(k_1, K_b) \\
& - \frac{1}{8} \sum_{k_1=m_{T2}}^{m_{T3}} Pos(k_1, 9K_s + K_b) Pos(k_1, K_b) - \frac{1}{8} \sum_{k_1=m_3}^{\infty} Pos(k_1, 16K_s + K_b) Pos(k_1, K_b) \quad (4.16)
\end{aligned}$$

ซึ่งตำแหน่งการตัดสินใจตำแหน่งที่ 3 ของวิธีการประมาณค่าจะมีค่าเท่ากับ $16m_7$ และจากวิธีการคำนวณหาได้จากสมการทั่วไปของการตัดสินใจในภาคผนวก ก คือ

$$m_{T_n} = \frac{Ks_{n+1} - Ks_n}{\log(Ks_{n+1} + Kb) - \log(Ks_n + Kb)} \quad (4.17)$$

$$m_{T_3} = \frac{16Ks - 9Ks}{\log(16Ks + Kb) - \log(9Ks + Kb)} = \frac{7Ks}{\log(16Ks + Kb) - \log(9Ks + Kb)} \quad (4.18)$$

4.4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับแต่ละรูปแบบ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับแต่ละรูปแบบ เป็นการรวบรวมวิธีการต่างๆ ในการประยุกต์ใช้งานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานรูปแบบต่างๆ ดังนี้

- การเปรียบเทียบผลของการใช้ตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่าและการตัดสินใจแบบการคำนวณ
- การเปรียบเทียบผลของการนำการผสมสัญญาณแบบ ไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันมาใช้งานร่วมกับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับกับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ
- การเปรียบเทียบผลของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบ ไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีการเพิ่มระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยกับแบบการใช้งานของโฟตอนเพียงสามระดับ

4.5 การเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนวอลูชัน

การเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนวอลูชันนั้นเป็นกระบวนการที่นำมาใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณเพื่อให้ประสิทธิภาพของการรับส่งข้อมูลเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลแตกต่างกันได้แก่ ค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิด (Generator matrix) ค่าจำนวนชุดของสัญลักษณ์ข้อมูลที่ใช้ในการเข้ารหัสแต่ละรอบ (Constraint Length) และอัตราการเข้ารหัส (R) ซึ่งในงานวิจัยนี้มีการทดสอบคุณสมบัติของพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.5.1 ค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิด

สำหรับเมตริกซ์ตัวกำเนิดที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติของเมตริกซ์ตัวกำเนิด จะใช้เมตริกซ์ที่ให้อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $1/2$ และมีค่า Constraint Length เท่ากับ 3 ซึ่งค่า g ที่สามารถใช้เป็นเมตริกซ์ตัวกำเนิดได้นั้นจะต้องเป็น g ที่มีค่าในตำแหน่งแรกเป็น "1" เพื่อให้ข้อมูลที่ต้องการนำเข้ารหัสได้ผ่านวงจรการเข้ารหัส จึงมีค่า g ที่เป็นไปได้ทั้งหมดจำนวน 4 ค่า ได้แก่ $[1 \ 1 \ 1]$,

[1 1 0], [1 0 1] และ [1 0 0] ในการทดสอบนี้ได้กำหนดให้ค่า g_1 มีค่าเท่ากับ [1 1 1] เนื่องจากต้องการให้ค่าเอาท์พุทที่ได้จากการเข้ารหัสอย่างน้อย 1 ค่ามีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลในอดีตทุกตัวกับข้อมูลที่นำมาเข้ารหัส ส่วนค่า g_2 มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เมตริกซ์ตัวกำเนิดชนิดต่างๆ

รูปแบบที่	g_1	g_2
1	1 1 1	1 0 1
2	1 1 1	1 0 0
3	1 1 1	1 1 0

4.5.2 อัตราการเข้ารหัส

สำหรับการทดสอบคุณสมบัติของอัตราการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนั้นจะใช้ค่า Constraint Length เท่ากับ 3 และค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดที่ซ้ำกัน 2 ค่าคือ g_1 และ g_2 ตามลำดับ โดยใช้ค่า g จากการทดสอบค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิด โดยค่า g_1 มีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลในอดีตทุกตัวกับข้อมูลที่นำมาเข้ารหัสคือ [1 1 1] ส่วน g_2 มีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลในอดีตอย่างน้อย 1 ตัวกับข้อมูลที่นำมาเข้ารหัสคือ [1 0 1] และค่า g_3 สำหรับอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/3 แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบอัตราการเข้ารหัส

อัตราการเข้ารหัส	g_1	g_2	g_3
1/2	1 1 1	1 0 1	-
1/3	1 1 1	1 0 1	1 0 0

4.5.3 ค่าจำนวนชุดของสัญลักษณ์ข้อมูลที่ใช้ในการเข้ารหัสแต่ละรอบ (Constraint Length)

สำหรับการทดสอบคุณสมบัติของ Constraint Length นั้นจะใช้อัตราการเข้ารหัสเท่ากับ 1/2 และมีเมตริกซ์ตัวกำเนิดที่ลักษณะคล้ายคลึงกันเพื่อให้มีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลในอดีตอย่างน้อย 1 ตัวกับข้อมูลที่นำมาเข้ารหัสดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่า Constraint Length

Constraint Length	g_1	g_2
3	1 1 1	1 0 1
5	1 1 1 1 1	1 0 0 0 1

ซึ่งการทดสอบคุณสมบัติของพารามิเตอร์ทั้งสามนั้นจะทดสอบจากการจำลองการทำงานโดยใช้กระบวนการผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying และช่องสัญญาณรบกวนแบบปัวส์ซอง

4.5.4 การเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ

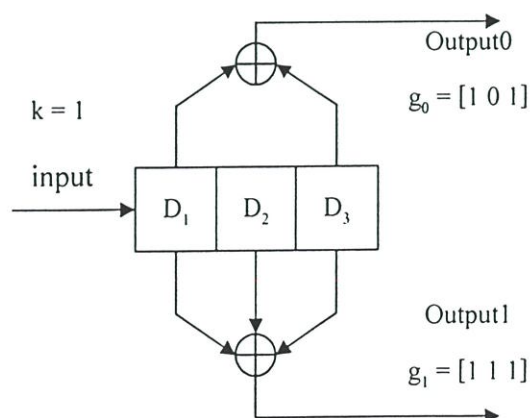
การทดสอบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ ตามหัวข้อที่ 4.3 กับรหัสแบบคอนโวลูชันนั้นจะทำการทดสอบทั้งในช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์และสัญญาณรบกวนแบบปัวส์ซอง โดยใช้ค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดเท่ากับ $[1 \ 0 \ 1]$ และ $[1 \ 1 \ 1]$ ซึ่งจะมีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $1/2$ และ Constraint Length เท่ากับ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.4

4.5.5 การเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ

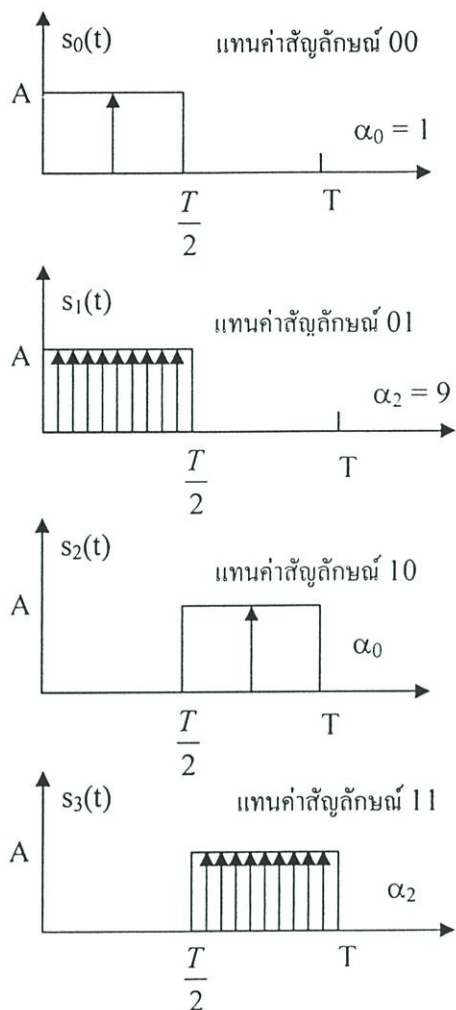
การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับกับรหัสแบบคอนโวลูชันนั้นมีการทำการออกแบบการทดสอบไว้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยได้ดังต่อไปนี้

ก. การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับกับรหัสแบบคอนโวลูชันจะมีค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดเท่ากับ $[1 \ 0 \ 1]$ และ $[1 \ 1 \ 1]$ ซึ่งจะมีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $1/2$ และ Constraint Length เท่ากับ 3 ดังแสดงในรูปที่ 4.4

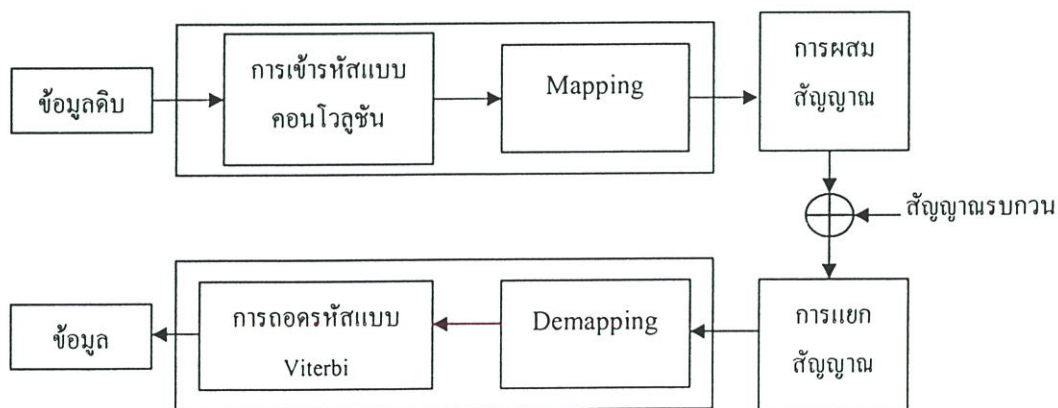
ข. การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันกับรหัสแบบคอนโวลูชัน จะมีค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดเท่ากับ $[1 \ 0 \ 1]$ และ $[1 \ 1 \ 1]$ ซึ่งจะมีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $1/2$ และ Constraint Length เท่ากับ 3 ซึ่งจะต้องทำการเลือกรูปแบบของสัญญาณให้สอดคล้องกับผลจากการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน ดังนั้นรูปแบบของสัญญาณที่นำมาใช้ในการผสมสัญญาณเป็น $\alpha_1 = 1$ และ $\alpha_2 = 9$ และตำแหน่งการตัดสินใจจะมีค่าเท่ากับ $4m_j$ ซึ่งรูปแบบของสัญญาณที่ใช้แสดงดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 รูปแบบของรหัสแบบคอนโวลูชันที่ใช้สำหรับทดสอบกับการผสมสัญญาณเชิงแสง



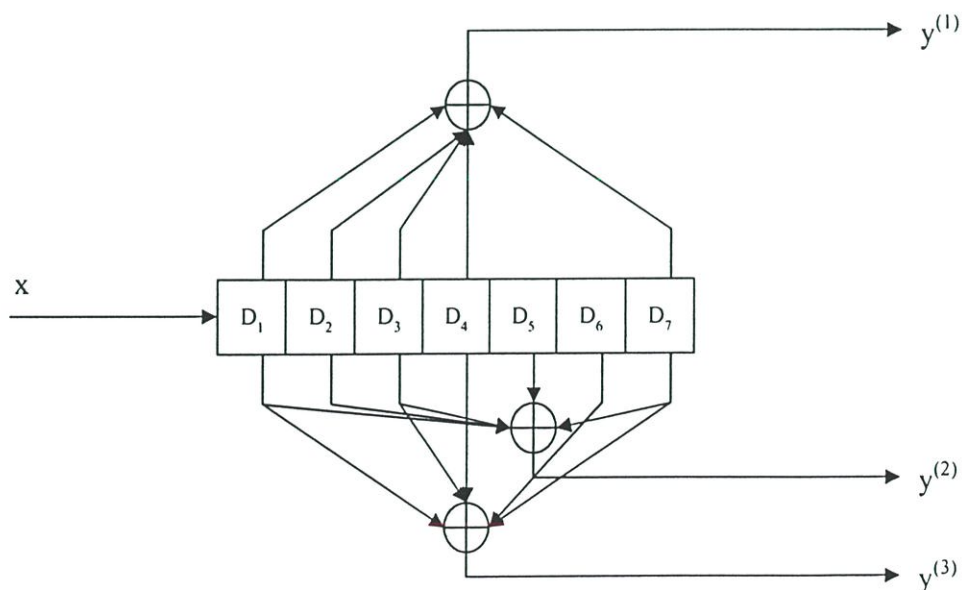
รูปที่ 4.5 รูปแบบการทำงานของ การสื่อสารแบบพอดอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันและรหัสแบบคอนวอลูชันที่มีการลดระดับของจำนวนพอดอนเฉลี่ย



รูปที่ 4.6 รูปแบบการทำงานของ การสื่อสารแบบพอดอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันและรหัสแบบคอนวอลูชันที่มีการลดจำนวนบิต

ก. การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันกับรหัสแบบคอนโวลูชัน สำหรับวิธีการนี้มีการนำเสนอรูปแบบการเปลี่ยนข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันให้เหมาะสมกับรูปแบบการส่งสัญญาณของสื่อสารแบบโฟตอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ซึ่งเป็นการนำกระบวนการลดจำนวนบิตข้อมูล (Puncture) มาใช้งานร่วมกับการเพิ่มบิตตรวจสอบรูปแบบของข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันซึ่งเรียกรวมกันว่ากระบวนการแมปปิง (Mapping) ซึ่งกระบวนการทำงานทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.6 และมีการอธิบายวิธีการทำงานของกระบวนการทั้งหมดในภาคผนวก ข สำหรับเมตริกซ์ตัวกำเนิดที่ใช้มีค่าเท่ากับ $[1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1]$ $[1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1]$ และ $[1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1]$ ซึ่งมีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $1/3$ และค่า Constraint length เท่ากับ 7 ซึ่งโครงสร้างของรหัสแบบคอนโวลูชันแสดงดังรูปที่ 4.7

ง. การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันกับรหัสแบบคอนโวลูชัน ซึ่งจะใช้รูปแบบของการส่งสัญญาณเป็นรูปแบบที่มีการเพิ่มระดับของจำนวนโฟตอนี่เฉลี่ยคงแสดงวิธีการคำนวณไว้ในสมการ 4.15 เพื่อให้รองรับกับรูปแบบของข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน ซึ่งค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดที่ใช้มีค่าเท่ากับ $[1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1]$ $[1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1]$ และ $[1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1]$ ซึ่งมีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $1/3$ และค่า Constraint length เท่ากับ 7 สำหรับโครงสร้างของรหัสแบบคอนโวลูชันแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 รูปแบบการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันสำหรับการสื่อสารแบบโฟตอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

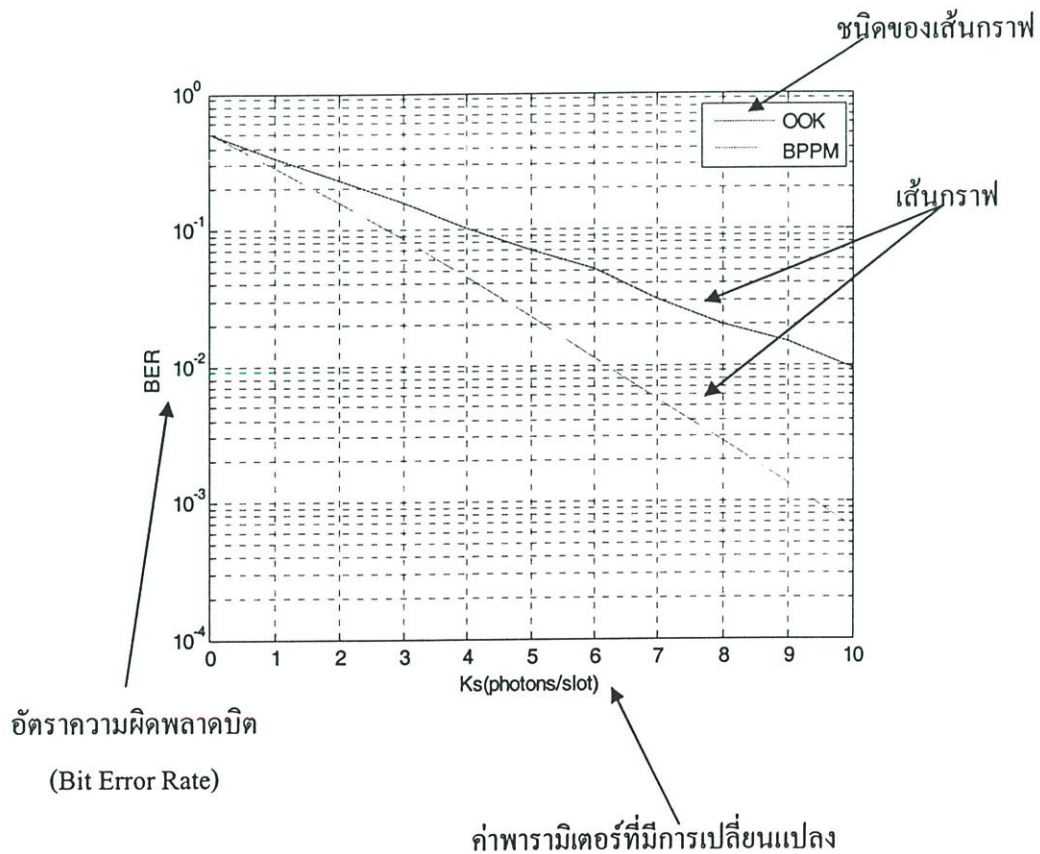
บทที่ 5

ผลการทดสอบ

บทนี้แสดงผลของการทดสอบในรูปแบบต่างๆ ที่กล่าวในบทที่ 4 ได้แก่การออกแบบระบบสื่อสาร การออกแบบช่องสัญญาณ การออกแบบการผสมสัญญาณเชิงแสง การสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ และการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนโวลูชัน ซึ่งผลการทดสอบจะแสดงในรูปของกราฟที่เปรียบเทียบตามข้อกำหนดต่างๆ ที่กล่าวไว้ดังต่อไปนี้

5.1 ผลการออกแบบระบบสื่อสารเชิงแสง

ผลการของหาอัตราความผิดพลาดของข้อมูลระบบสื่อสารเชิงแสงนั้นมีการนำเสนอรูปแบบของแบบกราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราความผิดพลาดกับจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อสล็อตเมื่อเป็นช่องสัญญาณแบบพัลส์ของ และกราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตเมื่อเป็นช่องสัญญาณแบบเกาส์ ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างผลการจำลองการทำงานของโปรแกรม MATLAB

5.2 ผลการออกแบบช่องสัญญาณ

ผลการออกแบบช่องสัญญาณแบ่งออกเป็นสองส่วน ตามหัวข้อการออกแบบช่องสัญญาณในบทที่ 4 คือผลของการออกแบบช่องสัญญาณแบบเกาส์เซียนและผลของการออกแบบช่องสัญญาณแบบบีวส์ซอง

5.2.1 ผลการออกแบบช่องสัญญาณแบบเกาส์

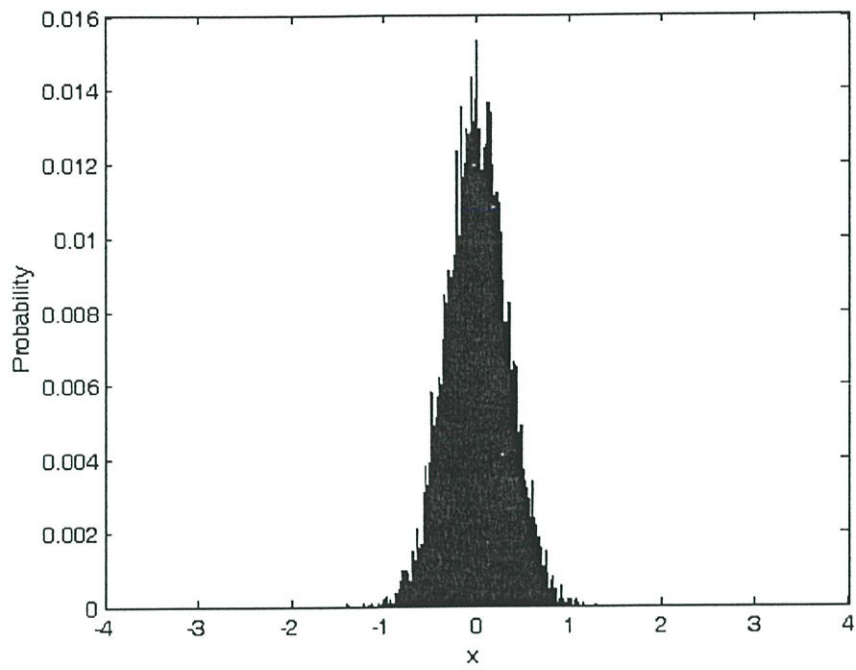
การกระจายแบบเกาส์เป็นการกระจายที่มีลักษณะคล้ายกับระฆังคว่ำซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อการกระจายแบบเกาส์ได้แก่ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าความแปรปรวน (Variance) สำหรับผลของการออกแบบช่องสัญญาณแบบเกาส์นั้นแสดงดังรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นผลการออกแบบการกระจายโดยใช้ค่าเฉลี่ยของการกระจายเท่ากับศูนย์เพื่อจะนำไปใช้งานกับช่องสัญญาณแบบเกาส์จริงที่ใช้ในระบบสื่อสารโดยทั่วไป

สรุปได้ว่าเมื่อค่าความแปรปรวนเพิ่มขึ้นจะทำให้การกระจายตัวของสัญญาณเพิ่มมากขึ้นมีการกระจายตัวห่างจากค่าเฉลี่ยมากยิ่งขึ้น ซึ่งเมื่อเทียบกับระบบสื่อสารจริงพบว่ามีความสอดคล้องกับค่าของอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (SNR) คือเมื่อค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของสัญญาณรบกวนมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนมีค่าลดลง ดังนั้นการกระจายของสัญญาณรบกวนจึงมีค่าลดลงตามไปด้วย

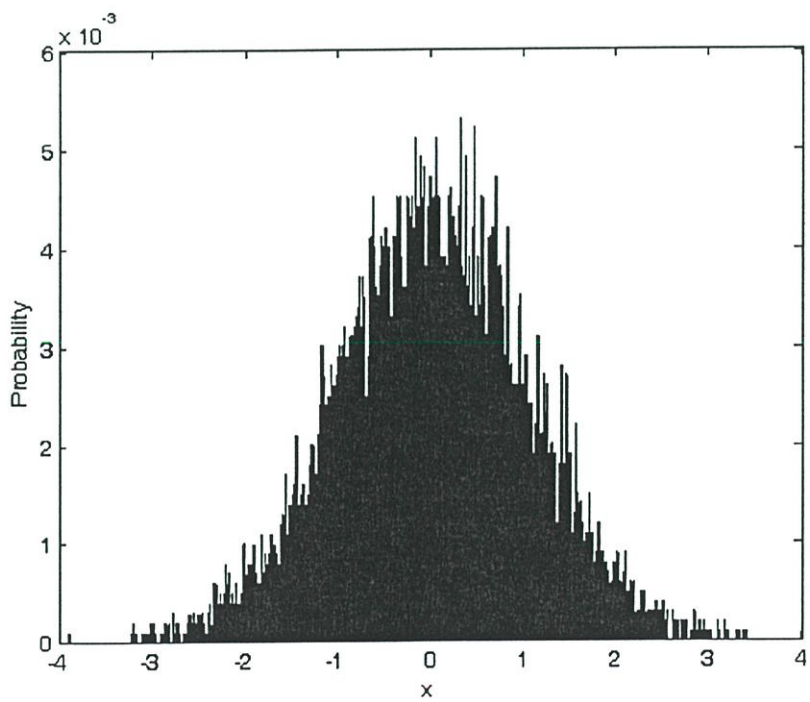
5.2.2 ผลการออกแบบช่องสัญญาณแบบบีวส์ซอง

การกระจายแบบบีวส์ซองเป็นการกระจายที่มีลักษณะเบ้ไปทางด้านใดด้านหนึ่งซึ่งเป็นผลมาจากการที่ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าความแปรปรวน (Variance) มีค่าเท่ากัน ผลของการออกแบบช่องสัญญาณแบบบีวส์ซองนั้นแสดงดังรูปที่ 5.3 ซึ่งเป็นผลการออกแบบช่องสัญญาณที่มีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนเท่ากับ 5 ณ ตำแหน่งของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนนี้จะใช้วิธีการออกแบบโดยทฤษฎีแบบโดยตรงดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5.2.4 ก. ซึ่งจะมีลักษณะของการกระจายของสัญญาณมีการเบ้ไปทางด้านซ้ายมือ ส่วนผลการออกแบบช่องสัญญาณที่มีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนเท่ากับ 20 ณ ตำแหน่งของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนนี้จะใช้วิธีการออกแบบโดยใช้ทฤษฎีโดยอ้อม ซึ่งจะมีลักษณะใกล้เคียงกับระฆังคว่ำ

สรุปได้ว่าเมื่อค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของการกระจายแบบบีวส์ซองมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้มีการกระจายของสัญญาณเพิ่มมากขึ้น จะทำให้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบบีวส์ซองมีความใกล้เคียงกับระฆังคว่ำมากยิ่งขึ้น ซึ่งเมื่อนำมาเทียบกับระบบสื่อสารจริงนั้นจะพบว่าสามารถนำมาใช้ในระบบสื่อสารเชิงแสงซึ่งมีตัวแปรที่สอดคล้องกับการกระจายแบบบีวส์ซองคือการเกิดจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อสล็อตและสัญญาณรบกวนเฉลี่ยต่อสล็อตในพัลส์แสง ซึ่งจะมีการกระจายตัวของจำนวนโฟตอนและสัญญาณรบกวนที่กว้างขึ้นเมื่อค่าเพิ่มขึ้น

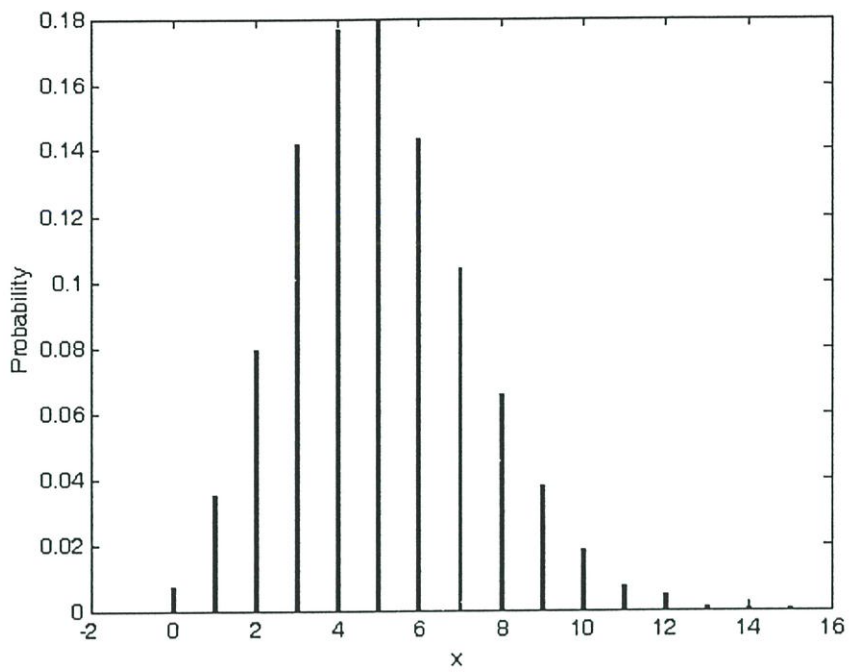


(a)

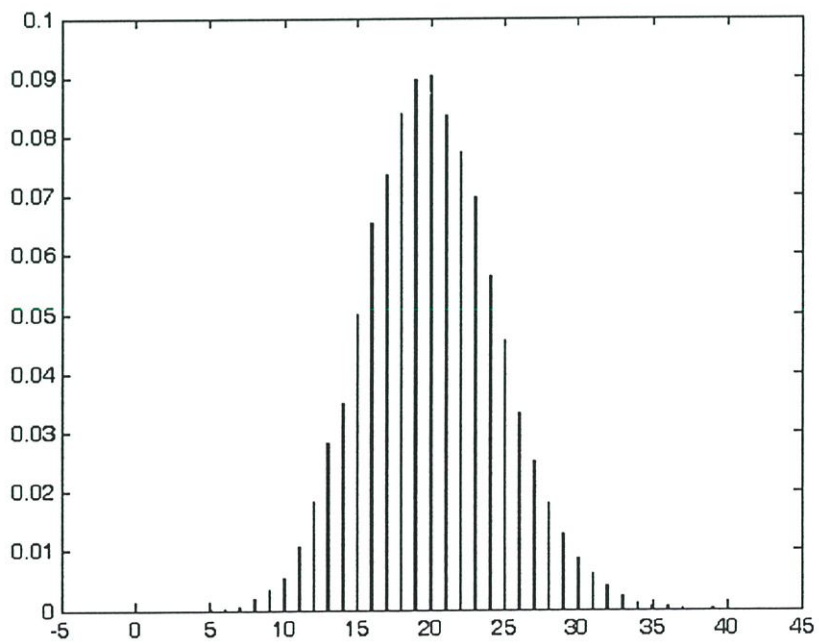


(b)

รูปที่ 5.2 ผลของการออกแบบช่องสัญญาณแบบเกาส์ (a) ความแปรปรวนเท่ากับ 0.1 (b) ความแปรปรวนเท่ากับ 1



(a)



(b)

รูปที่ 5.3 ผลของการออกแบบช่องสัญญาณแบบปัวส์ซง (a) ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนเท่ากับ 5
(b) ค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนเท่ากับ 20

5.3 ผลการจำลองการทำงานของการทำงานของการผสมสัญญาณ

การจำลองการทำงานของการทำงานของการผสมสัญญาณรูปแบบต่างๆ ดังหัวข้อ 4.3 ในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB เพื่อเปรียบเทียบกับ PE ที่คำนวณจากสมการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดนั้นไม่สามารถทำได้ทุกรูปแบบของการผสมสัญญาณและทุกช่องสัญญาณ เนื่องจากรูปแบบความน่าจะเป็นในการเกิดความถูกต้องของการเกิดสัญญาณของการผสมสัญญาณบางรูปแบบนั้นมีความยากในการคำนวณออกมาเป็นทางสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแสดงผลได้ดังนี้

5.3.1 ผลการจำลองการทำงานของสัญญาณแบบ On-Off Keying

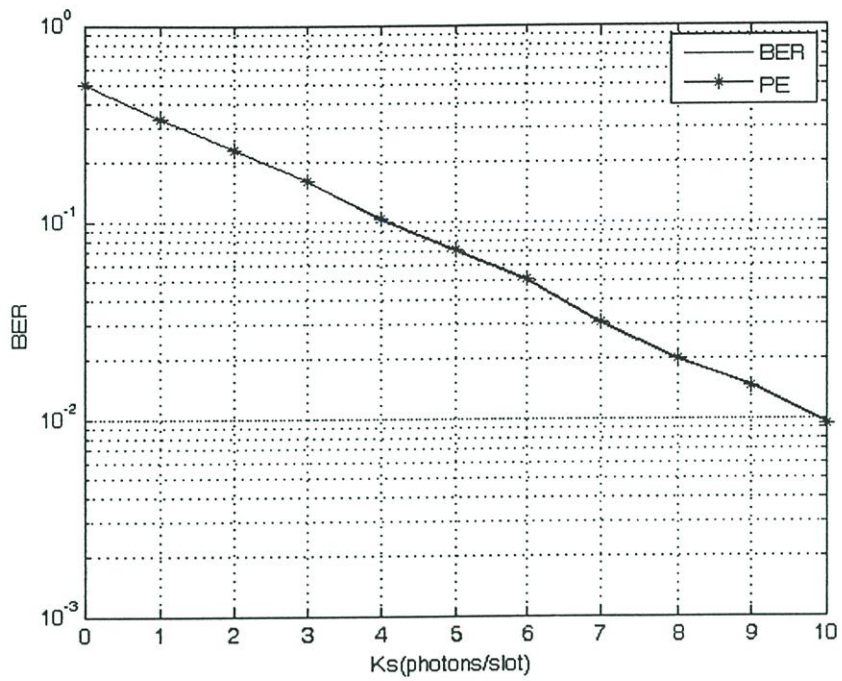
การทดสอบการจำลองการทำงานของการทำงานของการผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying สามารถทำการทดสอบได้ทั้งช่องสัญญาณแบบเกาส์และช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง ซึ่งผลของการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณได้จากสมการ แสดงได้ดังรูปที่ 5.4

การจำลองการทำงานของการทำงานของการผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying มีรูปแบบของการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.2 ส่วนค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดของช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองนั้นแสดงในสมการ (4.1) และช่องสัญญาณแบบเกาส์แสดงในสมการ (4.2) รายละเอียดของการสร้างการผสมสัญญาณและหลักการคำนวณสมการค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดในช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองแสดงในภาคผนวก ก.1 ผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงานในช่องสัญญาณทั้งสองรูปแบบนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมากจนเส้นกราฟเกือบจะซ้อนทับกันแสดงว่าโปรแกรมมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้

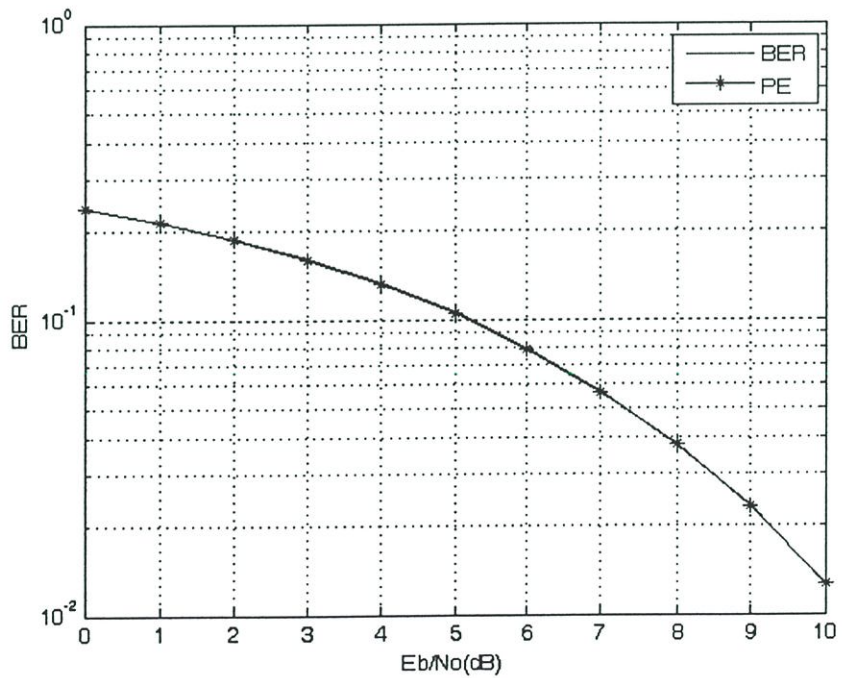
5.3.2 ผลการจำลองการทำงานของสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

การทดสอบการจำลองการทำงานของการทำงานของการผสมสัญญาณแบบ ไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันสามารถทำได้ทั้งช่องสัญญาณแบบเกาส์และช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง ผลของการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณได้จากสมการ แสดงดังรูปที่ 5.5

การจำลองการทำงานของการทำงานของการผสมสัญญาณแบบ ไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันมีรูปแบบของการจำลองการทำงานดังรูปที่ 4.2 ส่วนค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดของช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองนั้นแสดงในสมการ (4.3) และช่องสัญญาณแบบเกาส์แสดงในสมการ (4.4) รายละเอียดของการสร้างการผสมสัญญาณและหลักการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดในช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองแสดงในภาคผนวก ก.2 ผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงานในช่องสัญญาณทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมากจนเส้นกราฟเกือบจะซ้อนทับกันแสดงว่าโปรแกรมมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้

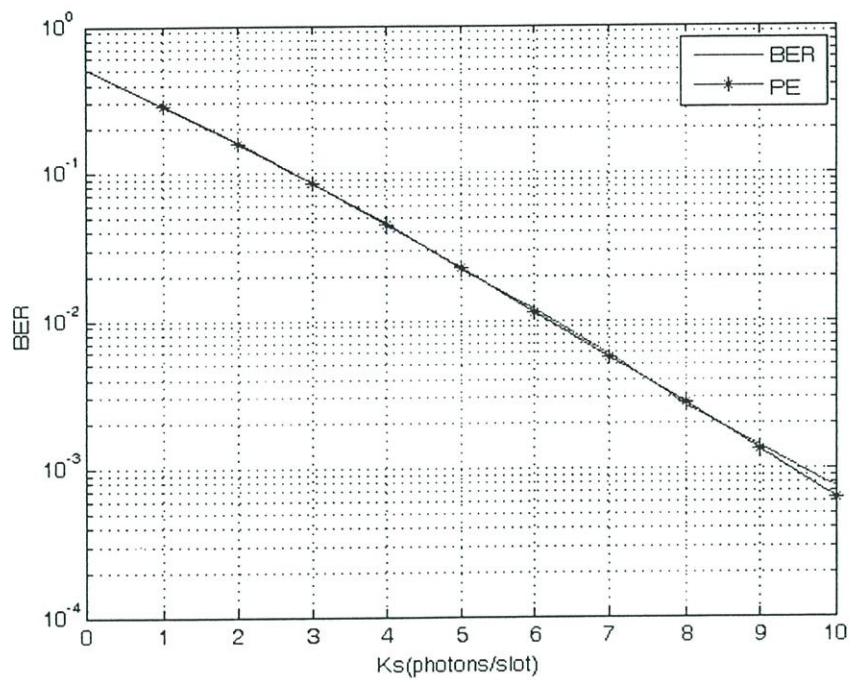


(a)

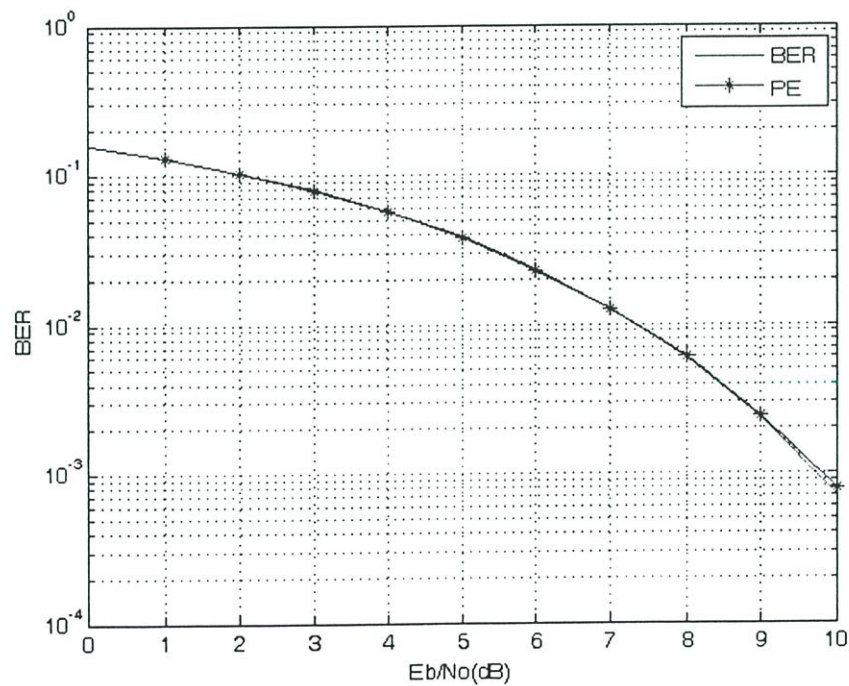


(b)

รูปที่ 5.4 การจำลองการทำงานการผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying เปรียบเทียบกับความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ (4.1) และ (4.2) (a) ช่องสัญญาณแบบพัลส์ของ (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์



(a)



(b)

รูปที่ 5.5 การจำลองการทำงานการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ (4.3) และ (4.4)
 (a) ช่องสัญญาณแบบปีวส์ซง (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์

5.3.3 ผลการจำลองการทำงานสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

การทดสอบการจำลองการทำงานของการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันสามารถทำได้ทั้งช่องสัญญาณแบบเกาส์และช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง ซึ่งผลของการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ แสดงดังรูปที่ 5.6

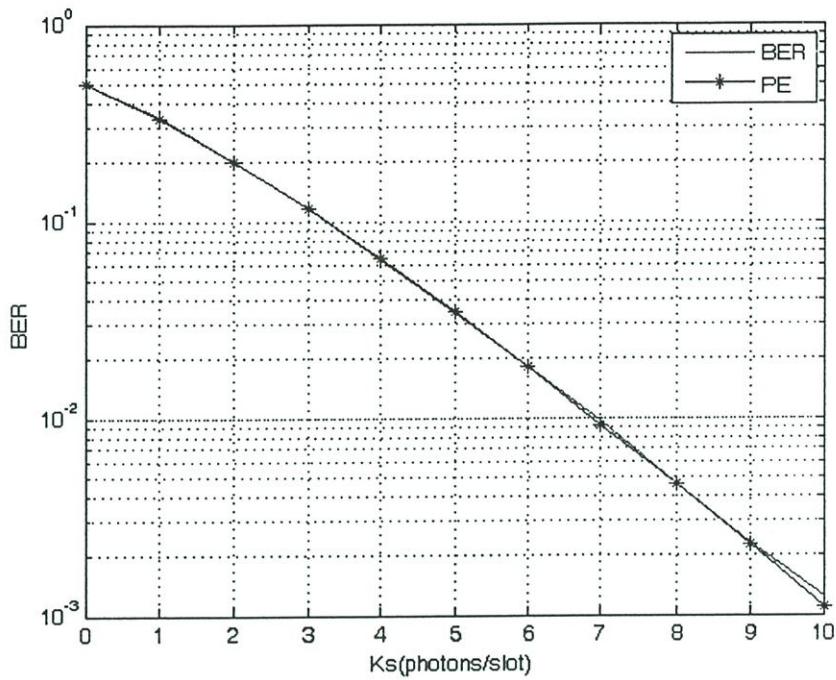
การจำลองการทำงานของการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันมีรูปแบบของการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.2 ส่วนค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดสัญลักษณ์ของช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองนั้นแสดงในสมการ (4.6) และช่องสัญญาณแบบเกาส์แสดงในสมการ (4.7) สำหรับรายละเอียดของการสร้างการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันและหลักการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดสัญลักษณ์ในช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองแสดงในภาคผนวก ก.3 ซึ่งค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$PE = \left(\frac{\frac{M}{2}}{M-1} \right) PWE \quad (5.1)$$

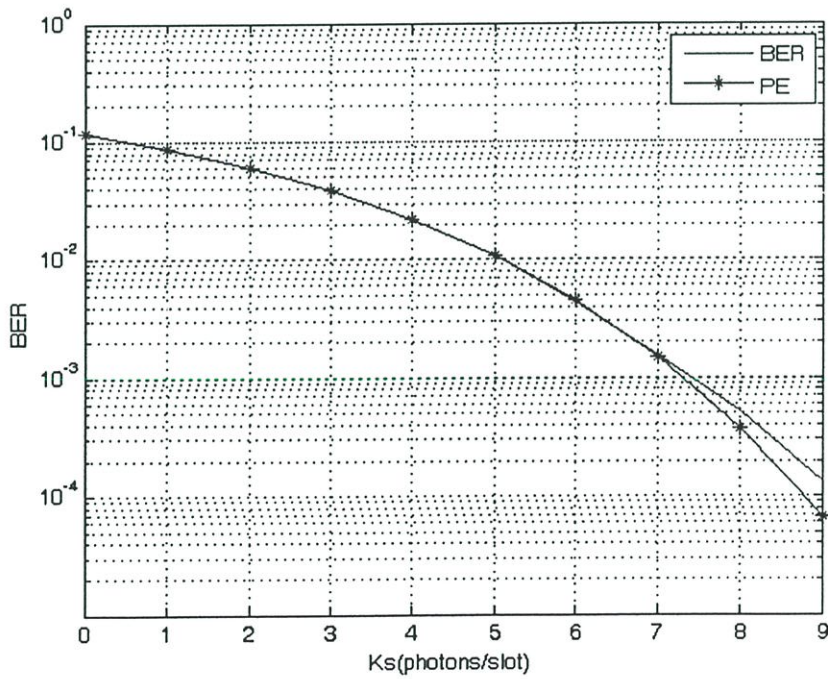
จากผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงานในช่องสัญญาณทั้งสองรูปแบบพบว่าเมื่ออัตราความผิดพลาดใกล้เคียงกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณมาจนเส้นกราฟเกือบจะซ้อนทับกันแสดงว่าโปรแกรมที่ได้ทำการออกแบบมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้

5.3.4 ผลการจำลองการทำงานสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation

การทดสอบการจำลองการทำงานของการผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation เปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดสัญลักษณ์ที่คำนวณได้จากสมการนั้นสามารถทำการเปรียบเทียบได้เฉพาะในช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองเท่านั้น ส่วนช่องสัญญาณแบบเกาส์นั้นไม่สามารถคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดสัญลักษณ์ได้เนื่องมาจากลักษณะของการเกิดความผิดพลาดแต่ละรูปแบบนั้นมีความซับซ้อนค่อนข้างมากยากต่อการทำความเข้าใจและยังไม่มีผู้นำเสนอการแปรผลการเกิดความผิดพลาดออกมาให้อยู่ในรูปสมการค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาด สำหรับผลของการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการในช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองและผลของการจำลองการทำงานในช่องสัญญาณแบบเกาส์ แสดงดังรูปที่ 5.7



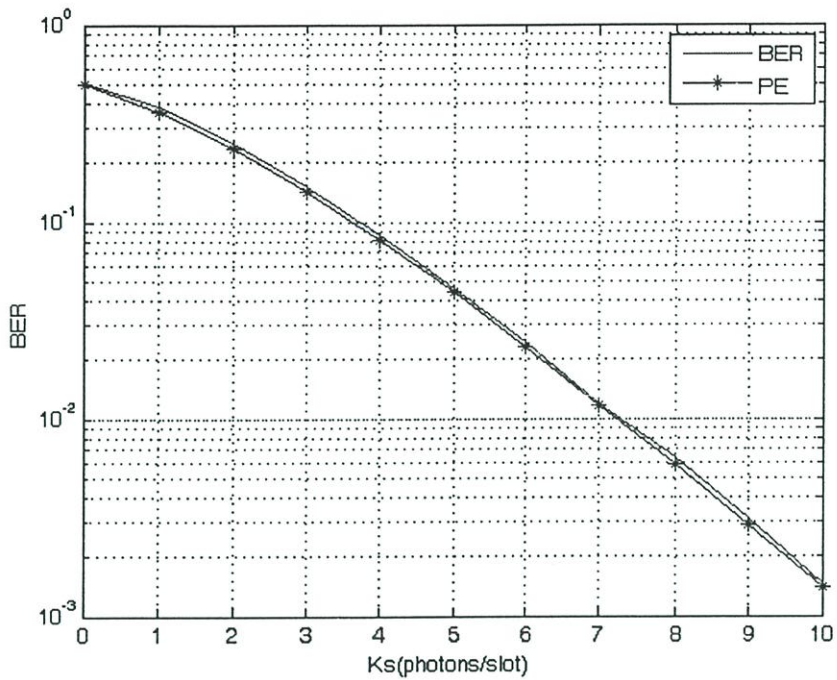
(a)



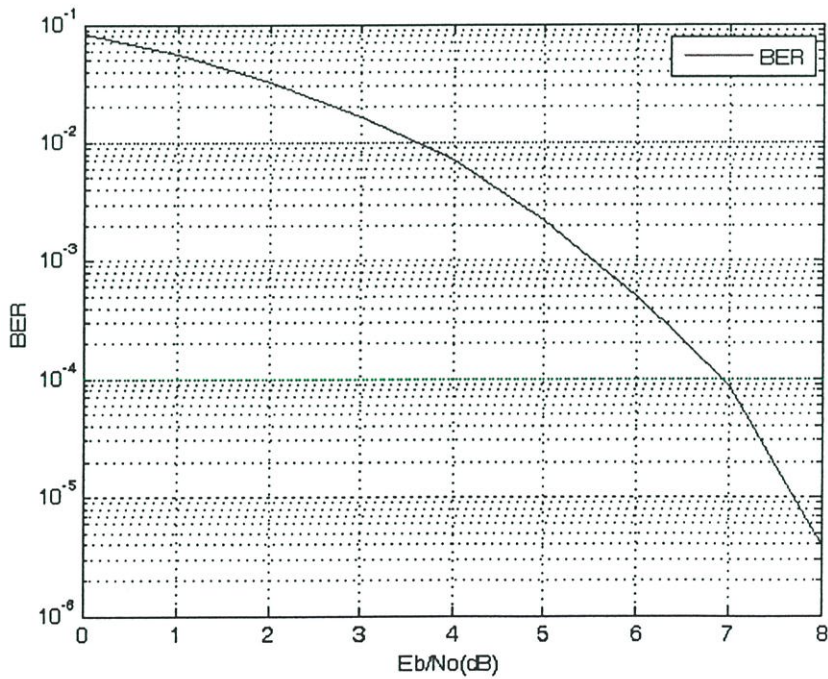
(b)

รูปที่ 5.6 การจำลองการทำงานการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ (4.6) และ (4.7)

(a) ช่องสัญญาณแบบปีวส์ซง (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์



(a)



(b)

รูปที่ 5.7 การจำลองการทำงานการผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation (a) ช่องสัญญาณแบบบิตของเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นที่คำนวณได้จากสมการ (4.8) (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์

การจำลองการทำงานของการผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation มีรูปแบบของการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.2 ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดสัญลักษณ์ที่คำนวณจากสมการแสดงในสมการ (4.8) สำหรับรายละเอียดของการสร้างการผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation และหลักการคำนวณหาอัตราความผิดพลาดต่อสัญลักษณ์แสดงในภาคผนวก ก.4 อัตราความผิดพลาดบิตสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$PE = \frac{1}{2} \left(\frac{\frac{N(N-1)}{2}}{\frac{N(N-1)}{2} - 1} \right) PWE \quad (5.2)$$

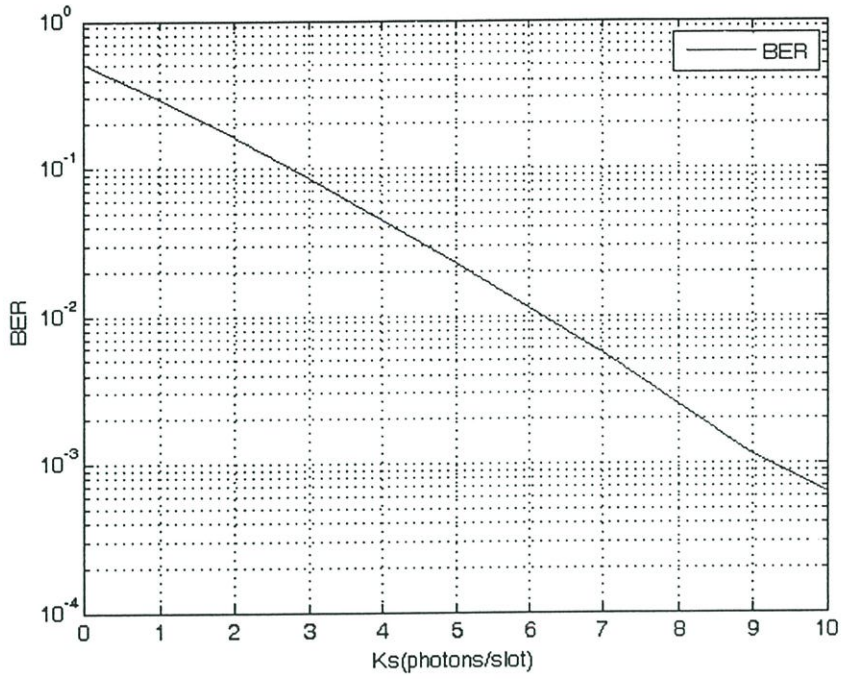
ผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงานในช่องสัญญาณแบบบีวส์ของมีค่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีเล็กน้อยแสดงว่าโปรแกรมมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้ ส่วนช่องสัญญาณแบบเกาส์นั้นกราฟมีการลดลงคล้ายน้ำตกซึ่งเป็นคุณสมบัติของอัตราความผิดพลาดแสดงว่าการจำลองการทำงานน่าจะมีมีความถูกต้อง

5.3.5 ผลการจำลองการทำงานสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation

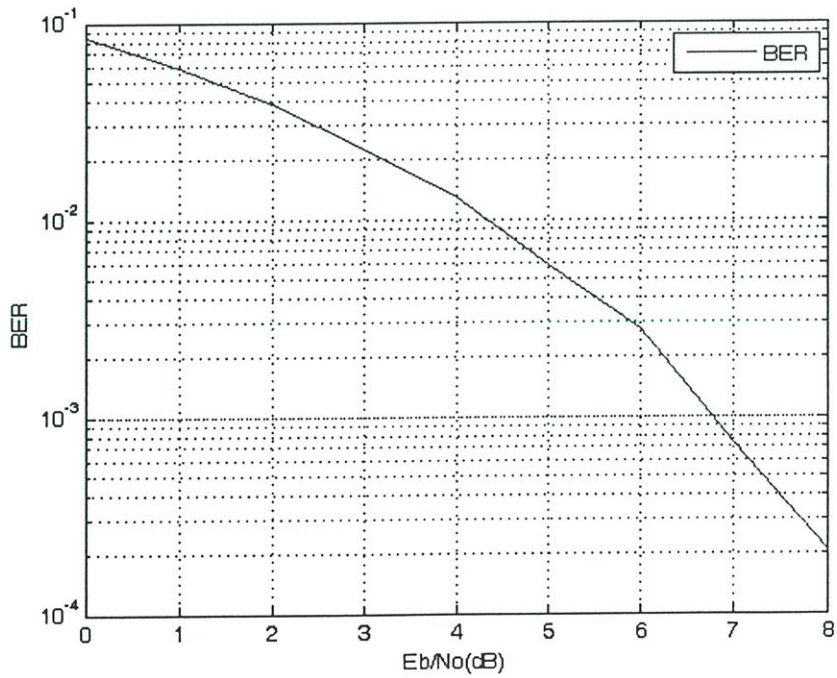
การทดสอบการจำลองการทำงานของการผสมสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation นั้นใช้วิธีการสังเกตความถูกต้องของโปรแกรมจากรูปแบบของกราฟเนื่องจากยังไม่มีผลการแปรผลอัตราความผิดพลาดให้อยู่ในรูปของสมการ ซึ่งผลของการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 5.8 จากกราฟพบว่าผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงานในช่องสัญญาณทั้งสองรูปแบบนั้นมีค่าลดลงโดยมีลักษณะการลดลงของค่าอัตราความผิดพลาดต่อบิตคล้ายกับน้ำตกซึ่งเป็นคุณสมบัติของการเกิดอัตราความผิดพลาดที่มีผลตามหลักการของการจำลองการทำงานในระบบสื่อสาร

5.3.6 ผลการจำลองการทำงานสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation

การทดสอบการจำลองการทำงานของการผสมสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation ไม่มีผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดสัญลักษณ์มาเปรียบเทียบแต่จะสังเกตความถูกต้องของโปรแกรมจากรูปแบบของกราฟ ผลของการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 5.9 จากกราฟพบว่าผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงานในช่องสัญญาณทั้งสองรูปแบบนั้นมีค่าลดลงโดยมีลักษณะการลดลงของค่าอัตราความผิดพลาดต่อบิตคล้ายกับน้ำตกซึ่งเป็นคุณสมบัติของการเกิดอัตราความผิดพลาดที่มีผลตามหลักการของการจำลองการทำงานในระบบสื่อสาร



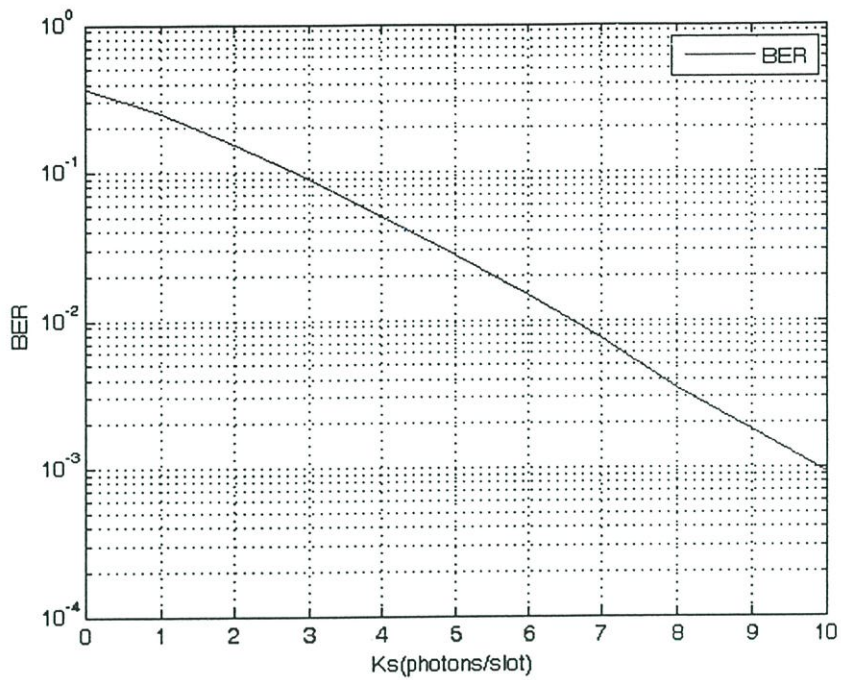
(a)



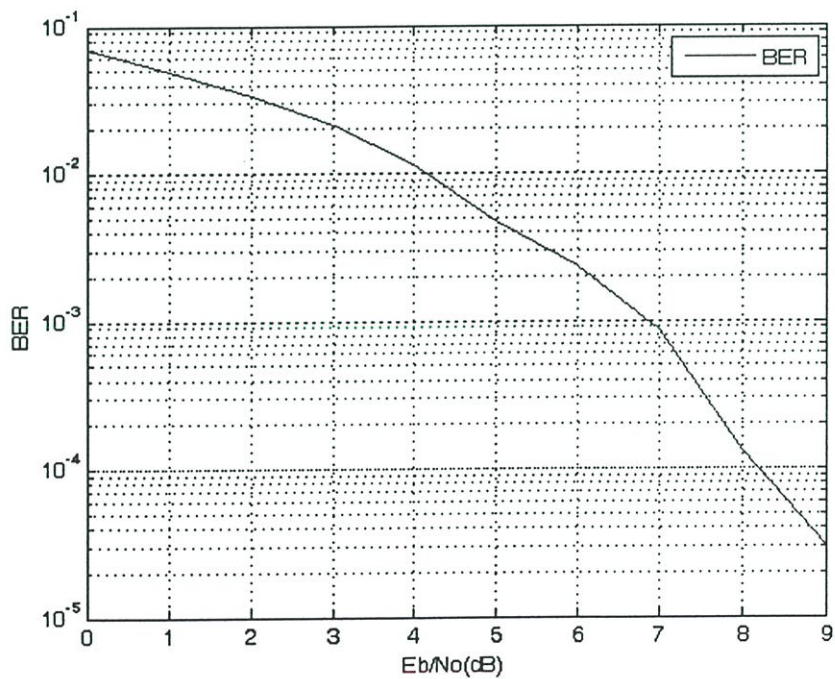
(b)

รูปที่ 5.8 การจำลองการทำงานการผสมสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation

(a) ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์



(a)



(b)

รูปที่ 5.9 การจำลองการทำงานการผสมสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation

(a) ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์

5.3.7 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณโดยพิจารณาจากค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูล (Throughput)

การพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ โดยพิจารณาจากค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูลนั้นเป็นการทดสอบว่าเมื่อมีปริมาณข้อมูลที่ส่งไปในระบบสื่อสารที่เท่ากัน รูปแบบการผสมสัญญาณ ใดมีประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพทั้งในช่องสัญญาณแบบบีบอัดและช่องสัญญาณแบบเกาส์ ผลของการทดสอบเป็นดังต่อไปนี้

ก. เมื่อค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูล (Throughput) มีค่าเท่ากับ 1 b/sec/Hz เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying และการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันซึ่งผลของการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5.10 พบว่าการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันมีประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณดีกว่าการผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying ทั้งในช่องสัญญาณแบบบีบอัดและช่องสัญญาณแบบเกาส์อันเนื่องมาจากการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันนั้นเป็นการส่งสัญญาณทีละครั้งคาบเวลาและที่ภาครับจะใช้กระบวนการเปรียบเทียบค่าสัญญาณที่ได้รับในแต่ละครั้งคาบเวลา ซึ่งจะส่งผลให้การตัดสินใจที่ภาครับมีประสิทธิภาพดีกว่าการตัดสินใจของการผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying ที่อาศัยตำแหน่งการตัดสินใจแบบใช้ค่า Threshold

สรุปได้ว่า เมื่อมีปริมาณของข้อมูลที่ส่งไปในระบบสื่อสารที่เท่ากันการผสมสัญญาณที่ใช้พัลส์แอสในการส่งสัญญาณนั้นจะมีประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่อมีแบนด์วิธเพิ่มขึ้น ซึ่งในการเพิ่มแบนด์วิธในที่นี้ส่งผลให้กระบวนการตัดสินใจมีความแตกต่างกันด้วย

ข. เมื่อค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูล (Throughput) มีค่าเท่ากับ 2 b/sec/Hz เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการผสมสัญญาณแบบ 4-พัลส์โพสิชันมอดูเลชัน การผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation และการผสมสัญญาณแบบ (3, 2) Overlapping Pulse Position Modulation ซึ่งผลของการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5.11 พบว่าในช่องสัญญาณแบบบีบอัด การผสมสัญญาณแบบ (3, 2) Overlapping Pulse Position Modulation และการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation นั้นมีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณดีกว่าการผสมสัญญาณแบบ 4-พัลส์โพสิชันมอดูเลชันอันเนื่องมาจากการผสมสัญญาณแบบ (3, 2) Overlapping Pulse Position Modulation นั้นยอมให้พัลส์แอสมีการเหลื่อมล้ำกันได้ทำให้เมื่อเกิดความผิดพลาดของการเกิดพัลส์แอสที่ภาครับก็ยังคงสามารถตัดสินใจได้อย่างถูกต้องและการเกิดการเหลื่อมล้ำนี้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิธที่อีกด้วย

ส่วนการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation นั้นได้มีการลดจำนวนสล็อตในการส่งสัญญาณลงทำให้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่ภาครับมีค่าน้อยลงตำแหน่งของ

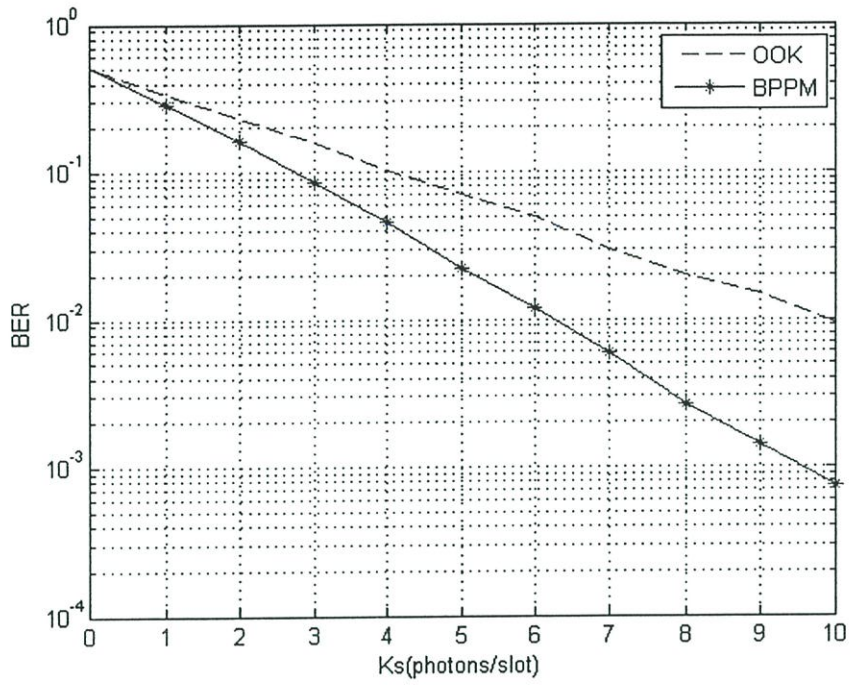
พัลส์แสงที่เกิดขึ้นที่ภาครับมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation และการผสมสัญญาณแบบ (3, 2) Overlapping Pulse Position Modulation นั้นพบว่าในช่วงที่จำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อพัลส์แสงน้อย การผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation นั้นมีประสิทธิภาพดีกว่าแต่เมื่อจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อพัลส์แสงมากกว่า 2 โฟตอนต่อสล็อต การผสมสัญญาณแบบ (3, 2) Overlapping Pulse Position Modulation มีประสิทธิภาพดีกว่า อันเนื่องมาจากการผสมสัญญาณแบบ (3, 2) Overlapping Pulse Position Modulation นั้นมีการเกิดการเหลื่อมล้ำทำให้ภาครับสามารถตัดสินใจได้ถูกต้องอยู่

ในช่วงสัญญาณแบบเกาส์นั้นพบว่าการผสมสัญญาณแบบ (3, 2) Overlapping Pulse Position Modulation และการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณดีกว่าการผสมสัญญาณแบบ 4-พัลส์โพสิชันมอดูเลชันซึ่งมีสาเหตุเดียวกับช่องสัญญาณแบบบีวส์ซอง แต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการผสมสัญญาณแบบ (3, 2) Overlapping Pulse Position Modulation และการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation จะพบว่ามีความใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากช่องสัญญาณแบบเกาส์นั้นให้ค่าของสัญญาณรบกวนที่ไม่สูงมากเท่ากับช่องสัญญาณแบบบีวส์ซองทำให้การเหลื่อมล้ำของสัญญาณไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณแตกต่างกัน

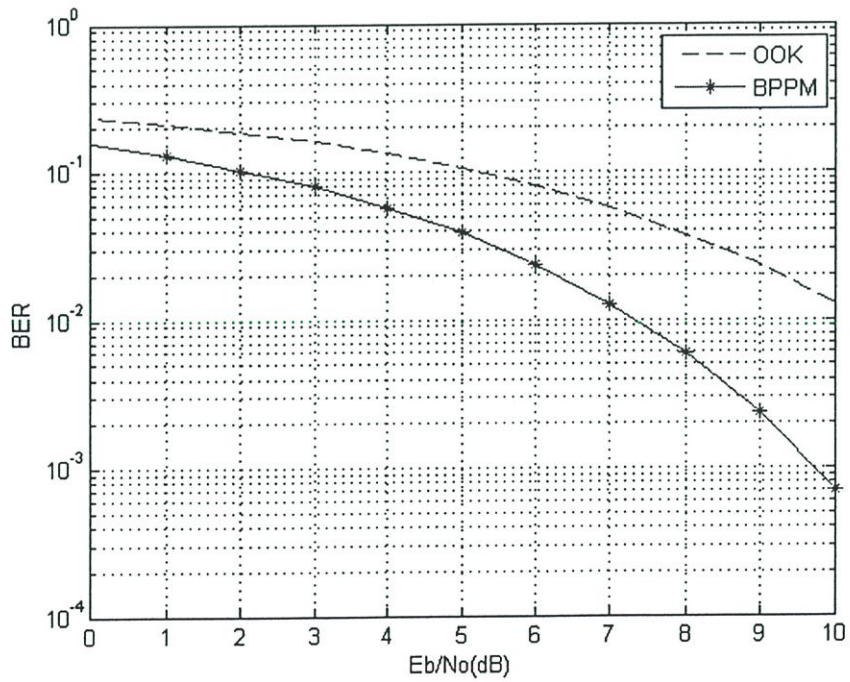
สรุปได้ว่าเมื่อมีปริมาณข้อมูลที่ส่งไปในระบบสื่อสารที่เท่ากันแล้วรูปแบบของการผสมสัญญาณที่มีความแตกต่างกันจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณแตกต่างกันแล้วช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณก็มีส่วนทำให้ประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลในระบบสื่อสารมีความแตกต่างกันด้วย

ก. เมื่อค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูล (Throughput) มีค่าเท่ากับ 3 b/sec/Hz เป็นการเปรียบเทียบระหว่างการผสมสัญญาณแบบ 8-พัลส์โพสิชันมอดูเลชันและการผสมสัญญาณแบบ (4, 2) Multi-pulse Pulse Position Modulation ซึ่งผลของการเปรียบเทียบแสดงดังรูปที่ 5.12 พบว่าการผสมสัญญาณแบบ (4, 2) Multi-pulse Pulse Position Modulation ในช่วงสัญญาณแบบบีวส์ซองนั้นประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณของการผสมสัญญาณทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนในช่วงสัญญาณแบบเกาส์นั้นการผสมสัญญาณแบบ (4, 2) Multi-Pulse Pulse Position Modulation มีประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณดีกว่าการผสมสัญญาณแบบ 8-พัลส์โพสิชันมอดูเลชันเนื่องจากมีแบนด์วิดท์ที่สูงกว่าและค่าของสัญญาณรบกวนแบบเกาส์นั้นมีค่าไม่สูงมากนัก

สรุปได้ว่าเมื่อมีปริมาณของข้อมูลที่ส่งไปในระบบสื่อสารเท่ากันแล้วการเพิ่มจำนวนพัลส์แสงที่ใช้ในการส่งไม่มีผลต่อการส่งสัญญาณมากนัก แต่ช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณนั้นมีส่วนทำให้ประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลในระบบสื่อสารมีความแตกต่างกัน

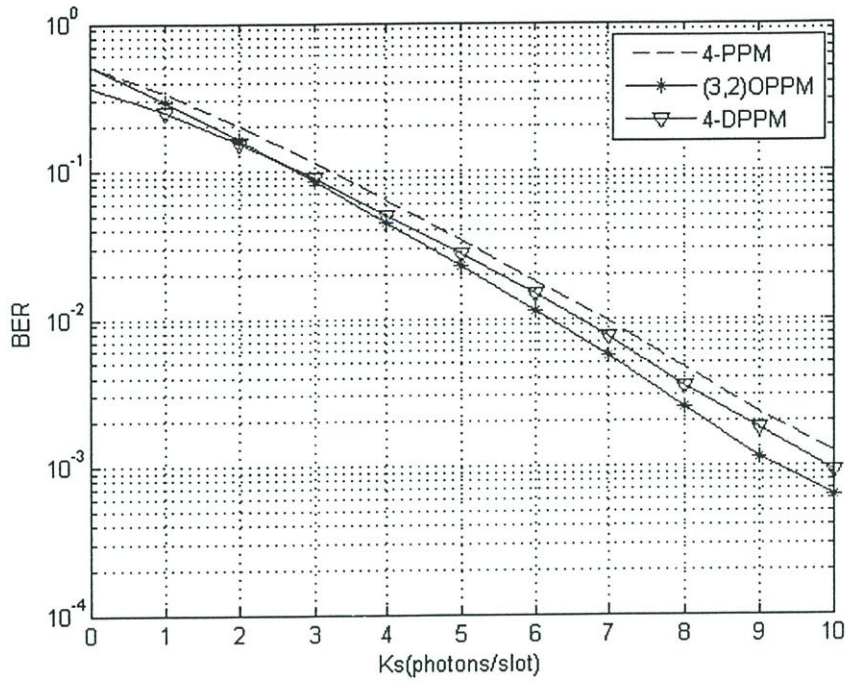


(a)

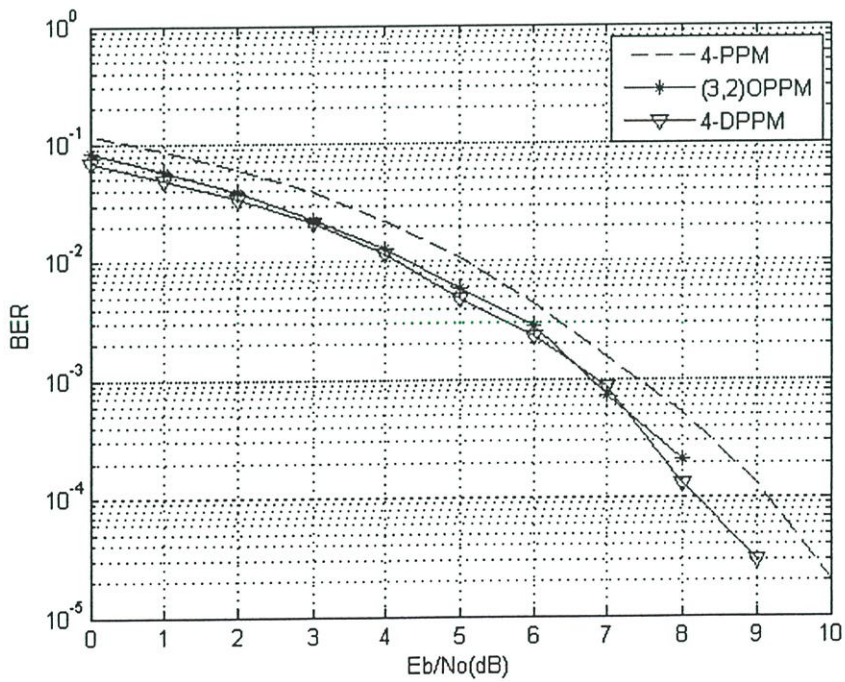


(b)

รูปที่ 5.10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ เมื่อมีค่า Throughput เท่ากับ 1 b/sec/Hz (a) ช่องสัญญาณแบบปีวส์ของ (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์

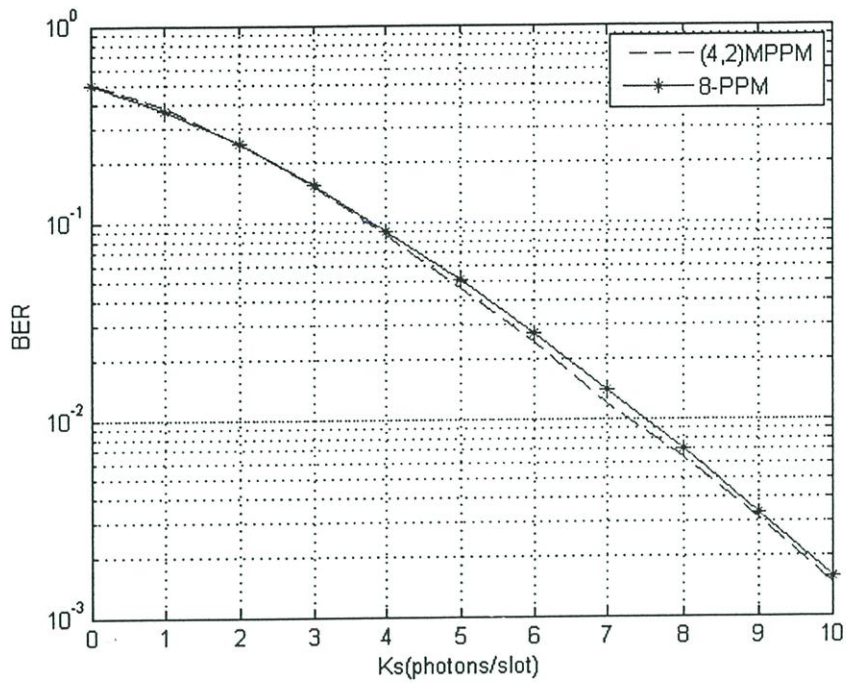


(a)

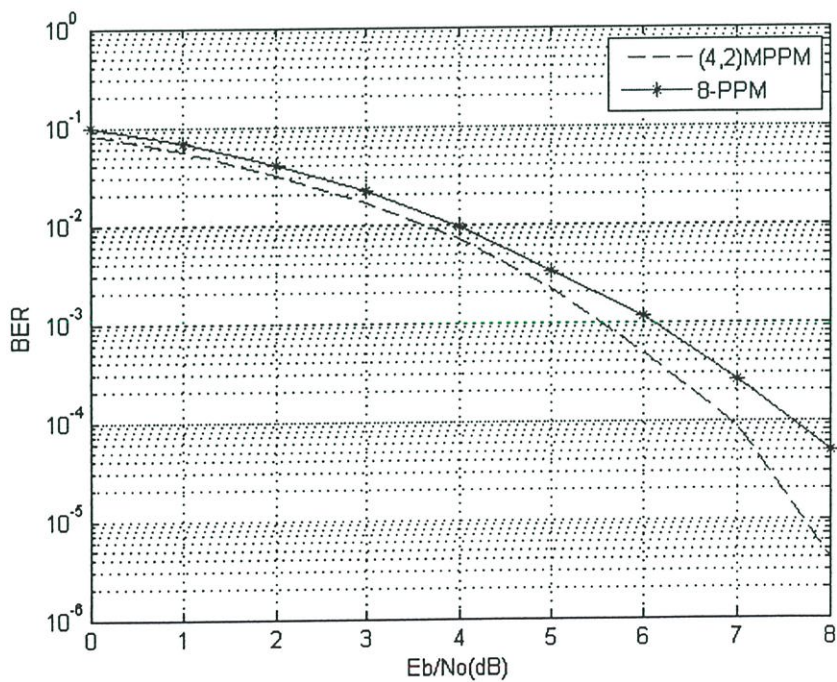


(b)

รูปที่ 5.11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ เมื่อมีค่า Throughput เท่ากับ 2 b/sec/Hz (a) ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์



(a)



(b)

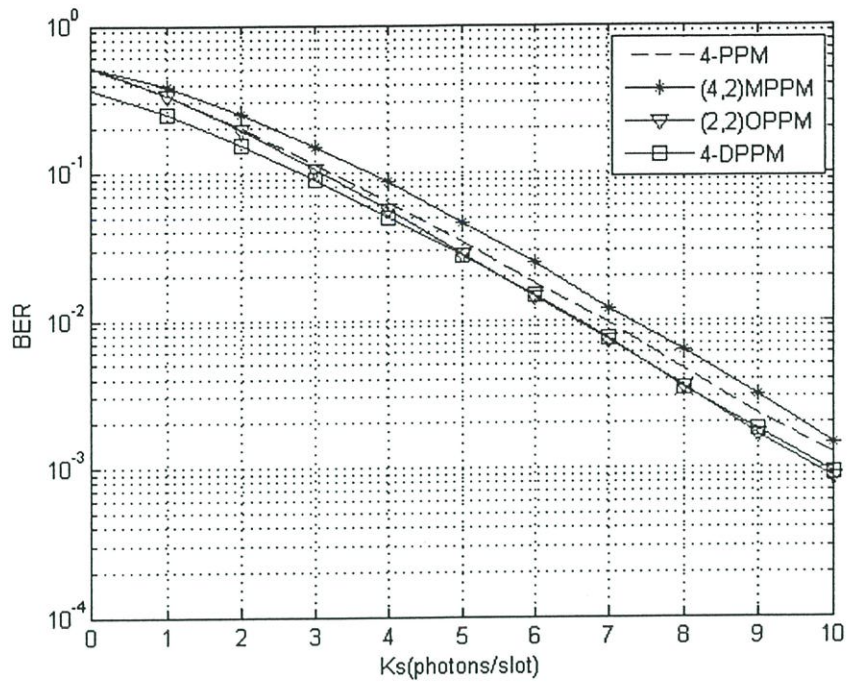
รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ เมื่อมีค่า Throughput เท่ากับ 3 b/sec/Hz (a) ช่องสัญญาณแบบบิตส์ซอง (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์

5.3.8 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณโดยพิจารณาจากจำนวนสลอตที่เท่ากัน

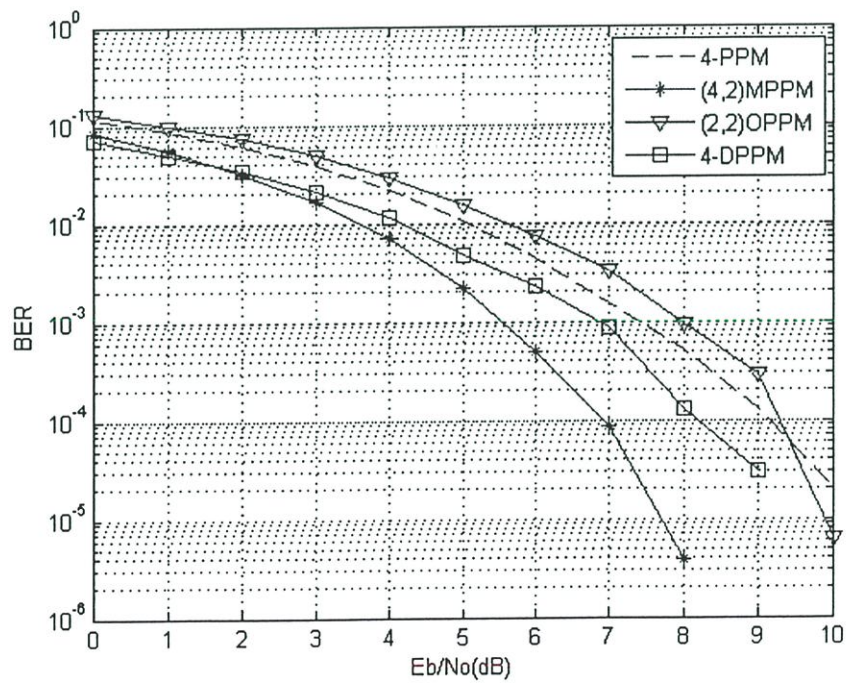
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพ โดยดูจากจำนวนสลอตที่เท่ากันเป็นคุณสมบัติหนึ่งในการผสมสัญญาณที่อาศัยพื้นฐานจากการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ซึ่งผลการทดสอบเป็นดังนี้

ก. เมื่อจำนวนสลอตมีค่าเท่ากับ 4 จะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างการผสมสัญญาณแบบ 4-พัลส์โพสิชันมอดูเลชัน การผสมสัญญาณแบบ (4, 2) Multi-pulse Pulse Position Modulation การผสมสัญญาณแบบ (2, 2) Overlapping Pulse Position Modulation และการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.13 พบว่าในช่องสัญญาณแบบบีวส์ของประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณของการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation ใกล้เคียงกับการผสมสัญญาณแบบ (2, 2) Overlapping Pulse Position Modulation และดีกว่าการผสมสัญญาณแบบ 4-พัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ส่วนแบบ (4, 2) Multi-pulse Pulse Position Modulation นั้นมีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณต่ำสุดเนื่องจากการแทนค่าของบิตข้อมูลที่มากถึง 3 บิต ส่วนในช่องสัญญาณแบบเกาส์นั้นมีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณจากมากไปหาน้อยตามลำดับดังนี้ การผสมสัญญาณแบบ (4, 2) Multi-pulse Pulse Position Modulation มีประสิทธิภาพดีกว่าการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation ดีกว่าการผสมสัญญาณแบบ 4-พัลส์โพสิชันมอดูเลชันดีกว่า การผสมสัญญาณแบบ (2, 2) Overlapping Pulse Position Modulation เนื่องจากการในช่องสัญญาณแบบเกาส์นั้นค่าของสัญญาณรบกวนมีน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของสัญญาณที่ส่งเข้ามาทำให้ (4, 2) Multi-pulse Pulse Position Modulation มีโอกาสที่จะเกิดความผิดน้อยเนื่องจากการตัดสินใจ โดยดูจากพัลส์ถึง 2 ตำแหน่งที่สูงที่สุด

ข. เมื่อจำนวนสลอตมีค่าเท่ากับ 6 จะเป็นการเปรียบเทียบการผสมสัญญาณแบบ (6, 2) Multi-pulse Pulse Position Modulation และการผสมสัญญาณแบบ (3, 2) Overlapping Pulse Position Modulation ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.14 พบว่าในช่องสัญญาณแบบบีวส์ของพบว่าประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณของการผสมสัญญาณแบบ (3, 2) Overlapping Pulse Position Modulation ดีกว่าประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณของการผสมสัญญาณแบบ (6, 2) Multi-pulse Pulse Position Modulation เนื่องจากการผสมสัญญาณแบบ (3, 2) Overlapping Pulse Position Modulation นั้นมีการเหลื่อมล้ำของสัญญาณเมื่อมีการเกิดพัลส์แสงที่ผิดพลาดไม่ได้อยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับค่าที่ส่งไปก็ไม่มีผลต่อการตัดสินใจเนื่องจากการตัดสินใจอาศัยจำนวน โฟตอนที่เกิดขึ้นในตำแหน่งที่ติดกัน ส่วนแบบ (6, 2) Multi-pulse Pulse Position Modulation นั้นจะดูจากจำนวนโฟตอนที่เกิดขึ้นสูงสุดสองตำแหน่ง เมื่อเกิดผิดตำแหน่งทำให้การตัดสินใจมีความผิดพลาด

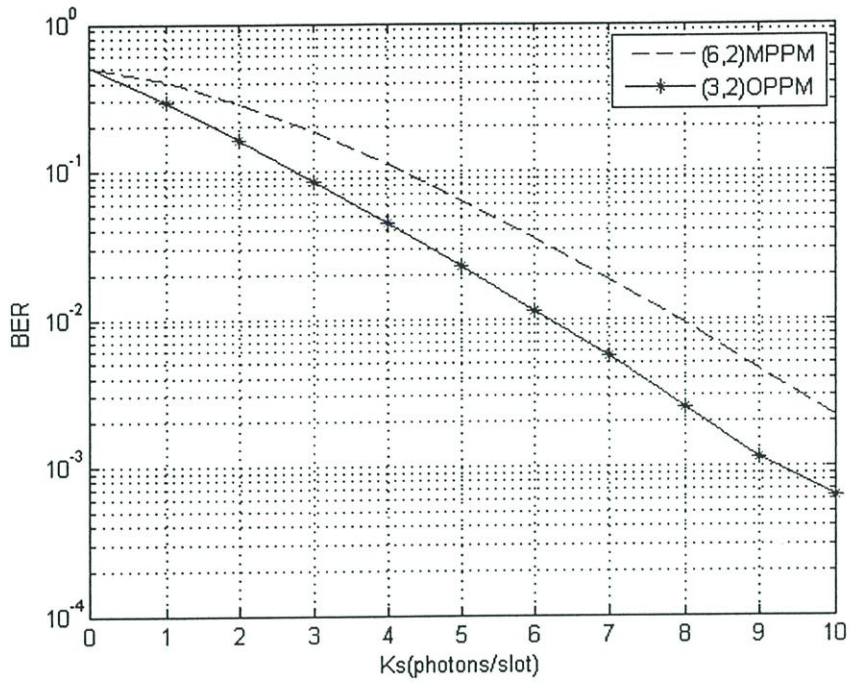


(a)

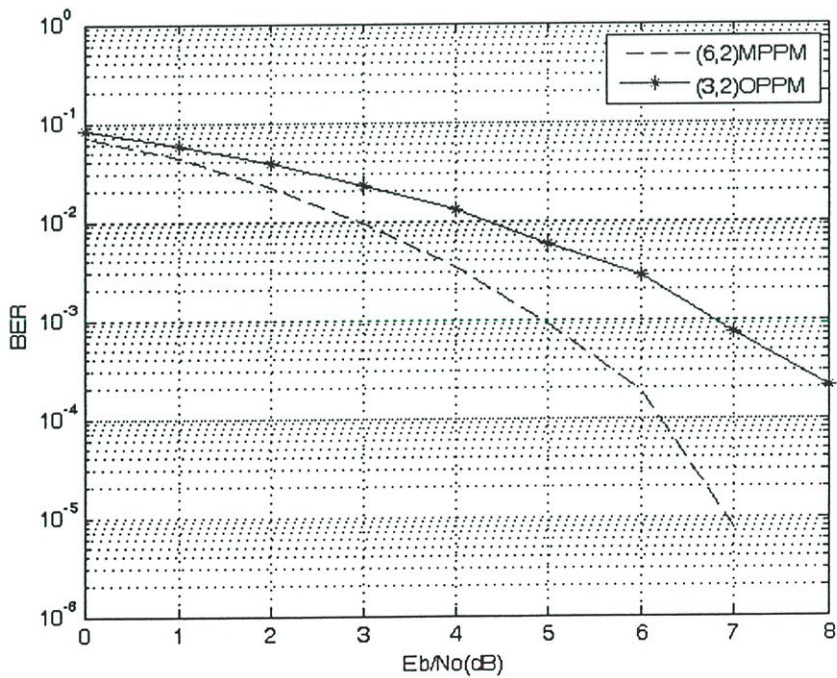


(b)

รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ เมื่อจำนวนสลอตมีค่าเท่ากับ 4
 (a) ช่องสัญญาณแบบปีวส์ของ (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์



(a)



(b)

รูปที่ 5.14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ เมื่อจำนวนสล็อตมีค่าเท่ากับ 6

(a) ช่องสัญญาณแบบพัลส์ของ (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์

5.4 ผลการจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ

การทดสอบการทำงานของการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับนั้นเป็นการจำลองการทำงานโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB และนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิต ดังต่อไปนี้

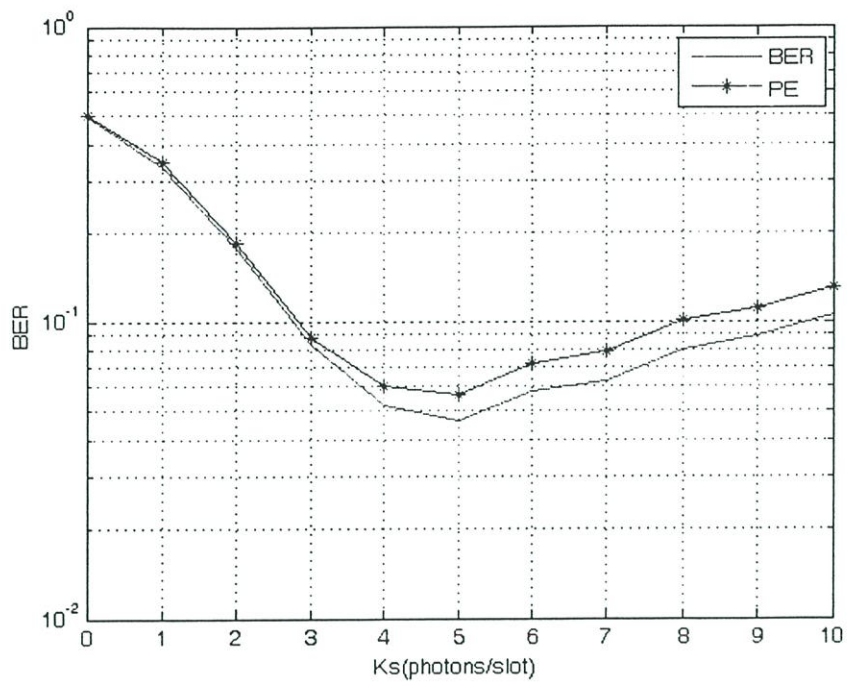
5.4.1 ผลการจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ

การทดสอบการจำลองการทำงานของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับซึ่งมีตำแหน่งการตัดสินใจสองรูปแบบคือตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่าและแบบคำนวณนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.15 ซึ่งพบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตจากการคำนวณ ซึ่งรายละเอียดของการสร้างการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับและการคำนวณอัตราความผิดพลาดแสดงไว้ในภาคผนวก ค.5 แสดงว่าโปรแกรมมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งการใช้ตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่านั้นมีส่วนที่นำไปใช้งานได้คือช่วงที่อัตราความผิดพลาดของบิตมีการลดลงมาจนกระทั่งถึงตำแหน่งที่มีการเกิดจุด Return point ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีอัตราส่วนระหว่างจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อสล็อตตัวที่สอง (α_2) ต่อจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อสัญญาณรบกวนเฉลี่ยต่อสล็อตมีค่าเท่ากับ 3.5

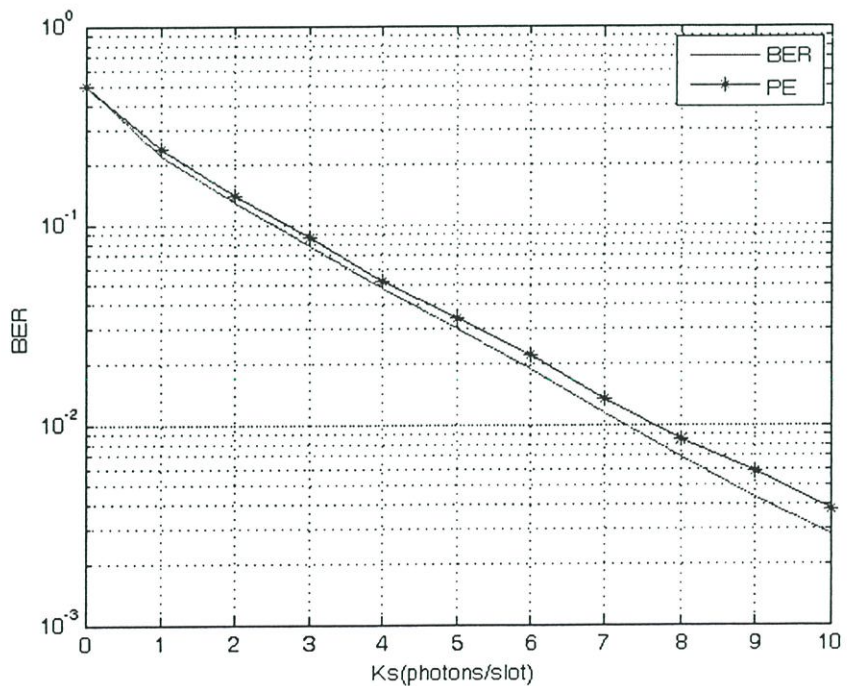
5.4.2 ผลการจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

การทดสอบการจำลองการทำงานของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันซึ่งมีตำแหน่งการตัดสินใจสองรูปแบบคือตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่าและตำแหน่งการตัดสินใจแบบคำนวณ แสดงได้ดังรูปที่ 5.16 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตจากการคำนวณ ซึ่งรายละเอียดของการสร้างการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับและการคำนวณอัตราความผิดพลาดแสดงไว้ในภาคผนวก ค.6 แสดงว่าโปรแกรมมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งการใช้ตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่านั้นมีส่วนที่นำไปใช้งานได้คือช่วงที่อัตราความผิดพลาดของบิตมีการลดลงมาจนกระทั่งถึงตำแหน่งที่มีการเกิดจุด Return point ซึ่งมีค่าเท่ากับค่า Return point ที่เกิดขึ้นในการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบการทำงานของการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีการเพิ่มระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตจากการคำนวณเพื่อให้มีรูปแบบของสัญญาณที่เหมาะสมต่อจำนวนรูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในระบบสื่อสาร ซึ่งวิธีการเพิ่มระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยนั้นแสดงไว้ในภาคผนวก ก. ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.17 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าโปรแกรมมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้

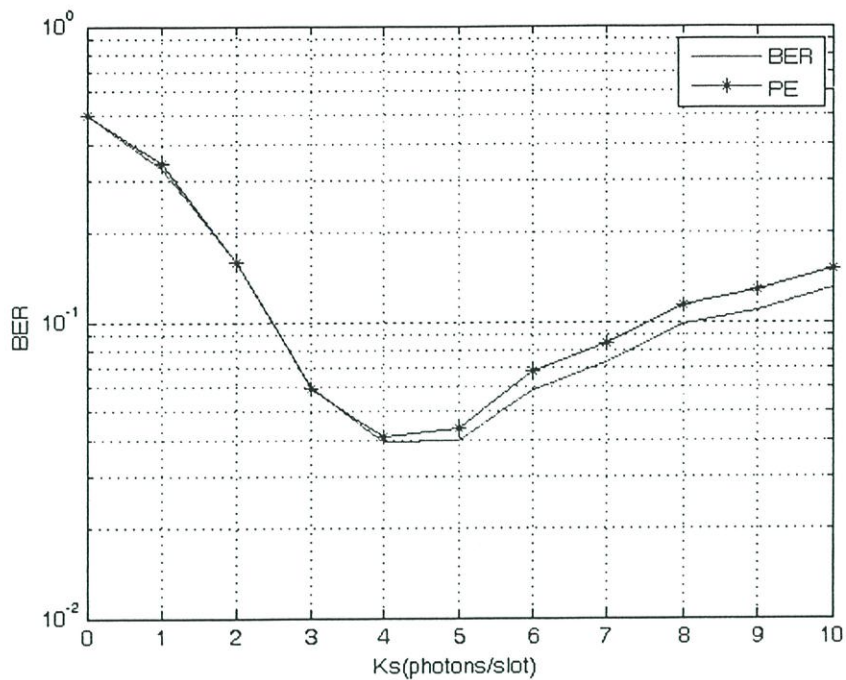


(a)

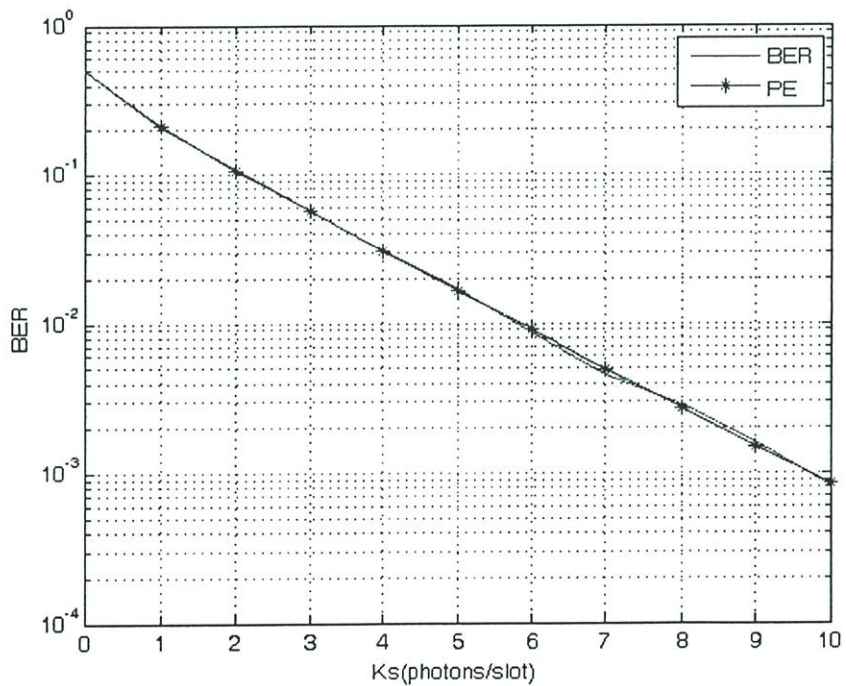


(b)

รูปที่ 5.15 การจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ (4.12) (a) ตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่า (b) ตำแหน่งการตัดสินใจแบบคำนวณ

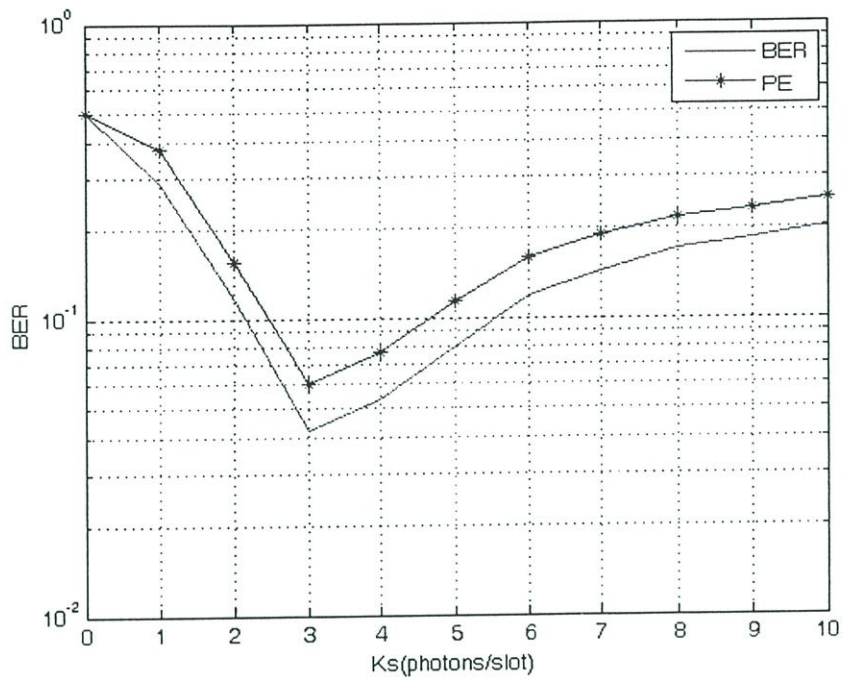


(a)

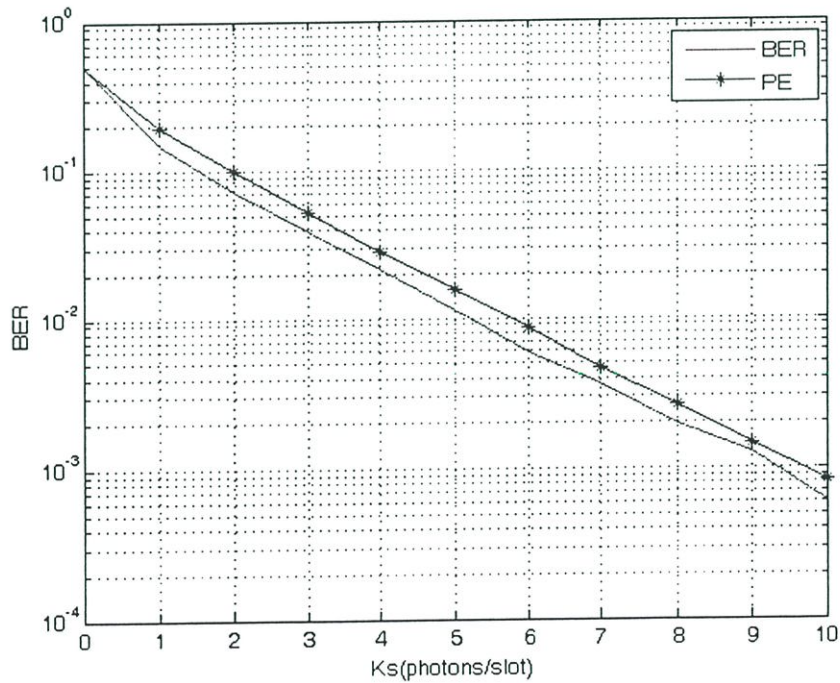


(b)

รูปที่ 5.16 การจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ (4.14) (a) ตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่า (b) ตำแหน่งการตัดสินใจแบบคำนวณ



(a)



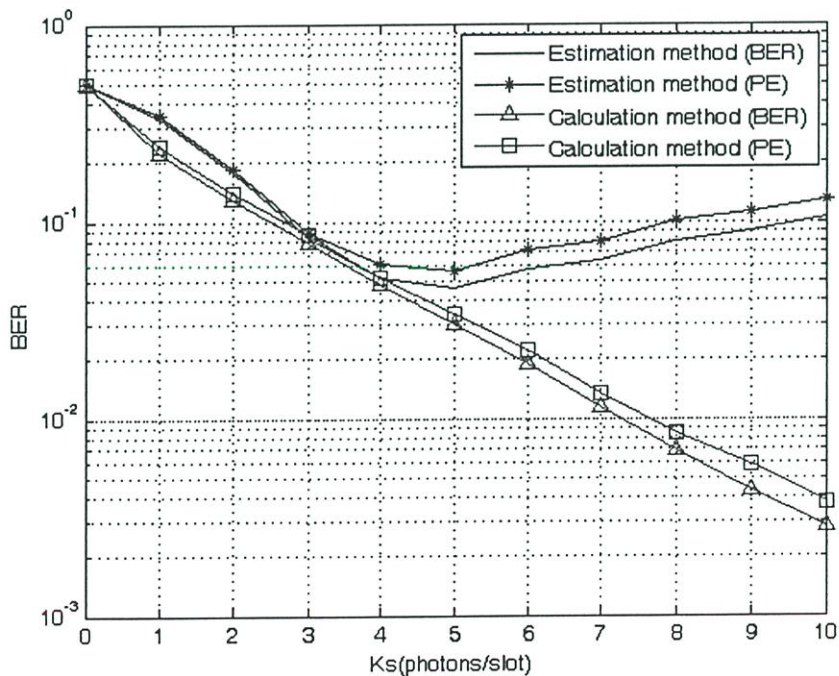
(b)

รูปที่ 5.17 การจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับเมื่อมีการเพิ่มระดับจำนวนของโฟตอนเฉลี่ยเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ (4.16) (a) ตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่า (b) ตำแหน่งการตัดสินใจแบบคำนวณ

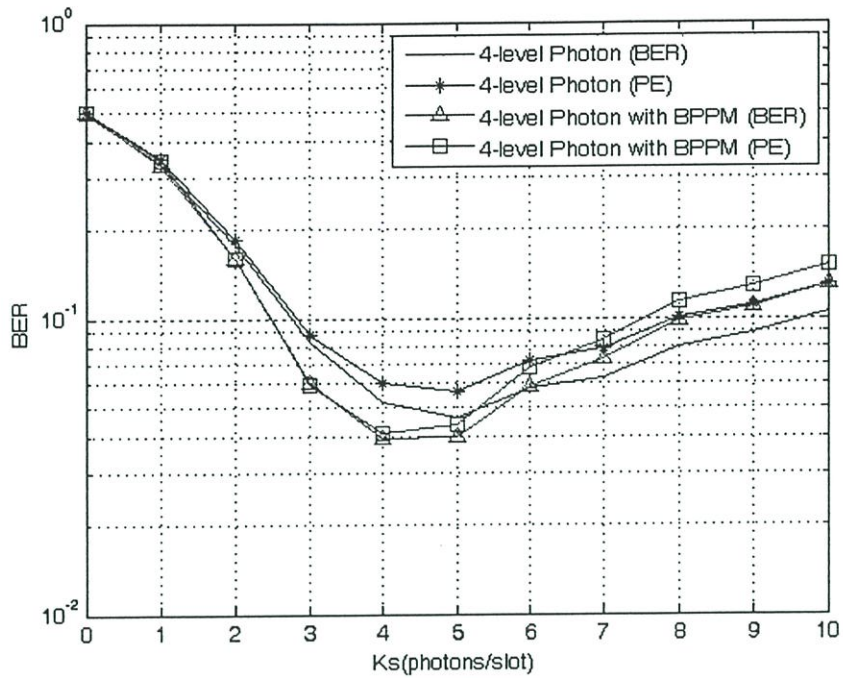
5.4.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับแต่ละรูปแบบ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับเป็นดังต่อไปนี้

ก. การเปรียบเทียบระหว่างการตัดสินใจแบบประมาณค่ากับการตัดสินใจแบบคำนวณ ซึ่งใช้การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับเป็นพื้นฐานในการเปรียบเทียบ แสดงดังรูปที่ 5.18 ซึ่งจากกราฟพบว่าการตัดสินใจแบบคำนวณสามารถแก้ปัญหาจุด Return point ที่เกิดขึ้นในตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่าได้ ทำให้สรุปได้ว่าตำแหน่งการตัดสินใจแบบคำนวณนี้มีความเหมาะสมต่อการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับมากกว่าตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่าที่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนเท่าของโฟตอนเฉลี่ยในแต่ละระดับในการตัดสินใจ เนื่องจากเป็นการคำนวณหาค่าตำแหน่งการตัดสินใจจากสมการอย่างแท้จริง

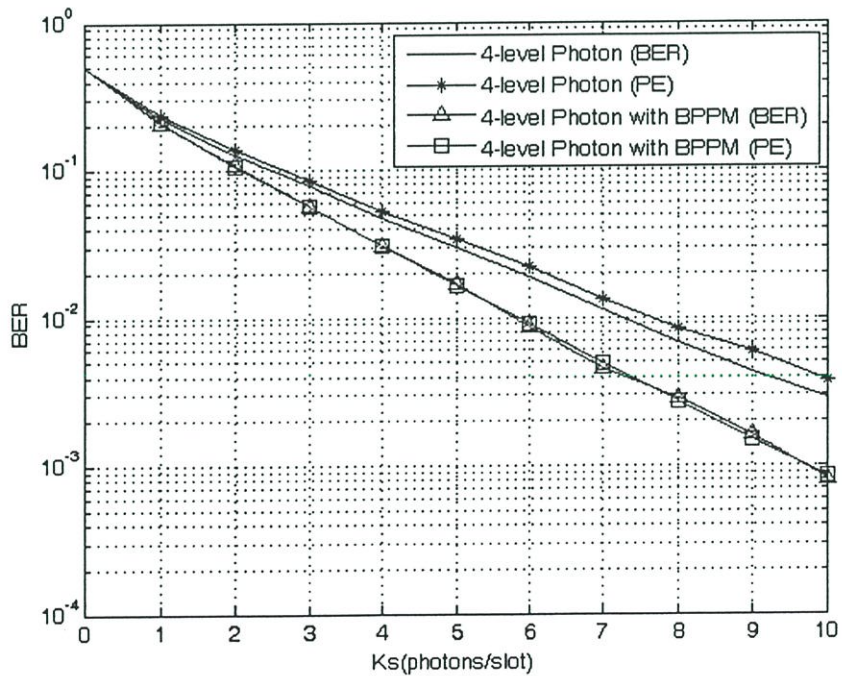
ข. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับกับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ทั้งวิธีการตัดสินใจแบบประมาณค่ากับการตัดสินใจแบบการคำนวณ พบว่าเมื่อการนำการผสมสัญญาณไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันมาใช้งานร่วมนั้นจะสามารถค่าอัตราความผิดพลาดบิดได้ ทั้งการตัดสินใจแบบคำนวณและประมาณค่าแบบแสดงดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.18 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของการทำงานของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับระหว่างการตัดสินใจแบบประมาณค่ากับการตัดสินใจแบบการคำนวณ

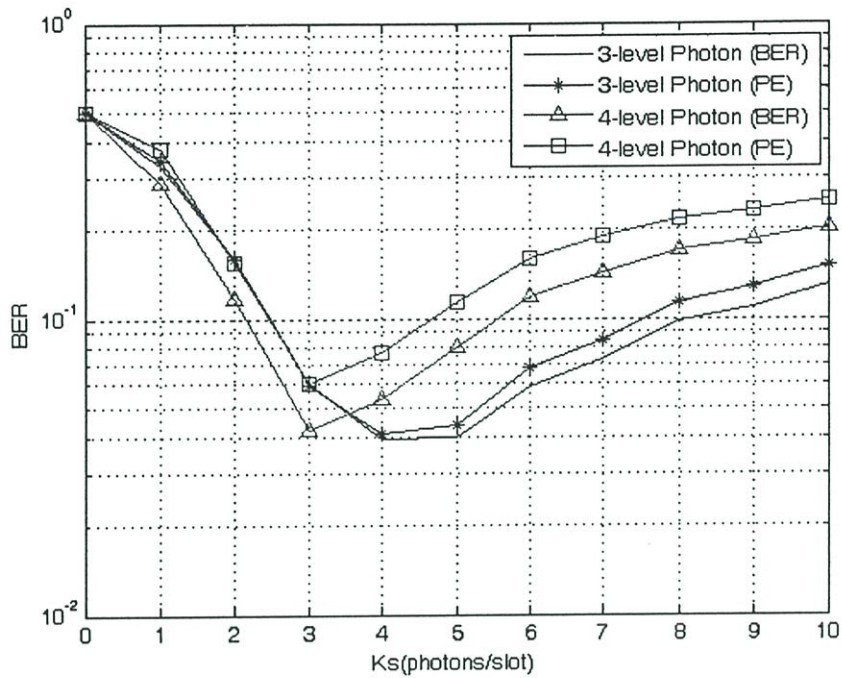


(a)

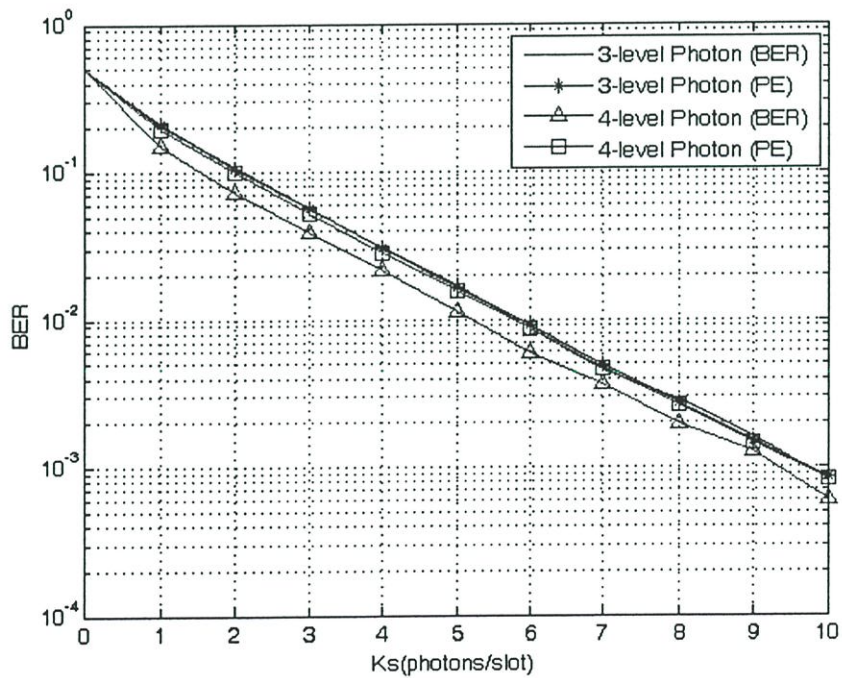


(b)

รูปที่ 5.19 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับกับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน (a) ตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่า (b) ตำแหน่งการตัดสินใจแบบคำนวณ



(a)



(b)

รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันระหว่างจำนวนโฟตอนเฉลี่ยสามระดับและสี่ระดับ (a) ตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่า (b) ตำแหน่งการตัดสินใจแบบคำนวณ

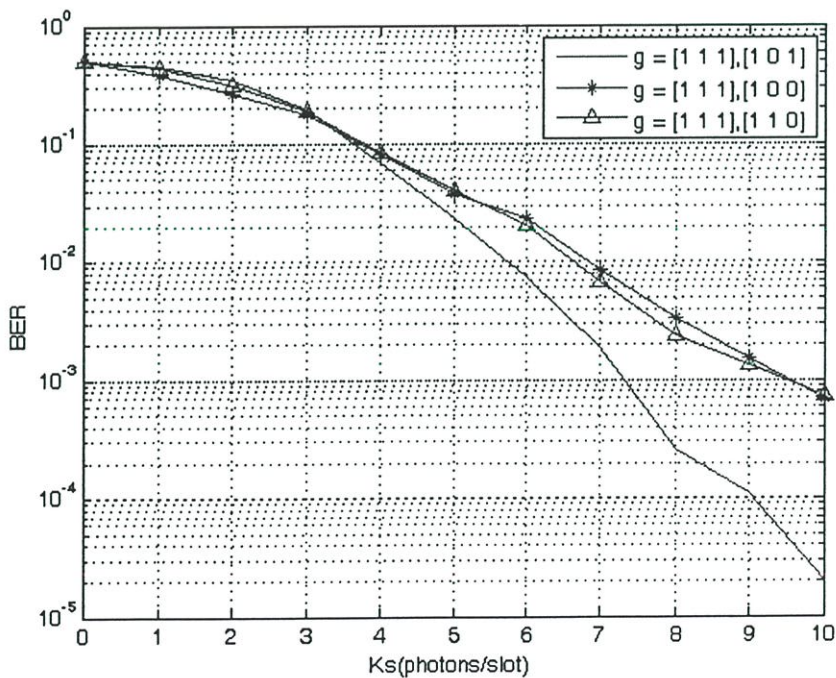
ค. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีระดับของโฟตอนเฉลี่ยสามระดับและสามระดับแสดงดังรูปที่ 5.20 พบว่าเมื่อเพิ่มระดับจำนวนโฟตอนเฉลี่ยขึ้นเป็นสี่ระดับนั้นผลของการจำลองการทำงานมีค่าใกล้เคียงกัน โดยแบบสี่ระดับมีผลของอัตราความผิดพลาดลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการตัดสินใจแบบคำนวณ ส่วนการตัดสินใจแบบประมาณค่านั้นแบบสี่ระดับจะให้อัตราความผิดพลาดเพิ่มขึ้นมากกว่าแบบสามระดับหลังจากจุด Return point จึงสรุปได้ว่าสามารถเพิ่มระดับจำนวนโฟตอนเฉลี่ยเพื่อให้การทำงานของระบบสัญญาณมีความสมบูรณ์ได้

5.5 ผลการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนโวลูชัน

ผลของการทดสอบคุณสมบัติของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันโดยใช้รูปแบบของการผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying ในช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง และการนำรหัสแบบคอนโวลูชันมาใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณเป็นดังนี้

5.5.1 ผลการเปรียบเทียบการใช้ค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิด

สำหรับผลการทดสอบการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงเมตริกซ์ตัวกำเนิดให้มีรูปแบบที่แตกต่างกัน แสดงได้ดังรูปที่ 5.21

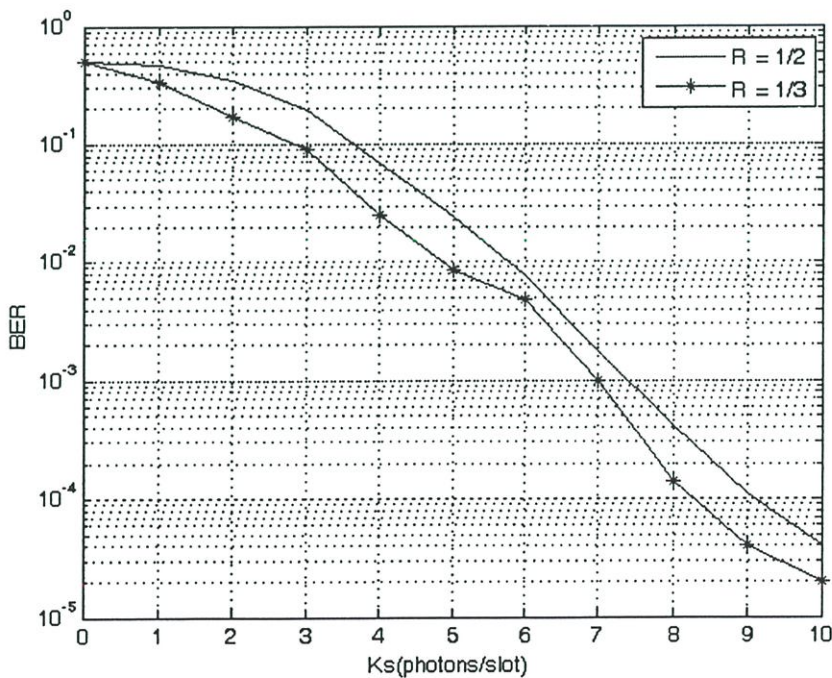


รูปที่ 5.21 ผลของการเปรียบเทียบการใช้เมตริกซ์ตัวกำเนิด

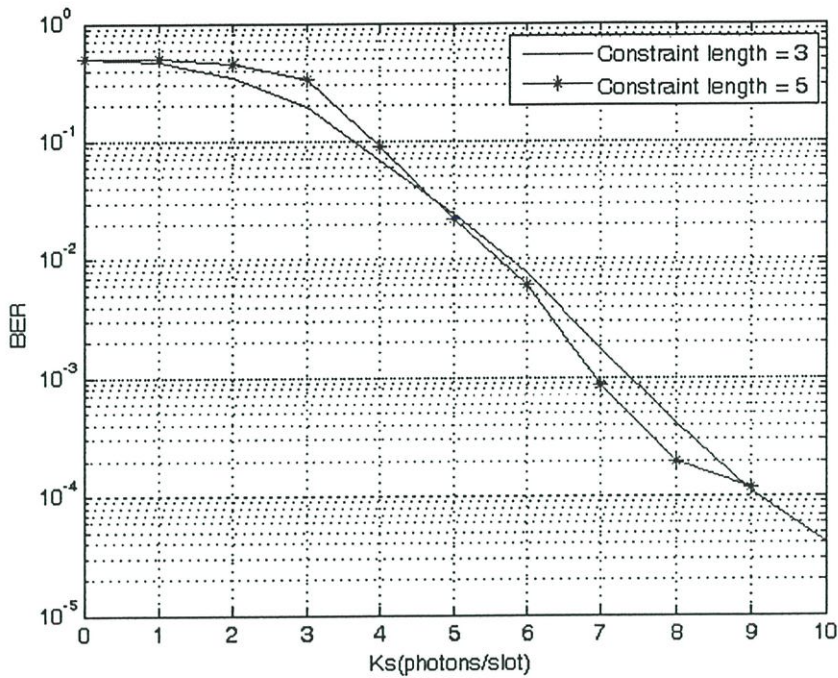
จากกราฟพบว่าค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดที่นำมาเปรียบเทียบมีความแตกต่างเพียง 1 ตำแหน่ง พบว่าค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดที่มีค่าเท่ากับ $[1 \ 1 \ 1]$, $[1 \ 0 \ 0]$ มีความสามารถในการแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งสัญญาณได้มากกว่าค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดที่มีค่าเท่ากับ $[1 \ 1 \ 1]$, $[1 \ 0 \ 1]$ และ $[1 \ 1 \ 1]$, $[1 \ 1 \ 0]$ เนื่องจากค่า $[1 \ 0 \ 0]$ ไม่มีการนำข้อมูลเก่ามาเข้ารหัส ซึ่งเมื่อทำการถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บีที่อาศัยแผนภาพแบบทริลิสหาเส้นทางที่เป็นไปได้ที่มีระยะทางสั้นที่สุดนั้นจะพบเส้นทางที่ให้ค่าจากการถอดรหัสมีความใกล้เคียงกับค่าของข้อมูลที่ยังไม่ได้เข้ารหัส

5.5.2 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเข้ารหัส

ผลของการเปรียบเทียบอัตราการเข้ารหัสแสดงดังรูปที่ 5.22 พบว่าอัตราการเข้ารหัสของรหัสแบบคอนโวลูชันมีผลต่อประสิทธิภาพในการแก้ไขข้อผิดพลาด อัตราของการเข้ารหัส $1/3$ สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้มากกว่าอัตราการเข้ารหัสแบบ $1/2$ เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันที่อัตราของการเข้ารหัส $1/3$ นั้นจะมีความยาวของบิตข้อมูลมากกว่าอัตราของการเข้ารหัส $1/2$ เมื่อทำการถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บีที่อาศัยแผนภาพแบบทริลิสหาเส้นทางที่เป็นไปได้ที่มีระยะทางสั้นที่สุดนั้นมีข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลในช่วงเวลาก่อนหน้าและข้อมูลที่เข้ารหัสในขณะนั้นต่อเนื่องกันไปได้มากที่สุด ซึ่งจะช่วยให้พบเส้นทางที่มีลักษณะของข้อมูลที่มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่จะใช้ในการเข้ารหัสมากที่สุด



รูปที่ 5.22 ผลของการเปรียบเทียบอัตราการเข้ารหัส



รูปที่ 5.23 ผลของการเปรียบเทียบค่า Constraint length

5.5.3 ผลการเปรียบเทียบค่าจำนวนชุดของสัญลักษณ์ข้อมูลที่ใช้ในการเข้ารหัสแต่ละรอบ (Constraint Length)

ผลของการเปรียบเทียบค่า Constraint Length แสดงได้ดังรูปที่ 5.23 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่า Constraint length พบว่าประสิทธิภาพในการแก้ไขข้อผิดพลาดข้อมูลของรหัสแบบคอนโวลูชันมีความใกล้เคียงกัน อันเนื่องมาจากค่า g ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพมีความสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกัน

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการแก้ไขข้อผิดพลาดข้อมูลของรหัสแบบคอนโวลูชันมากที่สุด ได้แก่ค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดซึ่งจะต้องเลือกใช้เมตริกซ์ตัวกำเนิดที่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลให้มากที่สุด และอัตราการเข้ารหัสซึ่งเมื่อค่าของอัตราการเข้ารหัสลดลงจะทำให้ประสิทธิภาพในการแก้ไขข้อผิดพลาดข้อมูลของรหัสแบบคอนโวลูชันเพิ่มขึ้น

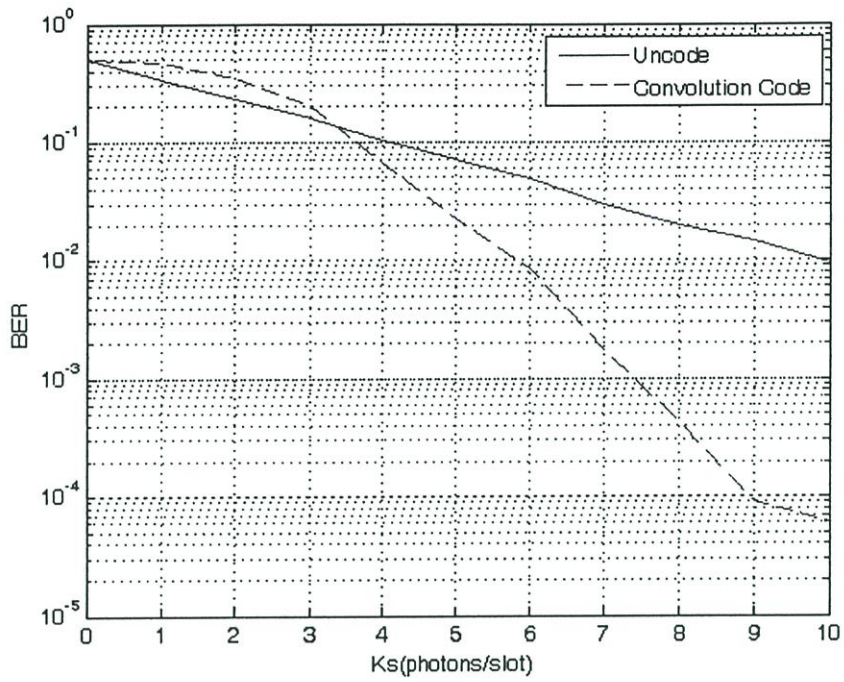
5.5.4 ผลการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ

การนำรหัสแบบคอนโวลูชันมาใช้งานร่วมกับกระบวนการผสมสัญญาณเชิงแสงรูปแบบต่างๆ ที่ทำการศึกษามาแล้วนั้น ได้ทำการทดสอบทั้งในช่องสัญญาณแบบเกาส์และช่องสัญญาณแบบพัลส์ของ ซึ่งได้แบ่งผลออกตามกระบวนการผสมสัญญาณเชิงแสงซึ่งมีทั้งหมด 6 รูปแบบดังต่อไปนี้

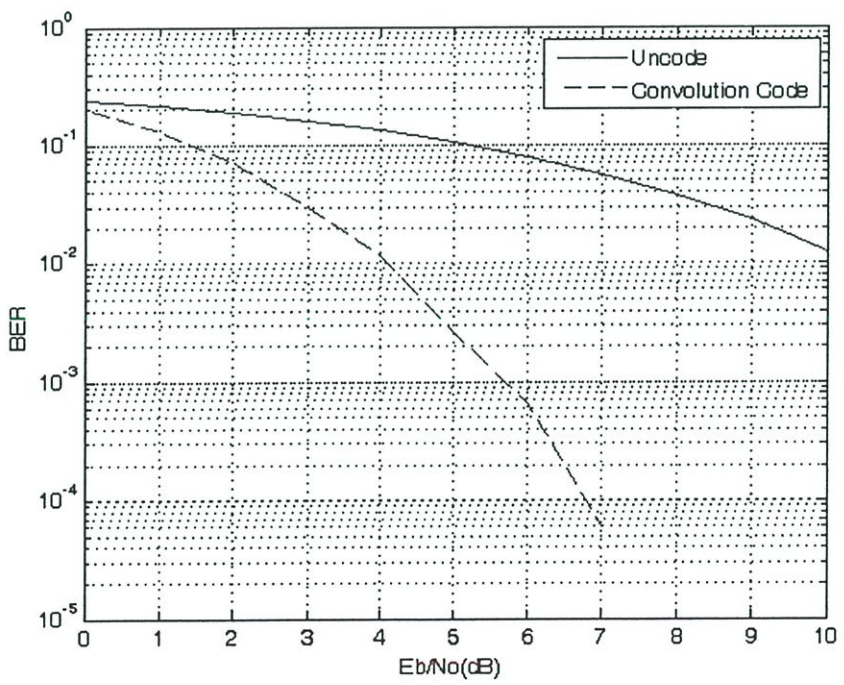
ก. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการไม่เข้ารหัส ในการผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying แสดงดังรูปที่ 5.24 จากกราฟพบว่าในช่องสัญญาณแบบบีบอัดของสัญญาณการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันจะทำให้อัตราความผิดพลาดบิตเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าของจำนวนโพตอนเฉลี่ยน้อยกว่า 3 โพตอนต่อสล็อต เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 โพตอนต่อสล็อต ทำให้เกิดความผิดพลาดในกระบวนการตัดสินใจที่อาศัยค่า Threshold สูงขึ้นเพราะค่าของสัญญาณรบกวนเฉลี่ยและจำนวน โพตอนเฉลี่ยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์นั้นรหัสแบบคอนโวลูชันสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตได้ทุกค่า อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าสัญญาณที่ส่งเข้าไปในช่องสัญญาณ ทำให้กระบวนการตัดสินใจที่อาศัยค่า Threshold มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นน้อย จึงสามารถสรุปได้ว่ารหัสแบบคอนโวลูชันสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ดี

ข. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการไม่เข้ารหัส ในการผสมสัญญาณแบบไบนารีพีลส์โพสิชันมอดูเลชัน แสดงดังรูปที่ 5.25 จากกราฟพบว่าในช่องสัญญาณแบบบีบอัดของสัญญาณการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันจะทำให้อัตราความผิดพลาดบิตเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าของจำนวนโพตอนเฉลี่ยน้อยกว่า 2 โพตอนต่อสล็อต ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 โพตอนต่อสล็อต ทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจมีค่าสูงขึ้นเพราะค่าของสัญญาณรบกวนเฉลี่ยและจำนวน โพตอนเฉลี่ยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์นั้นรหัสแบบคอนโวลูชันสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตได้ทุกค่า อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยทำให้กระบวนการตัดสินใจมีความคลาดเคลื่อนน้อย จึงสรุปได้ว่ารหัสแบบคอนโวลูชันจึงสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ดี

ค. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการไม่เข้ารหัส ในการผสมสัญญาณแบบ 4-พีลส์โพสิชันมอดูเลชัน แสดงดังรูปที่ 5.26 จากกราฟพบว่าในช่องสัญญาณแบบบีบอัดของสัญญาณการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันจะสามารถลดอัตราความผิดพลาดของบิตลงได้ก็ต่อเมื่อเมื่อมีค่าของจำนวนโพตอนเฉลี่ยมากกว่า 2 โพตอนต่อสล็อต อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 โพตอนต่อสล็อต ทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจเพราะค่าของสัญญาณรบกวนเฉลี่ยและจำนวน โพตอนเฉลี่ยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์นั้นรหัสแบบคอนโวลูชันสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตได้ทุกค่า อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยทำให้กระบวนการตัดสินใจมีความคลาดเคลื่อนน้อย สามารถสรุปได้ว่ารหัสแบบคอนโวลูชันจึงสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ดี

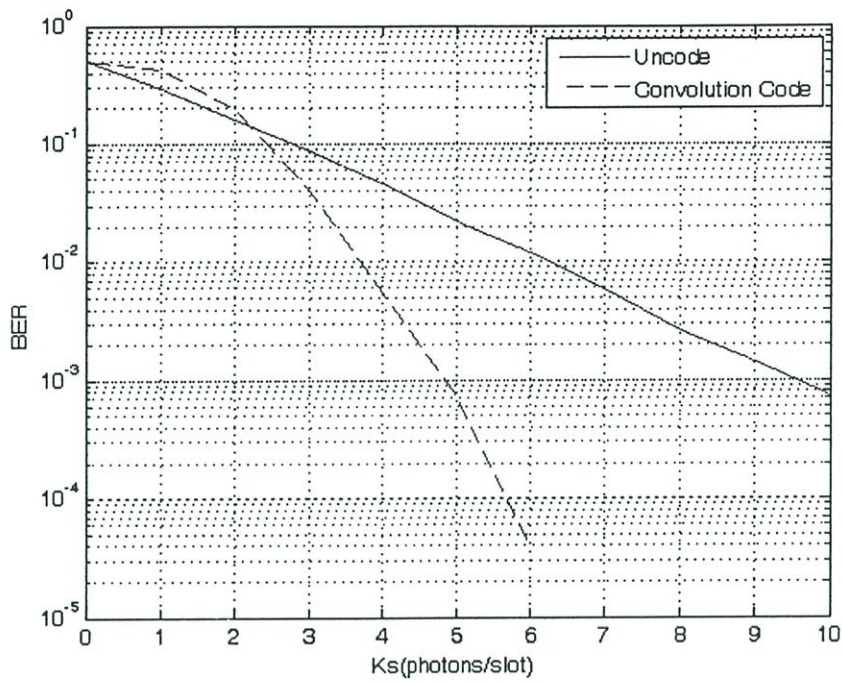


(a)

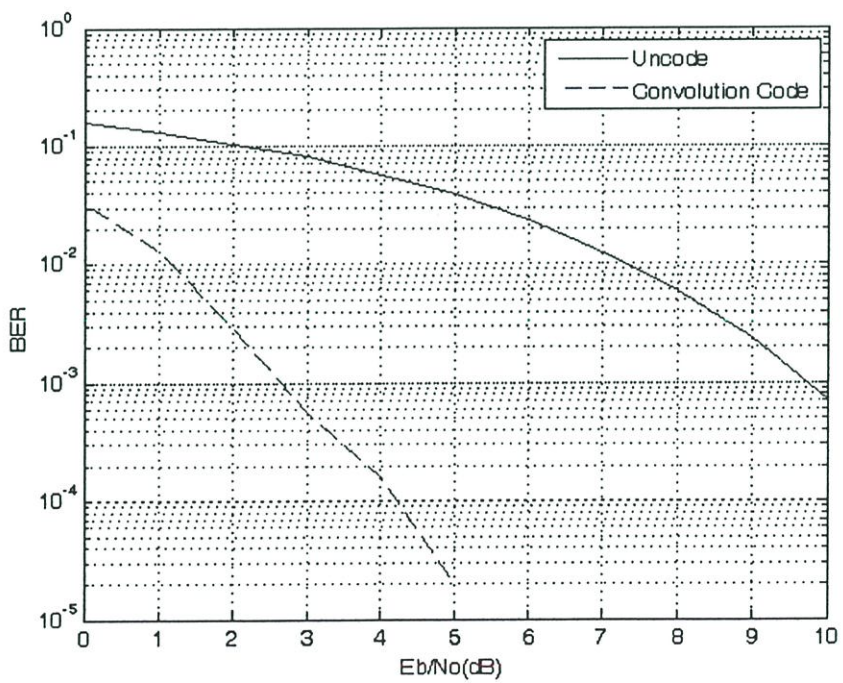


(b)

รูปที่ 5.24 การผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying ที่มีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส (a) ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์



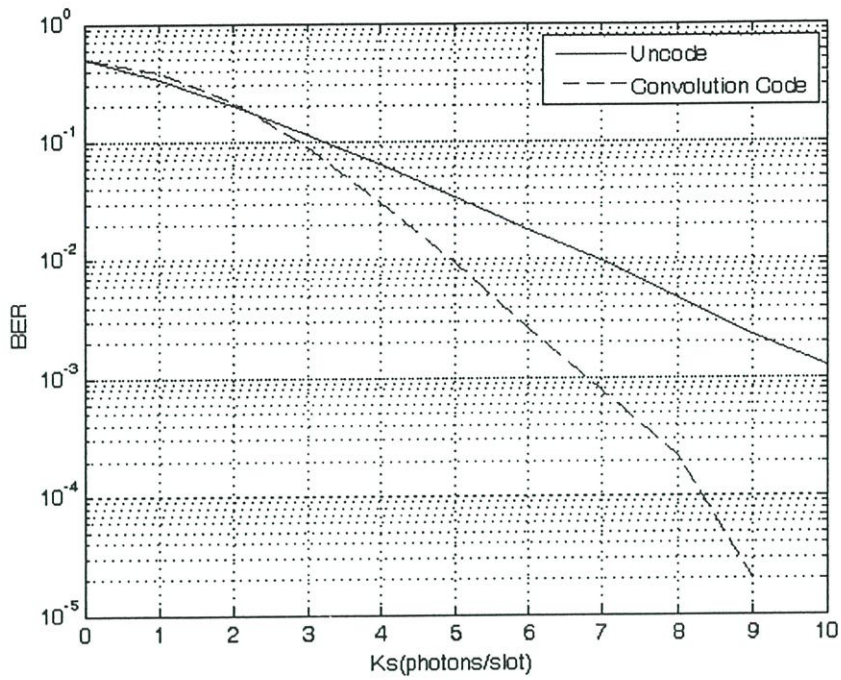
(a)



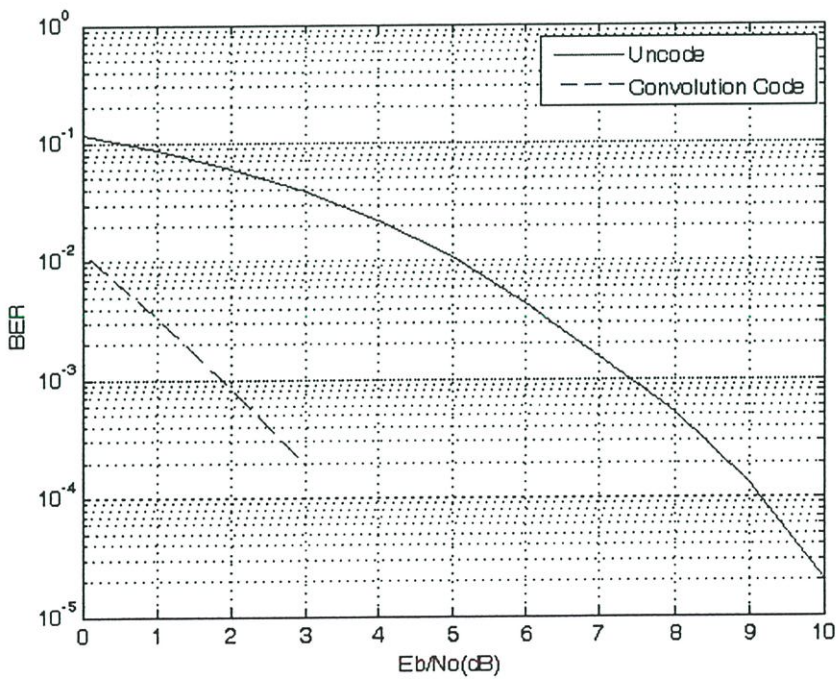
(b)

รูปที่ 5.25 การผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส

(a) ช่องสัญญาณแบบปีวส์ของ (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์

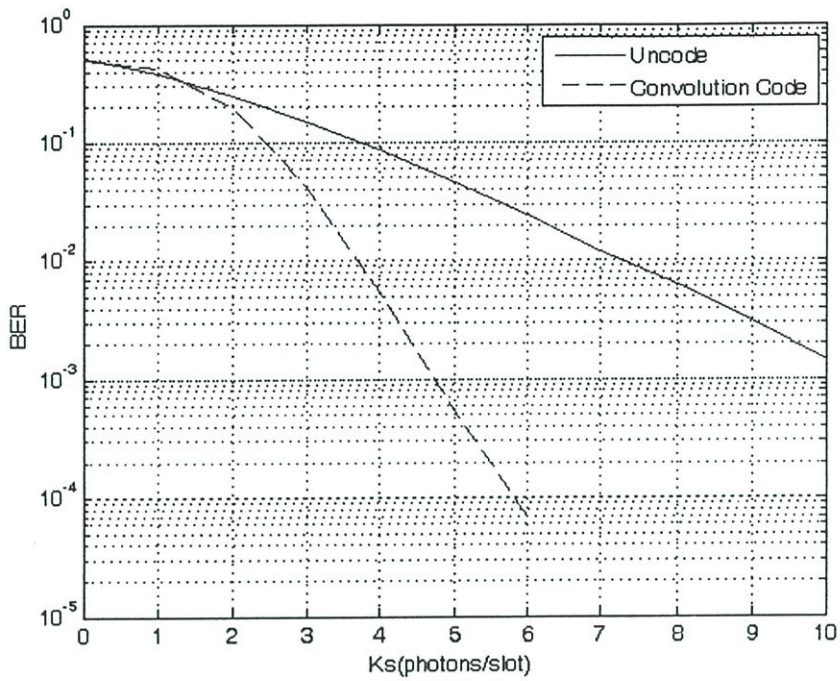


(a)

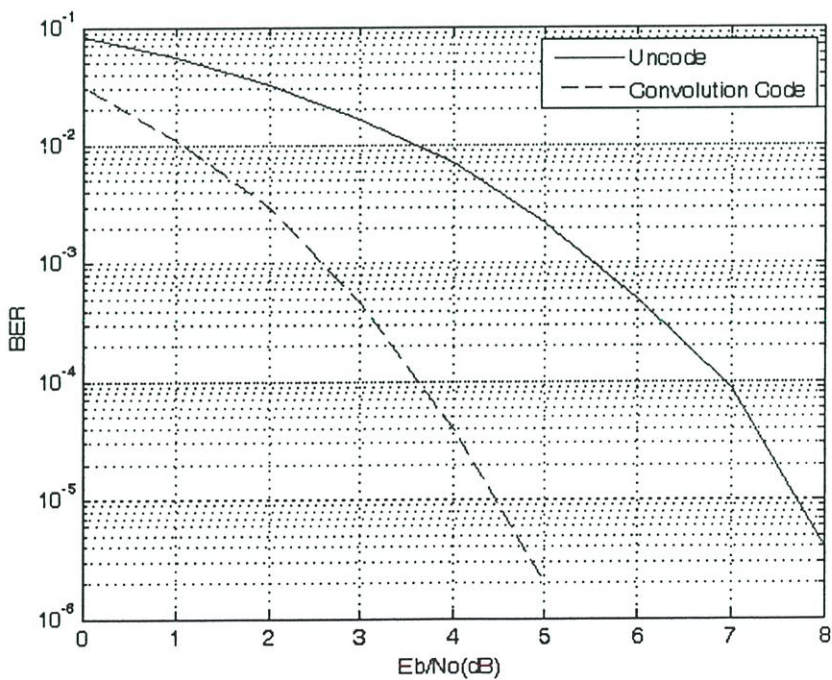


(b)

รูปที่ 5.26 การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส
 (a) ช่องสัญญาณแบบปีวส์ของ (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์



(a)



(b)

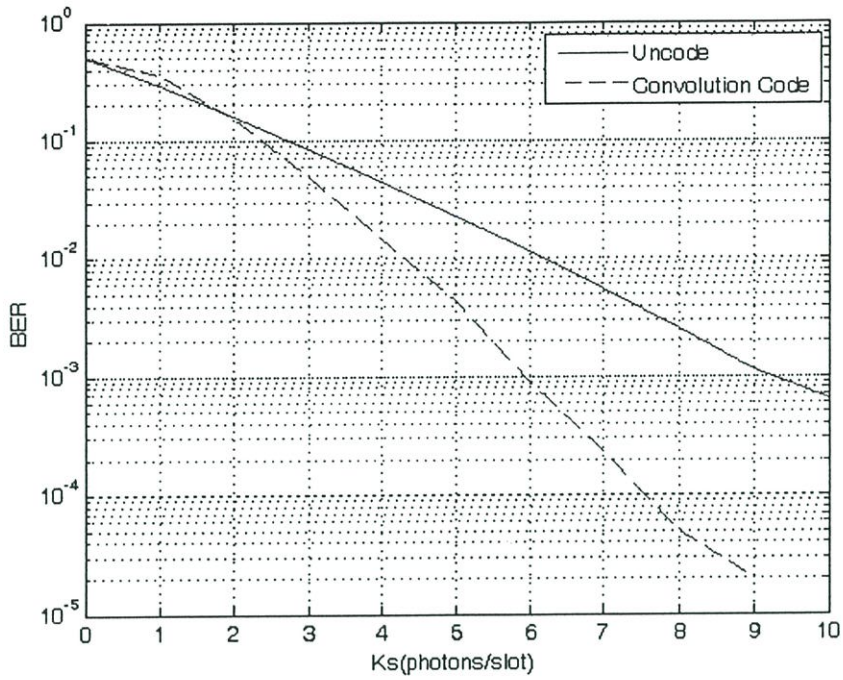
รูปที่ 5.27 การผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation ที่มีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส (a) ช่องสัญญาณแบบปีวส์ของ (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์

ง. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการไม่เข้ารหัส ในการผสมสัญญาณแบบ (4, 2) Multi-pulse Pulse Position Modulation แสดงดังรูปที่ 5.27 จากกราฟพบว่าในช่องสัญญาณแบบบิวส์ของนั้นการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนั้นจะลดอัตราความผิดพลาดของบิตลงก็ต่อเมื่อเมื่อมีค่าของจำนวนโพตอนเฉลี่ยมากกว่าหรือเท่ากับ 2 โพตอนต่อสล็อต เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 โพตอนต่อสล็อต ทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจเพราะค่าของสัญญาณรบกวนเฉลี่ยและจำนวนโพตอนเฉลี่ยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ นั้นรหัสแบบคอนโวลูชันสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตได้ทุกค่า เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยทำให้การตัดสินใจมีความคลาดเคลื่อนน้อย รหัสแบบคอนโวลูชันจึงสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ดีมาก

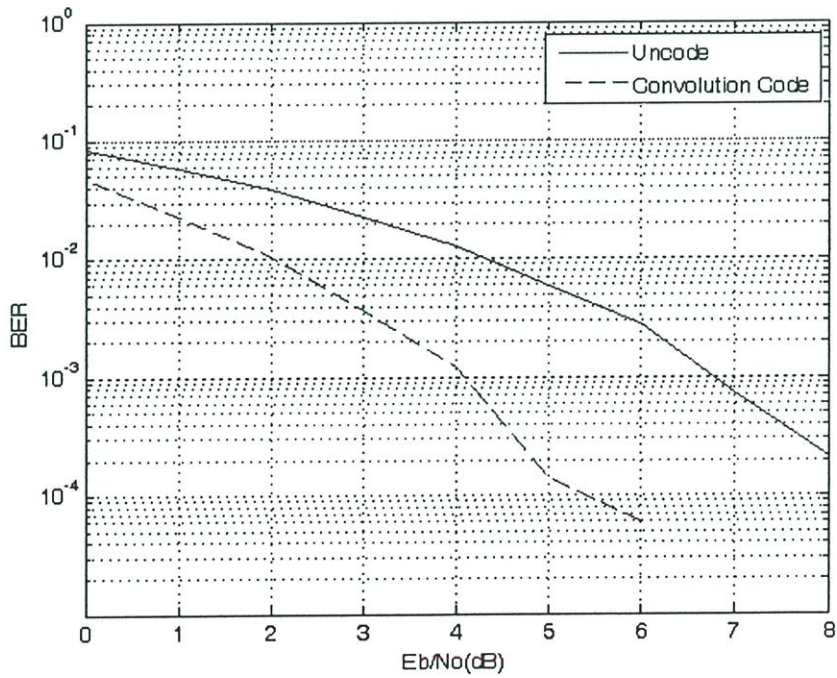
จ. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการไม่เข้ารหัส ในการผสมสัญญาณแบบ (3,2) Overlapping Pulse Position Modulation แสดงดังรูปที่ 5.28 พบว่าในช่องสัญญาณแบบบิวส์ของนั้นการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนั้นจะลดอัตราความผิดพลาดของบิตลงก็ต่อเมื่อเมื่อมีค่าของจำนวนโพตอนเฉลี่ยมากกว่า 2 โพตอนต่อสล็อต อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 โพตอนต่อสล็อต ทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจเพราะค่าของสัญญาณรบกวนเฉลี่ยและจำนวนโพตอนเฉลี่ยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์นั้นรหัสแบบคอนโวลูชันสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตได้ทุกๆ ค่า เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยทำให้การตัดสินใจมีความคลาดเคลื่อนน้อย ทำให้รหัสแบบคอนโวลูชันสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ดี

ฉ. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการไม่เข้ารหัส ในการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation แสดงดังรูปที่ 5.29 พบว่าในช่องสัญญาณแบบบิวส์ของนั้นการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนั้นจะลดอัตราความผิดพลาดของบิตลงก็ต่อเมื่อเมื่อมีค่าของจำนวนโพตอนเฉลี่ยมากกว่าหรือเท่ากับ 2 โพตอนต่อสล็อต เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 โพตอนต่อสล็อต ทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจเพราะค่าของสัญญาณรบกวนเฉลี่ยและจำนวนโพตอนเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ส่วนช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ รหัสแบบคอนโวลูชันสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตได้ทุกๆ ค่า เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยทำให้การตัดสินใจมีความคลาดเคลื่อนน้อย ทำให้รหัสแบบคอนโวลูชันแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ดี

จากทั้งหมดสรุปได้ว่าการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนโวลูชันนั้นสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลได้มากโดยเฉพาะในช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ที่สามารถลดอัตราความผิดพลาดของข้อมูลได้ทุกๆ ค่า ส่วนช่องสัญญาณรบกวนแบบบิวส์ของนั้นจะสามารถลดอัตราความผิดพลาดลงได้เป็นอย่างมากเมื่อมีค่าของจำนวนโพตอนเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้น

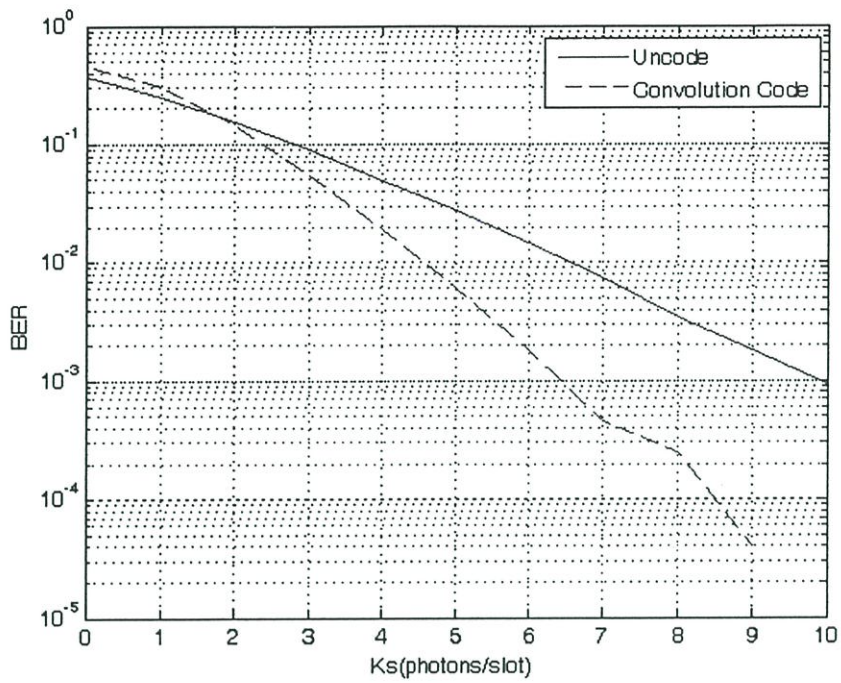


(a)

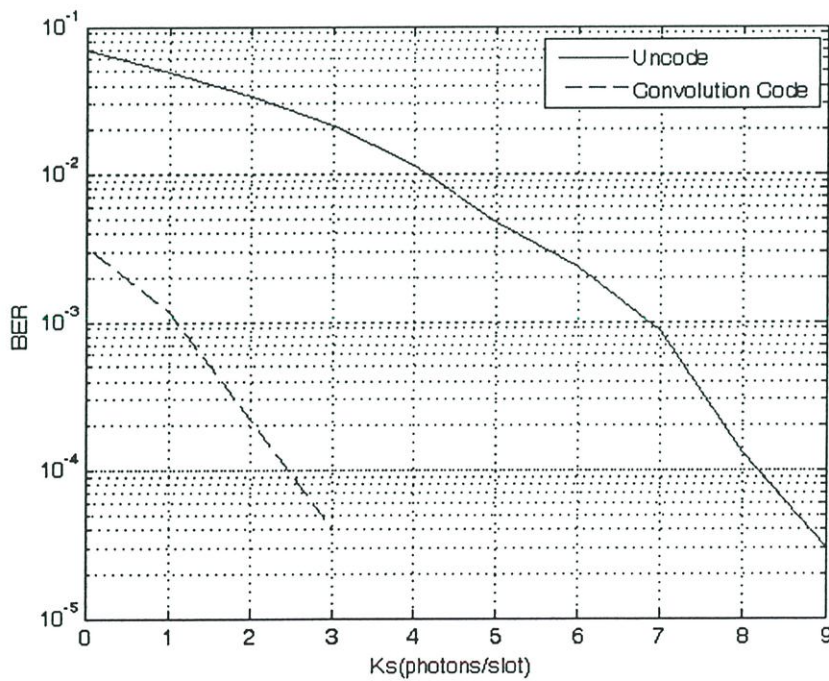


(b)

รูปที่ 5.28 การผสมสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation ที่มีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส (a) ช่องสัญญาณแบบปีวส์ของ (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์



(a)



(b)

รูปที่ 5.29 การผสมสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation ที่มีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส (a) ช่องสัญญาณแบบบีวส์ซอ (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์

5.5.5 ผลการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการสื่อสารแบบโพลอนี่ระดับ

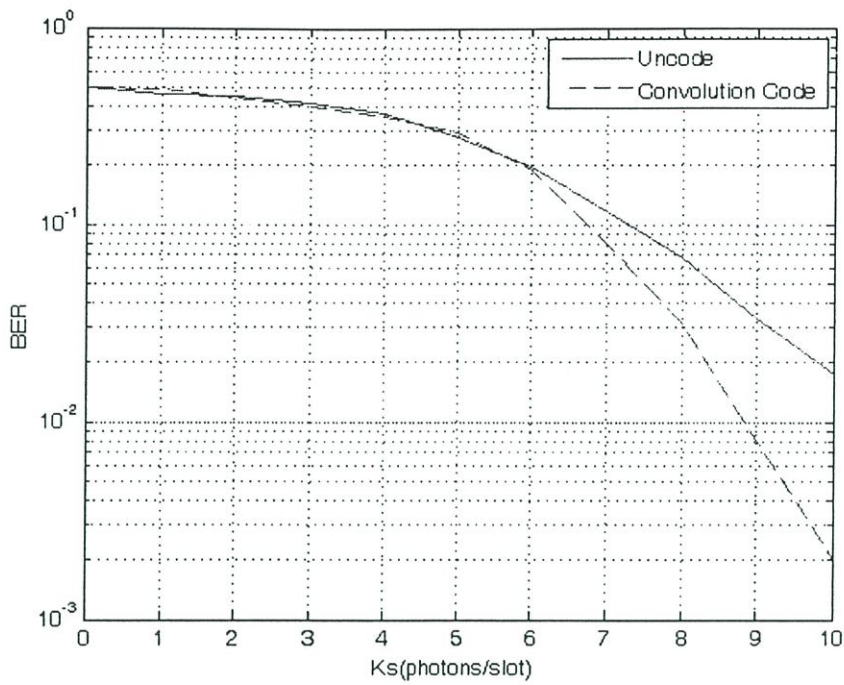
ผลการทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบ โพลอนี่ระดับและรหัสแบบคอนโวลูชันเป็นดังต่อไปนี้

ก. การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบ โพลอนี่ระดับกับรหัสแบบคอนโวลูชัน แสดงดังรูปที่ 5.30 ซึ่งเป็นการทดสอบการสื่อสารแบบ โพลอนี่ระดับที่ค่าของสัญญาณรบกวนเฉลี่ยเท่ากับ 4 โพลอนี่ต่อสล็อต พบว่ารหัสแบบคอนโวลูชันสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ เมื่อค่าของจำนวนโพลอนี่เฉลี่ยเพิ่มมากขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพในการแก้ไขข้อผิดพลาดนั้นขึ้นอยู่กับค่าของสัญญาณรบกวนที่ใช้ด้วย

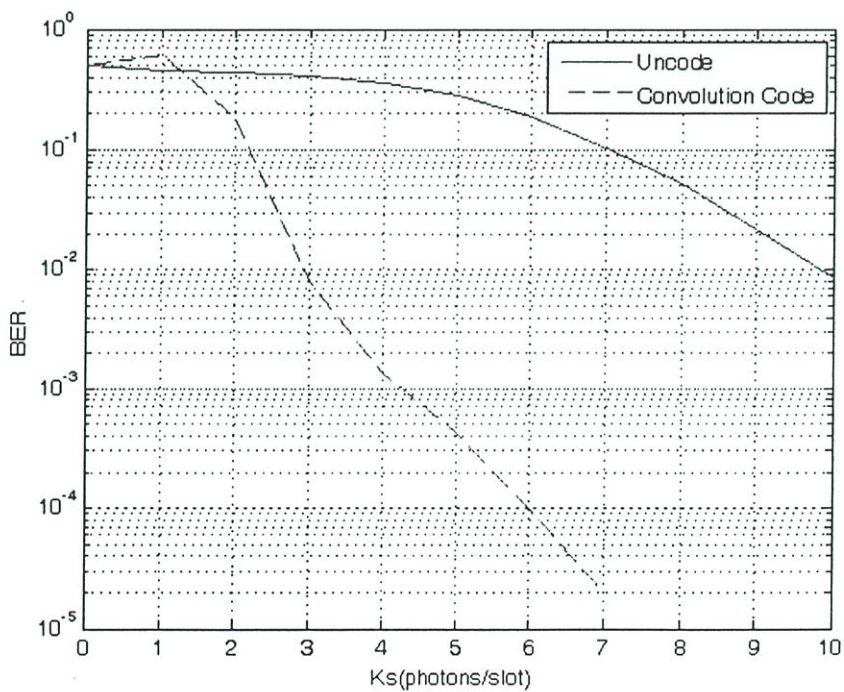
ข. การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบ โพลอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันกับรหัสแบบคอนโวลูชันแสดงดังรูปที่ 5.31 ซึ่งเป็นการทดสอบการสื่อสารแบบ โพลอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันที่ค่าของสัญญาณรบกวนเท่ากับ 4 พบว่ารหัสแบบคอนโวลูชันสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเลือกค่าของสัญญาณที่ใช้ส่งมีความเหมาะสม รวมถึงการใช้ตำแหน่งการตัดสินใจที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บีรายละเอียดของการศึกษาคำนวณหาค่าตำแหน่งการตัดสินใจและการเลือกค่าของสัญญาณสำหรับการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนั้นแสดงไว้ในภาคผนวก ก

ค. การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบ โพลอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันกับรหัสแบบคอนโวลูชัน ที่มีการสร้างรูปแบบของข้อมูลให้เหมาะสมก่อนทำการส่งสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 5.32 พบว่ากระบวนการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันที่มีการลดจำนวนบิตข้อมูลบางส่วนและเพิ่มบิตเพิ่มเติมซึ่งรายละเอียดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข นั้น การตัดสินใจแบบประมาณค่านั้นสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตลงได้มากในช่วงที่อัตราส่วนระหว่างจำนวนโพลอนี่ต่อสล็อตตัวแรกกับจำนวนสัญญาณรบกวนเฉลี่ยต่อสล็อตมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานในการส่งเฉลี่ยซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.5 ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถนำมาใช้งานได้ ส่วนในช่วงอื่นนั้นอัตราความผิดพลาดต่อบิตจะเพิ่มขึ้น แต่ยังคงต่ำกว่าค่าที่ไม่มีเข้ารหัสซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากตำแหน่งการตัดสินใจในกระบวนการแยกสัญญาณมีค่าไม่เหมาะสม ส่วนการตัดสินใจแบบคำนวณนั้นสามารถลดค่าอัตราความผิดพลาดบิตลงได้มากกว่าไม่เข้ารหัส

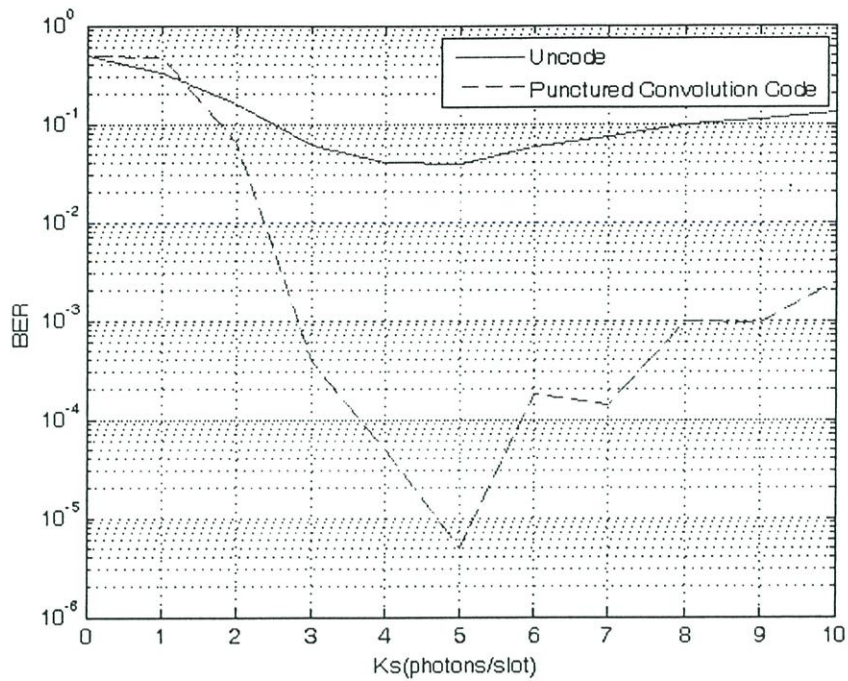
ง. การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบ โพลอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันกับรหัสแบบคอนโวลูชัน ซึ่งจะใช้รูปแบบของการส่งสัญญาณเป็นรูปแบบที่มีการเพิ่มระดับของจำนวนโพลอนี่เฉลี่ยเพื่อให้รองรับกับรูปแบบของข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน แสดงดังรูปที่ 5.33



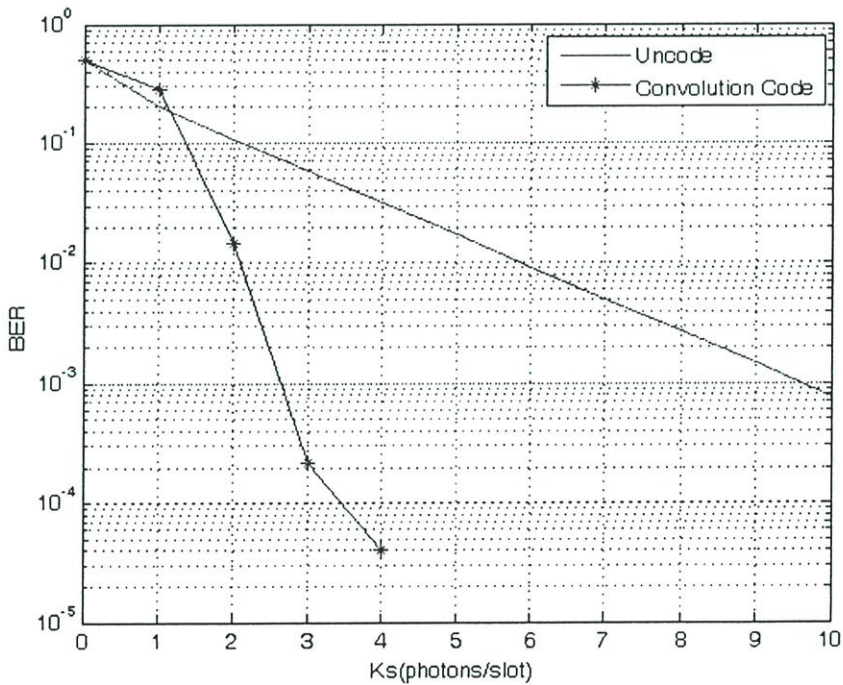
รูปที่ 5.30 การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับเมื่อมีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส



รูปที่ 5.31 การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิทีฟเมื่อมีสัญญาณรบกวนเมื่อมีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส

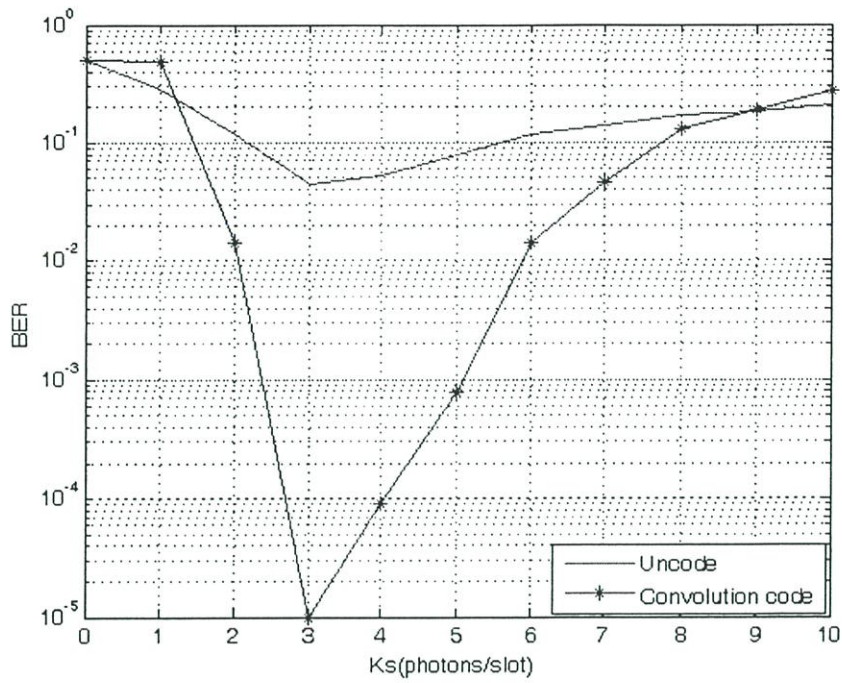


(a)

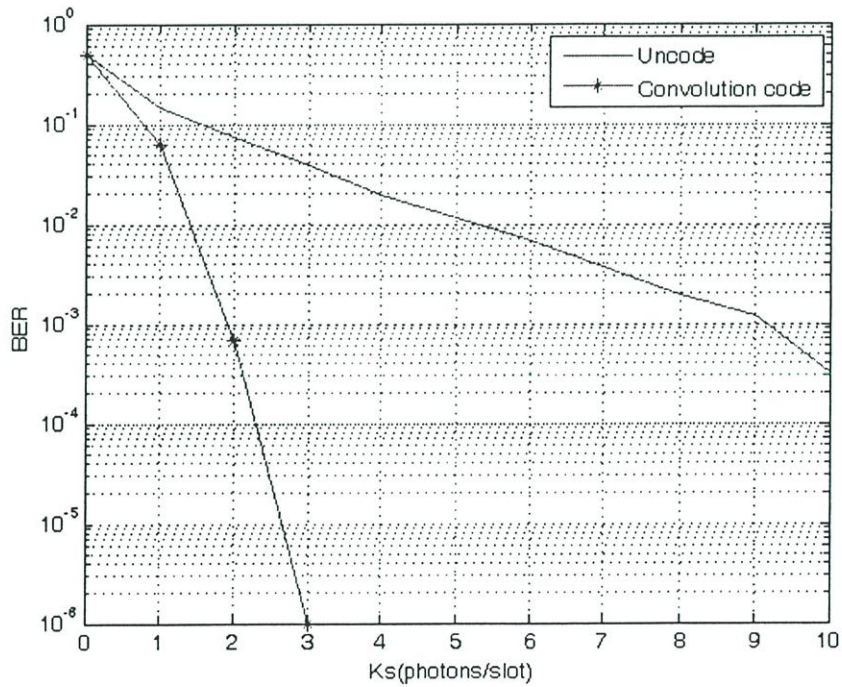


(b)

รูปที่ 5.32 การสื่อสารแบบโฟตอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบข้อมูลเมื่อมีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส (a) การตัดสินใจแบบประมาณค่า (b) การตัดสินใจแบบคำนวณ



(a)



(b)

รูปที่ 5.33 การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีการเพิ่มระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยเมื่อมีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส
 (a) การตัดสินใจแบบประมาณค่า (b) การตัดสินใจแบบคำนวณ

จากกราฟพบว่ากระบวนการเพิ่มระดับโฟตอนเฉลี่ยขึ้นอีกหนึ่งระดับซึ่งได้แสดงรายละเอียดการคำนวณระดับค่าโฟตอนเฉลี่ยไว้ในภาคผนวก ก สามารถนำการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมาใช้งานได้อย่างสมบูรณ์กับรหัสแบบคอนโวลูชัน ซึ่งการตัดสินใจแบบประมาณค่าสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิดลงได้มากในช่วงที่อัตราส่วนระหว่างจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อสล็อตตัวแรกกับจำนวนสัญญาณรบกวนเฉลี่ยต่อสล็อตมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานในการส่งเฉลี่ยซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.5 ซึ่งเป็นช่วงที่นำมาใช้งานได้ ส่วนในช่วงที่มากกว่า 3.5 นั้นอัตราความผิดพลาดต่อบิตจะเพิ่มขึ้น แต่ยังคงต่ำกว่าค่าที่ไม่มีเข้ารหัสซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากตำแหน่งการตัดสินใจในกระบวนการแยกสัญญาณมีค่าไม่เหมาะสม ส่วนการตัดสินใจแบบคำนวณสามารถลดค่าอัตราความผิดพลาดบิดลงได้มากกว่าเมื่อไม่เข้ารหัส

จากผลการทดสอบการทำงานของ การผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ การสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ และรหัสแบบคอนโวลูชัน ทั้งในช่องสัญญาณแบบบีวส์ช่องและช่องสัญญาณแบบเกาส์ที่ได้กล่าวมาทั้งหมด สามารถสรุปได้ดังนี้

- การเปรียบเทียบผลของการจำลองการทำงานของระบบสื่อสาร โดยใช้การผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ เปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตที่คำนวณได้จากสมการ สามารถนำมาสรุปเป็นตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบการจำลองการทำงานของ การผสมสัญญาณแบบต่างๆ กับความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตที่คำนวณได้จากสมการ

การผสมสัญญาณ	ค่าทางทฤษฎีของช่องสัญญาณแบบบีวส์ช่อง	ค่าทางทฤษฎีของช่องสัญญาณแบบเกาส์	ผลการเปรียบเทียบ
OOK	มี	มี	มีค่าใกล้เคียงกัน
BPPM	มี	มี	มีค่าใกล้เคียงกัน
4-PPM	มี	มี	มีค่าใกล้เคียงกัน
(4,2) MPPM	มี	ยังไม่มีให้นำเสนอ	มีค่าใกล้เคียงกัน
(3,2) OPPM	ยังไม่มีให้นำเสนอ	ยังไม่มีให้นำเสนอ	ดูจากลักษณะของกราฟ
4-DPPM	ยังไม่มีให้นำเสนอ	ยังไม่มีให้นำเสนอ	ดูจากลักษณะของกราฟ

- ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ โดยพิจารณาจากค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูล(Throughput) สรุปได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ โดยพิจารณาจากค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูล (Throughput)

Throughput	ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง	ช่องสัญญาณแบบ AWGN
1 b/sec/Hz	BPPM > OOK	BPPM > OOK
2 b/sec/Hz	(3,2) OPPM \cong 4-DPPM > 4-PPM	(3,2) OPPM \cong 4-DPPM > 4-PPM
3 b/sec/Hz	8-PPM \cong (4,2) MPPM	8-PPM \cong (4,2) MPPM

- ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ โดยพิจารณาจากค่าจำนวนสล็อตที่เท่ากัน สรุปได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ โดยพิจารณาจากค่าจำนวนสล็อตที่เท่ากัน

จำนวนสล็อต	ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง	ช่องสัญญาณแบบ AWGN
4 สล็อต	4-DPPM \cong (2,2) OPPM > 4-PPM > (4,2) MPPM	4-DPPM \cong (2,2) OPPM > 4-PPM > (4,2) MPPM
6 สล็อต	(3,2) OPPM > (6,2) MPPM	(3,2) OPPM > (6,2) MPPM

- การเปรียบเทียบผลของการจำลองการทำงานของ การสื่อสารแบบโพตอนหลายระดับกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตที่คำนวณจากสมการสามารถสรุปเป็นตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบการจำลองการทำงานของ การสื่อสารแบบโพตอนหลายระดับกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตที่คำนวณได้จากสมการ

การผสมสัญญาณ	การตัดสินใจแบบประมาณค่า	การตัดสินใจแบบคำนวณ
การสื่อสารแบบโพตอนสี่ระดับ	มีความใกล้เคียงกันมากมีการเกิดจุด Return point	มีค่าใกล้เคียงกัน
การสื่อสารแบบโพตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับ BPPM	มีความใกล้เคียงกันมาก เกิดจุด Return point	มีค่าใกล้เคียงกันจนกราฟเกือบซ้อนทับกัน
การสื่อสารแบบโพตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับ BPPM ที่มีการเพิ่มระดับของโพตอน	การจำลองการทำงานให้ผลที่ต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีเล็กน้อย เกิดจุด Return point	การจำลองการทำงานให้ผลที่ต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีเล็กน้อย

- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับซึ่งมีการนำเสนอการประยุกต์ใช้งานกระบวนการผสมสัญญาณออกมาในหลายรูปแบบ สามารถนำผลการเปรียบเทียบมาสรุปได้เป็นตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ

การผสมสัญญาณ	การตัดสินใจแบบประมาณค่า	การตัดสินใจแบบคำนวณ
การสื่อสารแบบโฟตอนี่ระดับกับ การสื่อสารแบบโฟตอนี่ระดับที่ใช้ งานร่วมกับ BPPM	การสื่อสารแบบโฟตอนี่ ระดับที่ใช้งานร่วมกับ BPPM ดีกว่า	การสื่อสารแบบโฟตอนี่ ระดับที่ใช้งานร่วมกับ BPPM ดีกว่า
การสื่อสารแบบโฟตอนี่ระดับที่ใช้ งานร่วมกับ BPPM และการสื่อสาร แบบโฟตอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับ BPPM ที่มีการเพิ่มระดับของโฟตอน	แบบที่มีการเพิ่มระดับจะมี ประสิทธิภาพลดลงเมื่อ มากกว่าจุด Return point	มีค่าใกล้เคียงกัน

- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณแบบต่างๆ เมื่อมีการนำรหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดข้อมูลแบบคอนวูลูชันมาใช้งานกับการไม่เข้ารหัส สามารถนำมาสรุปได้เป็นตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณแบบต่างๆ เมื่อมีการเข้ารหัสแบบคอนวูลูชันกับไม่เข้ารหัสที่มีค่าของสัญญาณรบกวนเท่ากับ 1

การผสมสัญญาณ	ช่องสัญญาณแบบปิวส์ซอง	ช่องสัญญาณแบบ AWGN
OOK	เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจะลดลงเมื่อมีค่า $K_s > 3$	ลดลงทุกค่า
BPPM	เพิ่มขึ้นเล็กน้อยจะลดลงเมื่อมีค่า $K_s > 2$	ลดลงทุกค่า
4-PPM	ลดลงเมื่อมีค่า $K_s > 3$	ลดลงทุกค่า
(4,2) MPPM	ลดลงเมื่อมีค่า $K_s > 1$	ลดลงทุกค่า
(3,2) OPPM	ลดลงเมื่อมีค่า $K_s > 2$	ลดลงทุกค่า
4-DPPM	ลดลงเมื่อมีค่า $K_s > 2$	ลดลงทุกค่า

- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ เมื่อมีการนำรหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดข้อมูลแบบคอนวูลูชันมาใช้งานกับการไม่เข้ารหัส สามารถสรุปเป็นตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.7 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับเมื่อมีการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันกับไม่เข้ารหัส

การผสมสัญญาณ	ผลการทดสอบ
การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ	ลดลงเมื่อมีค่า $K_s >$ ค่า K_b
การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับ BPPM	ลดลงเมื่อมีค่า $K_s >$ ค่า K_b
การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับ BPPM เมื่อมีการปรับเปลี่ยนรูปแบบของข้อมูล	ลดลงเมื่อมีค่า $K_s >$ ค่า K_b แต่ยังคงมีจุด Return point
การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับ BPPM ที่มีการเพิ่มระดับของโฟตอน	ลดลงเมื่อมีค่า $K_s >$ ค่า K_b แต่ยังคงมีจุด Return point

จากทั้งหมดสรุปได้ว่าเทคนิคต่างๆ ที่นำมาประยุกต์ใช้งานกับการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันนั้นจะลดค่าอัตราความผิดพลาดบิดลงได้มากกว่าการผสมสัญญาณต้นแบบทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการทดสอบเช่นอัตราการส่งผ่านข้อมูลหรือจำนวนสล็อตที่เท่ากันส่วนการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับนั้นเมื่อมีการนำมาใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันจะให้ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณดีกว่าแบบไม่ใช้งานร่วมกัน และรหัสแบบคอนโวลูชันเป็นรหัสที่สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดเป็นอย่างดีโดยขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเข้ารหัสและอัตราส่วนระหว่างโฟตอนเฉลี่ยต่อสัญญาณรบกวนเฉลี่ยในช่องสัญญาณแบบนิวส์ซอง

บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

การผสมสัญญาณเชิงแสงเป็นการผสมสัญญาณที่มีการพัฒนารูปแบบให้มีการใช้งานได้หลากหลายโดยนำเทคนิคต่างๆ มาพัฒนาให้มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณที่เพิ่มขึ้น สำหรับการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนวูลูชันและการถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บีนั้นมีการนำมาใช้งานอย่างหลากหลายในระบบสื่อสารและเป็นที่ยอมรับในประสิทธิภาพในการแก้ไขข้อผิดพลาด

6.1 สรุปผลการวิจัย

สำหรับการศึกษาวิจัยนี้เป็นการศึกษาดังแต่พื้นฐานของการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบ On-Off Keying ไปจนถึงการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันรวมถึงการนำเทคนิคต่างๆ มาใช้งานเพื่อพัฒนารูปแบบและประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณเชิงแสงให้สูงขึ้น และนำหลักการของการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันมาใช้งานร่วมกับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับเพื่อให้มีการใช้งานที่หลากหลายและมีประสิทธิภาพในการทำงานเพิ่มขึ้น โดยเริ่มจากการทดสอบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณเชิงแสงในรูปแบบต่างๆ รวมถึงการนำมาใช้งานร่วมกับการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนวูลูชัน และการนำเสนอรูปแบบของการสื่อสารแบบโฟตอนโดยนำมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณเชิงแสง ซึ่งสามารถแบ่งส่วนของการศึกษาวิจัยออกเป็น 4 ส่วนคือช่องสัญญาณ การผสมสัญญาณเชิงแสง การสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับและรหัสแบบคอนวูลูชัน

ช่องสัญญาณเป็นการศึกษาลักษณะของการกระจายตัวของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบการสื่อสาร โดยทั่วไป ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการกระจายตัว 2 ค่าคือค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าความแปรปรวน (Variance) แล้วนำมาทำการออกแบบสร้างช่องสัญญาณแบบเกาส์และแบบปัวส์ซองเพื่อนำมาทดสอบการทำงานของระบบสื่อสารร่วมกับการผสมสัญญาณเชิงแสง

การผสมสัญญาณเชิงแสงนั้นได้ทำการศึกษาดังแต่หลักการทางทฤษฎีของการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ และนำมาออกแบบใช้งานในระบบสื่อสารเชิงแสง รวมถึงศึกษาหลักการคำนวณความน่าจะเป็นในการเกิดอัตราความผิดพลาดเพื่อนำมาตรวจสอบผลของการจำลองการทำงานโดยพิจารณาประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณจากค่าอัตราความผิดพลาดบิต ซึ่งในช่องสัญญาณแต่ละรูปแบบนั้นจะมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องแตกต่างกัน สำหรับช่องสัญญาณแบบเกาส์จะทำการเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (SNR) แล้วพิจารณาค่าของอัตราความผิดพลาดบิตที่เกิดขึ้น ส่วนในช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองจะทำการเปลี่ยนแปลงค่าจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อสล็อต (K_s) และกำหนดให้ค่าของสัญญาณรบกวนเฉลี่ย (K_b) มีค่าคงที่แล้ว

พิจารณาค่าของอัตราความผิดพลาดบิตที่เกิดขึ้น จากนั้นจึงทำการทดสอบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณแต่ละรูปแบบโดยกำหนดเงื่อนไขของการส่งสัญญาณ 2 รูปแบบคือค่าของอัตราการส่งผ่านข้อมูล (Throughput) และจำนวนสลอตที่ใช้ในการส่งสัญญาณ ผลการทดสอบปรากฏว่าการผสมสัญญาณในรูปแบบที่มีการพัฒนาโดยใช้เทคนิคต่างๆ นั้นจะให้ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณสูงขึ้นสามารถลดอัตราความผิดพลาดได้มากกว่าวิธีพื้นฐาน

การสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับและนำมาประยุกต์ใช้งานกับการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ซึ่งพบว่าเมื่อมีการเพิ่มจำนวนสลอตเข้าไปในการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ ทำให้สามารถลดอัตราความผิดพลาดของบิตลงได้มากกว่าการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ แต่เกิดปัญหาในการส่งสัญญาณเนื่องจากจำนวนรูปแบบของสัญญาณไม่สอดคล้องกับค่าของข้อมูลแบบดิจิทัล เมื่อนำมาใช้งานกับรหัสแบบคอนโวลูชันจึงมีการนำเสนอรูปแบบที่สามารถใช้งานร่วมกัน 3 รูปแบบ คือ การลดระดับของการสื่อสารแบบโฟตอนให้เหลือเพียงสองระดับ การใช้งานของรหัสแบบคอนโวลูชันที่มีการลดจำนวนบิตในการส่งสัญญาณและเพิ่มบิตเพิ่มเติมเข้าไป (Mapping) เพื่อทำการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของข้อมูลดิจิทัลให้สอดคล้องกับจำนวนรูปแบบของสัญญาณ และการเพิ่มระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยเพื่อให้สร้างรูปแบบของสัญญาณที่ใช้งานได้สอดคล้องกับรูปแบบของข้อมูล ซึ่งผลของการทดสอบพบว่าสามารถใช้งานร่วมกันได้และลดอัตราความผิดพลาดลงได้มากกว่าแบบพื้นฐานเช่นกัน

รหัสแบบคอนโวลูชันนั้นเมื่อนำมาใช้งานร่วมกันกับการผสมสัญญาณเชิงแสงพบว่าสามารถลดอัตราความผิดพลาดในการส่งสัญญาณลงได้ ทั้งนี้ประสิทธิภาพของการแก้ไขข้อผิดพลาดนั้นขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน ได้แก่ค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดค่าอัตราการเข้ารหัส และค่า Constraint length

จากทั้งหมดสรุปได้ว่าการตรวจสอบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณแต่ละรูปแบบนั้น จะทำการพิจารณาจากค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER) ซึ่งประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณเชิงแสงขึ้นอยู่กับเทคนิคที่ใช้ในการผสมสัญญาณและช่องสัญญาณ เมื่อนำมาใช้งานร่วมกับรหัสแบบคอนโวลูชันนั้นประสิทธิภาพของการเข้ารหัสจะขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ 3 ค่าคือเมตริกซ์ตัวกำเนิดอัตราการเข้ารหัสและค่า Constraint Length และในการวิจัยนี้มีการนำเสนอการผสมสัญญาณเชิงแสงรูปแบบใหม่ที่เรียกว่าการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันดังแสดงในรูปที่ 2.22 โดยมีการตัดสินใจสองรูปแบบคือการตัดสินใจแบบประมาณค่าและการตัดสินใจแบบคำนวณ นอกจากนี้มีการนำเสนอใช้งานของรหัสแบบคอนโวลูชันกับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันซึ่งมีการนำเสนอรูปแบบของการใช้งานอยู่ 3 รูปแบบได้แก่การลดจำนวนโฟตอนเฉลี่ยลงให้เหลือเพียงสองระดับดังแสดงในรูปที่ 4.5 การปรับเปลี่ยนรูปแบบของข้อมูลที่ได้จากการ

เข้ารหัสแบบคอนโวลูชันก่อนที่จะทำการผสมสัญญาณและหลังจากการแยกสัญญาณก่อนมีการถอดรหัสแบบไวเทอร์บีดังแสดงในรูปที่ 4.6 และการเพิ่มระดับของโพตอนเฉลี่ยเพื่อเพิ่มจำนวนรูปแบบของสัญญาณให้เท่ากับรูปแบบของข้อมูลที่ได้อาจเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันดังแสดงในสมการ (4.15)

6.2 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในงานวิจัย

- การสร้างช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองนั้นมีความยากต่อการเข้าใจ เนื่องจากไม่สามารถทำการสร้างได้โดยตรงจากสมการของค่าฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น
- เทคนิคการคำนวณหาค่าอัตราความผิดพลาดทางทฤษฎีของการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ ในช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองนั้นค่อนข้างยาก มีเทคนิคการคำนวณที่ซับซ้อน และบางครั้งยังพบว่าค่าที่เกิดขึ้นจากการคำนวณมีมากกว่าโปรแกรมคอมพิวเตอร์จะรับได้ ทำให้ต้องปรับเปลี่ยนวิธีการในการออกแบบโปรแกรมให้รองรับกับค่าของข้อมูลทั้งหมดที่เป็นไปได้

6.3 ข้อเสนอแนะ

- การออกแบบการทดสอบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณเชิงแสงชุดนี้สามารถนำไปศึกษาเพื่อใช้งานกับรหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดในรูปแบบอื่นๆ เช่นรหัสแบบแฮมมิง รหัสแบบบล็อกเชิงเส้น
- การสื่อสารแบบโพตอนี่ระดับสามารถนำไปวิธีการหาค่าแห่งการตัดสินใจไปพัฒนาใช้งานกับระดับของโพตอนที่มีค่ามากกว่าี่ระดับ
- การสื่อสารแบบโพตอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันนั้นสามารถนำประยุกต์ใช้งานกับการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบอื่นๆ เพื่อพัฒนารูปแบบการผสมสัญญาณเชิงแสงให้หลากหลายและเหมาะสมต่อความต้องการใช้งานมากยิ่งขึ้น
- รูปแบบการปรับเปลี่ยนรูปแบบของข้อมูลดิจิทัล (Mapping) สามารถทำให้การประยุกต์ใช้งานกับการผสมสัญญาณรูปแบบอื่นๆ ที่มีรูปแบบของสัญญาณที่ไม่สอดคล้องกับข้อมูลดิจิทัล และสามารถพัฒนารูปแบบอื่นๆ เพื่อนำมาใช้ปรับเปลี่ยนรูปแบบของข้อมูลให้เหมาะสม
- การศึกษาทฤษฎีการคำนวณอัตราความผิดพลาดอย่างละเอียดนั้น สามารถนำความเข้าใจไปประยุกต์ใช้งานกับการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบอื่นๆ ที่ยังไม่มีให้นำเสนอทฤษฎีการคำนวณหาอัตราความผิดพลาด

- การสื่อสารแบบโฟตอนสองระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบนั้นเป็นนำลักษณะบางส่วนจากการสื่อสารแบบโฟตอนที่ระดับมาใช้งานเท่านั้นไม่ใช่เป็นการลดรูปแบบเพื่อให้เหมาะสมต่อรูปแบบข้อมูล ซึ่งอาจมีการพัฒนาให้มีรูปแบบที่เหมาะสมเพื่อให้ได้อัตราการส่งผ่านข้อมูลที่เหมาะสมกับวิธีการผสมสัญญาณสามารถใช้งานได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ตัญฉกร วุฒิสัทธาธิกุลกิจ. หลักการไฟฟ้าสื่อสาร. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2546
- [2] S. Karp, R. M. Gagliardi, S. E. Moran, and L. B. Stotts, **Optical Channels, Application of Communications Theory**. New York : Plenum. 1988.
- [3] อธิคม ฤกษ์บุตร. 2005. การสื่อสารทางแสงผ่านอากาศ [Online]. Available : <http://www.cme.mut.ac.th/article/FSO.pdf> 2005.
- [4] Defence Space Technology Center. 2006. ระบบสื่อสารใยแก้วนำแสง [Online]. Available : <http://www1.mod.go.th/opsd/dstcweb/ict/fiber.doc> 2006.
- [5] Nectec. 2005. **Miracle of Light** [Online]. Available: <http://www.nectec.or.th/sci2005/light.html>
- [6] Bruno Huttner and Jurgen Brendel. "Photon Counting Technique for fiber measurements" *LIGHTWAVE*, Vol.17., Issue 9., Aug. 2000.
- [7] wikipedia. 2006. **Normal Distribution** [Online]. Available : http://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution 2006.
- [8] Dong-U Lee, Wayne Luk, John Villasenor, Peter Y.K. Cheung. "A Hardware Gaussian Noise Generator for Channel Code Evaluation" *11th Annual IEEE Symposium on Field-Programmable Custom Computing Machines (FCCM'03)*, 2003.
- [9] M.F. Schollmeyer, W.H. Tranter. "Noise generators for the simulation of digital Communication systems" *Proc. 24th Ann. Simulation Symp.*, 1991, pp. 264–275.
- [10] William H. Press, Saul A. Teukolsky. **NUMERICAL RECIPES IN C: THE ART OF SCIENTIFIC COMPUTING** Cambridge University Press. 1992.
- [11] J.L. Danger et al. "Efficient FPGA implementation of Gaussian noise generator for communication channel emulation", *Proc. 7th IEEE Int. Conf. on Elect., Circ. and Syst. (ICECS 2K)*, 2000.
- [12] A. Ghazel et al. "Design and performance analysis of a high speed AWGN communication channel emulator", *Proc. IEEE Pacific Rim Conf. on Commun. Comput. and Sig. Proc.*, Vol. 2, 2001. pp. 374–377.
- [13] Answers. 2005. **Poisson Distribution** [Online]. Available : <http://www.answers.com/Poisson%20Distribution>
- [14] Actuarial Education Company. 2006. **Poisson Distribution** [Online]. Available : <http://www.acted.co.uk/Docs/2005/STAT/SP-08%20Sample.pdf>

- [15] Robert M Gagliardi, and Sherman Karp. **Optical Communications**. A Wiley-Interscience Publication. 1995
- [16] Costas N. Georghiades. "Modulation and Coding for Throughput-Efficient Optical Systems" *IEEE Inform.Theory*, vol. 40, No.5., Sep. 1994. pp. 1313-1326.
- [17] John G. Proakis, Masound Salehi, and Gerhard Bauch. **Contemporary Communication Systems.**, Thomson-Brooks/Cole. 2004.
- [18] H. Sugiyama and K. Nosu. "MPPM: A method of improving the band utilization efficiency in optical PPM" *J. Lightwave Technol.*, vol. 7. No.3. Mar. 1989.
- [19] G.M.Lee and G.W.Schroeder. "Optical PPM with multiple position per pulse-width" *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-25, Mar. 1977. pp.360-364.
- [20] I. Bar-Davide and G. Kaplan. "Information rates photon limited Overlapping pulse position modulation channels" *IEEE Inform.Theory*, vol. IT-30, May. 1984. pp. 445-464.
- [21] D. Zwillinger. "Differential PPM has a higher throughput than PPM for the band-limited and average-power-limited optical channel" *IEEE Inform.Theory*, vol. IT-34, Sep. 1988. pp. 1269-1273.
- [22] Tomohiko UYEMATSU, Kenichiro KIKUCHI and Kohichi SAKANIWA, "Trellis Coded Modulation for Multilevel Photon Communication System", *Singapore ICCS/ISITA '92*
- [23] Goran H. Einarsson, **Principles of Lightwave Communications.**, John Wiley & Sons, 1996.
- [24] ดิศพล จำเริญกุล. "การพัฒนาและการประยุกต์รหัสเทอร์โบร่วมกับ การปรับแต่งสัญญาณ ล่วงหน้าสำหรับการสื่อสารไร้สาย" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง. 2546.
- [25] ชัยวัฒน์ แก้วสาย. "การออกแบบสร้างชุดถอดรหัส Viterbi ขนาดเล็กสำหรับระบบ โทรศัพทเคลื่อนที่ยุคที่ 3" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม สารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.

ภาคผนวก ก

ตำแหน่งการตัดสินใจสำหรับการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ

ตำแหน่งการตัดสินใจ (Decision point) เป็นค่าที่สำคัญมากในการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ เนื่องจากส่งผลให้ผลของการตัดสินใจว่าสัญญาณที่ได้รับจะถูกต้องมากน้อยเพียงใด สำหรับในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอกระบวนการหาค่าตำแหน่งการตัดสินใจสำหรับการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับในหัวข้อ 2.8 ไว้สองวิธี ได้แก่ วิธีการประมาณค่าและวิธีการคำนวณจากทฤษฎี

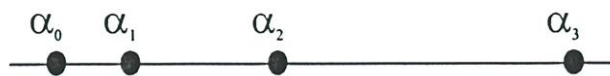
ก.1 วิธีการประมาณค่า

ในการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับนี้มีตำแหน่งการตัดสินใจอยู่ 3 ตำแหน่ง จากรูปที่ ก.1 เป็นรูปแบบของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ ให้ α เป็นจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อคาบเวลา โดย $\alpha_0 = 0$, $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 4$ และ $\alpha_3 = 9$ ตามลำดับ ซึ่งเกิดจากการส่งสัญญาณโดยใช้ความเข้มแสงทั้งหมดสี่ระดับ เพื่อให้ได้จำนวนโฟตอนเฉลี่ยตามที่ต้องการ พื้นฐานทฤษฎีการหาค่าตำแหน่งอ้างอิงนำมาจากทฤษฎีการหาค่าตำแหน่งการตัดสินใจ (Threshold: m_T) ของ On-Off Keying ซึ่งมีสมการในการคำนวณดังนี้

$$m_T = \frac{K_s}{\log\left(1 + \frac{K_s}{K_b}\right)} \quad (ก.1)$$

โดยที่ K_s, K_b คือจำนวนโฟตอนเฉลี่ยและจำนวนสัญญาณรบกวนเฉลี่ยในพัลส์แสงตามลำดับ

จากสมการนี้สามารถนำมาเป็นตำแหน่งอ้างอิงตัวที่หนึ่งของการสื่อสารแบบโฟตอน 4 ระดับ เนื่องจากจำนวนโฟตอนเฉลี่ย α_0 และ α_1 มีค่าเช่นเดียวกับสัญญาณของการผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying การหาค่าตำแหน่งอ้างอิงตัวที่สองนั้นสามารถพิจารณาจากค่าของ α_2 ใน Signal diagram จะพบว่ามีความเป็น 4 เท่าของ α_1 จึงได้นำหลักการนี้มาอ้างอิงว่าตำแหน่งอ้างอิงตัวที่สองนั้นควรมีค่าเป็น 4 เท่าของตำแหน่งอ้างอิงตัวที่หนึ่ง และการพิจารณาหาค่าตำแหน่งอ้างอิงตัวที่สามก็ใช้หลักการเช่นเดียวกันซึ่งก็จะได้ค่าเป็น 9 เท่าของตำแหน่งอ้างอิงตัวที่หนึ่ง



รูปที่ ก.1 รูปแบบของการสื่อสารแบบโฟตอน 4 ระดับ

ก.2 ตำแหน่งการตัดสินใจแบบคำนวณจากทฤษฎี

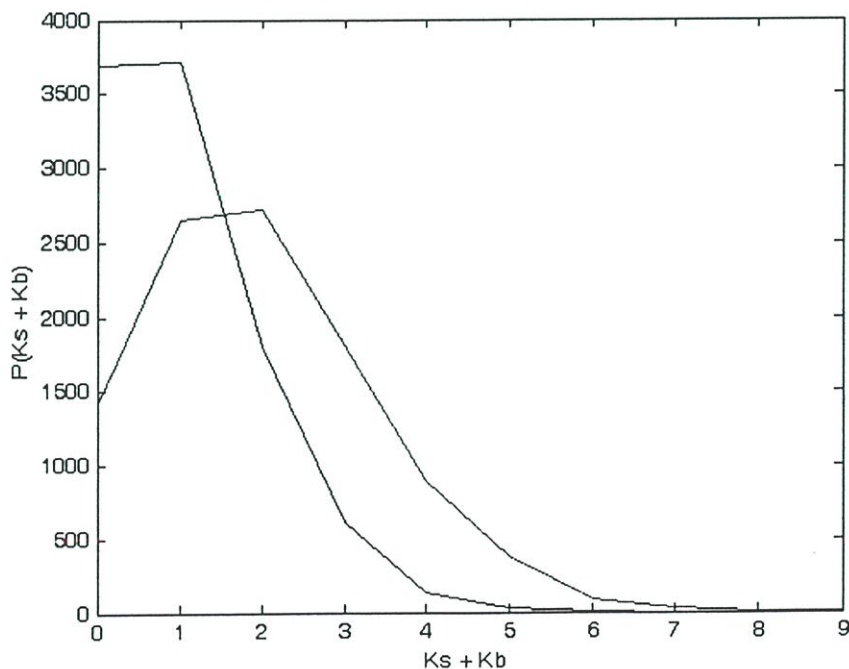
ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการตัดสินใจว่าตำแหน่งใดเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมจะเป็น Decision point นั้นใช้เงื่อนไขจุดตัดของสมการ 2 สมการเป็นจุดที่ตัดสินใจว่าเหมาะสมต่อการเป็นตำแหน่ง Decision point เนื่องจากเป็นจุดที่สมการ 2 สมการมีค่าเท่ากัน จะได้ตำแหน่ง Decision point ตัวแรกเป็นจุดตัดระหว่างสมการความน่าจะเป็นของการไม่เกิดโฟตอนในพัลส์แสงแต่มีสัญญาณรบกวนเฉลี่ยเท่ากับ Kb คือ

$$P(m) = \frac{(Kb)^m e^{-Kb}}{m!} \quad (ก.2)$$

กับสมการความน่าจะเป็นของการเกิดโฟตอนเฉลี่ยจำนวน Ks โฟตอนและมีสัญญาณรบกวนเฉลี่ยเท่ากับ Kb คือ

$$P(m) = \frac{(Ks + Kb)^m e^{-(Ks + Kb)}}{m!} \quad (ก.3)$$

จากกราฟเป็นการหาจุดตัดระหว่างสมการความน่าจะเป็นของการเกิดโฟตอนเฉลี่ยจำนวน 1 โฟตอนกับสมการความน่าจะเป็นของการไม่เกิดโฟตอนในพัลส์แสง โดยมีสัญญาณรบกวนเฉลี่ยเท่ากับ 1 พบว่าจุดตัดระหว่างทั้งสองสมการมีค่าเท่า 1.4427 ซึ่งเมื่อนำทั้งสองสมการมาหาค่าของ Decision Point ทางสมการจะได้เท่ากับ



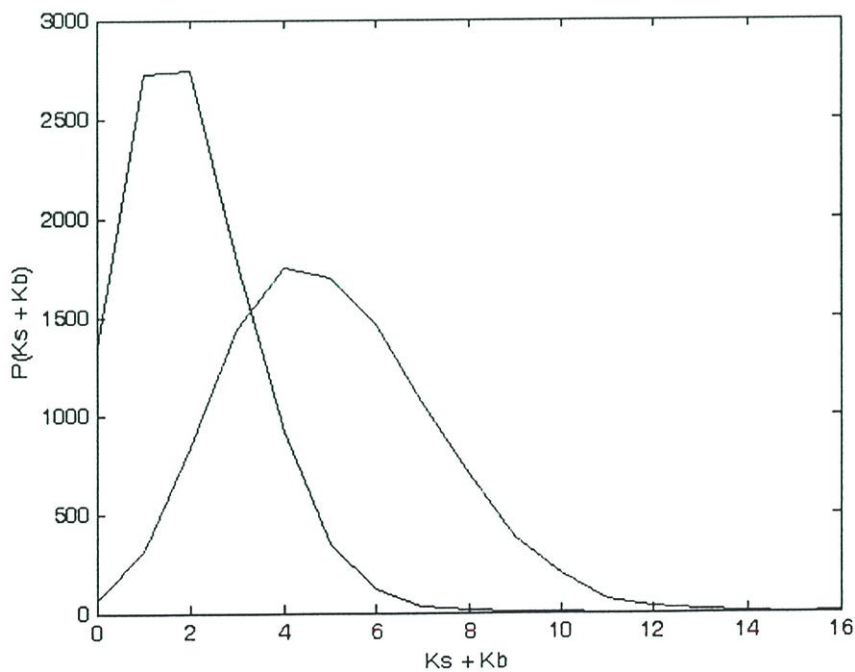
รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างสมการ $P(m) = \frac{(Kb)^m e^{-Kb}}{m!}$ และ $P(m) = \frac{(Ks + Kb)^m e^{-(Ks + Kb)}}{m!}$

$$m_{T1} = \frac{Ks}{\log(Ks + Kb) - \log(Ks)} \quad (ก.4)$$

ตำแหน่งของ Decision Point ตัวที่สองหาได้จากสมการจุดตัดระหว่างสมการความน่าจะเป็นของการเกิดโฟตอนเฉลี่ยจำนวน Ks โฟตอนและมีสัญญาณรบกวนเฉลี่ยเท่ากับ Kb ในสมการที่ (ก.3) กับสมการความน่าจะเป็นของการเกิดโฟตอนเฉลี่ยจำนวน $4Ks$ โฟตอนและมีสัญญาณรบกวนเฉลี่ยเท่ากับ Kb คือ

$$P(m) = \frac{(4Ks + Kb)^m e^{-(4Ks+Kb)}}{m!} \quad (ก.5)$$

ซึ่งเมื่อทำการพลอตกราฟระหว่างสมการทั้งสองจะได้ดังรูปที่ ก.3 จากกราฟเป็นการหาจุดตัดระหว่างสมการความน่าจะเป็นของการเกิดโฟตอนเฉลี่ยจำนวน 1 โฟตอนกับสมการความน่าจะเป็นของการเกิดโฟตอนเฉลี่ยจำนวน 4 โฟตอน โดยมีสัญญาณรบกวนเฉลี่ยเท่ากับ 1 พบว่าจุดตัดระหว่างทั้งสองสมการมีค่าเท่า 3.2741 ซึ่งเมื่อนำทั้งสองสมการมาหาค่าของ Decision Point ทางสมการจะได้เท่ากับ



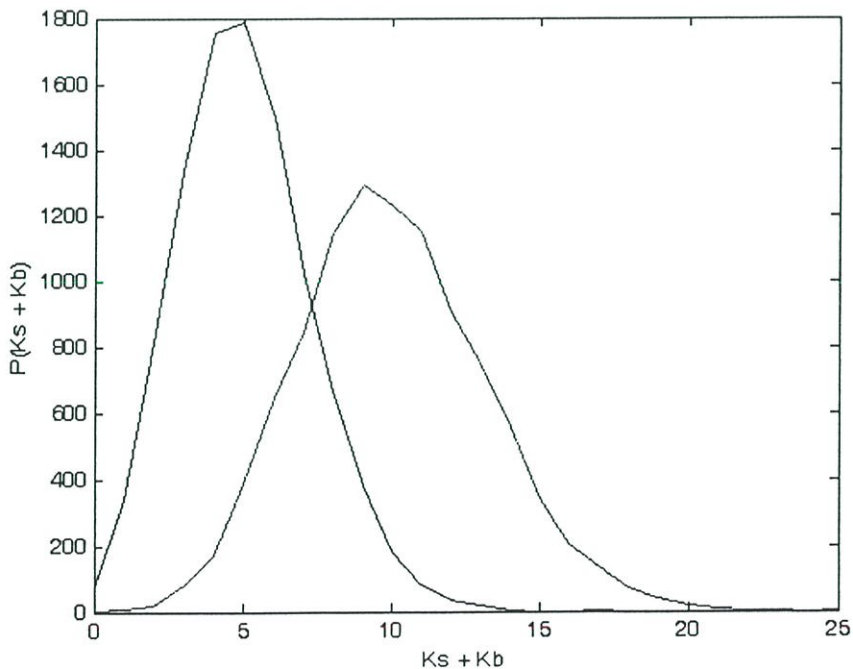
รูปที่ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสมการ $P(m) = \frac{(Ks + Kb)^m e^{-(Ks+Kb)}}{m!}$ และ $P(m) = \frac{(4Ks + Kb)^m e^{-(4Ks+Kb)}}{m!}$

$$m_{T2} = \frac{3Ks}{\log(4Ks + Kb) - \log(Ks + Kb)} \quad (\text{ก.6})$$

และตำแหน่งของ Decision Point ตัวที่สามหาได้จากสมการจุดตัดระหว่างสมการความน่าจะเป็นของการเกิดโฟตอนเฉลี่ยจำนวน $4Ks$ โฟตอนและมีสัญญาณรบกวนเฉลี่ยเท่ากับ Kb ในสมการ (ก.5) กับสมการความน่าจะเป็นของการเกิดโฟตอนเฉลี่ยจำนวน $9Ks$ โฟตอนและมีสัญญาณรบกวนเฉลี่ยเท่ากับ Kb คือ

$$P(m) = \frac{(9Ks + Kb)^m e^{-(9Ks+Kb)}}{m!} \quad (\text{ก.7})$$

ซึ่งเมื่อทำการพลอตกราฟระหว่างสมการทั้งสองจะได้ดังรูปที่ ก.4 จากกราฟเป็นการหาจุดตัดระหว่างสมการความน่าจะเป็นของการเกิดโฟตอนเฉลี่ยจำนวน 1 โฟตอนกับสมการความน่าจะเป็นของการเกิดโฟตอนเฉลี่ยจำนวน 4 โฟตอน โดยมีสัญญาณรบกวนเฉลี่ยเท่ากับ 1 พบว่าจุดตัดระหว่างทั้งสองสมการมีค่าเท่า 7.2135 ซึ่งเมื่อนำทั้งสองสมการมาหาค่าของ Decision Point ทางสมการจะได้เท่ากับ



รูปที่ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสมการ $P(m) = \frac{(4Ks + Kb)^m e^{-(4Ks+Kb)}}{m!}$ และ $P(m) = \frac{(9Ks + Kb)^m e^{-(9Ks+Kb)}}{m!}$

$$m_{r3} = \frac{5Ks}{\log(9Ks + Kb) - \log(Ks + Kb)} \tag{ก.8}$$

ซึ่งจากผลของสมการทั้งหมดสรุปเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$m_{rn} = \frac{Ks_{n+1} - Ks_n}{\log(Ks_{n+1} + Kb) - \log(Ks_n + Kb)} \tag{ก.9}$$

ตำแหน่งของการตัดสินใจทั้งหมดสามารถแสดงได้ดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ค่าตำแหน่งการตัดสินใจแบบคำนวณทางทฤษฎี

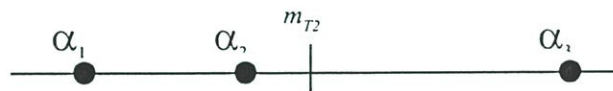
สมการที่ 1	สมการที่ 2	ค่าตำแหน่งการตัดสินใจ
$P(m) = \frac{(Kb)^m e^{-Kb}}{m!}$	$P(m) = \frac{(Ks + Kb)^m e^{-(Ks + Kb)}}{m!}$	$m_{r1} = \frac{Ks}{\log(Ks + Kb) - \log(Ks)}$
$P(m) = \frac{(Ks + Kb)^m e^{-(Ks + Kb)}}{m!}$	$P(m) = \frac{(4Ks + Kb)^m e^{-(4Ks + Kb)}}{m!}$	$m_{r2} = \frac{3Ks}{\log(4Ks + Kb) - \log(Ks + Kb)}$
$P(m) = \frac{(4Ks + Kb)^m e^{-(4Ks + Kb)}}{m!}$	$P(m) = \frac{(9Ks + Kb)^m e^{-(9Ks + Kb)}}{m!}$	$m_{r3} = \frac{5Ks}{\log(9Ks + Kb) - \log(Ks + Kb)}$
$P(m) = \frac{(Ks_n + Kb)^m e^{-(Ks_n + Kb)}}{m!}$	$P(m) = \frac{(Ks_{n+1} + Kb)^m e^{-(Ks_{n+1} + Kb)}}{m!}$	$m_{rn} = \frac{Ks_{n+1} - Ks_n}{\log(Ks_{n+1} + Kb) - \log(Ks_n + Kb)}$

หลักการตัดสินใจเลือกค่าตำแหน่งตัดสินใจและรูปแบบของสัญญาณสำหรับการสื่อสารแบบโพลอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ซึ่งเป็นการผสมสัญญาณที่มีรูปแบบของการส่งสัญญาณเพียง 6 รูปแบบ ทำให้ไม่สามารถใช้งานรูปแบบทั้งหมดกับการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน จึงได้มีการพิจารณาลดระดับของสัญญาณให้เป็นการสื่อสารแบบโพลอนี่สองระดับที่ใช้งานร่วมกับไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ซึ่งมีหลักการเลือกสัญญาณคือทำการพิจารณาเลือกค่า α_i จากการผสมสัญญาณแบบการสื่อสารแบบโพลอนี่สองระดับที่ใช้งานร่วมกับไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน โดยการใช้ตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่า ซึ่งมีค่า α_i จำนวน 3 ค่า ได้แก่ $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 4$ และ $\alpha_3 = 9$ จากค่าทั้งสามสามารถนำมาจับคู่เพื่อหาค่า α_i ที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสารแบบโพลอนี่สองระดับที่ใช้งานร่วมกับไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันได้ 3 กรณี ได้แก่ รูปแบบที่ 1 เลือกค่า $\alpha_1 = 1$ และ $\alpha_2 = 4$ รูปแบบที่ 2 เลือกค่า $\alpha_2 = 4$ และ $\alpha_3 = 9$ รูปแบบที่ 3 เลือกค่า $\alpha_1 = 1$ และ $\alpha_3 = 9$ รูปแบบของการตัดสินใจแสดงดังรูปที่ ก.5, ก.6 และ ก.7 ตามลำดับ

สำหรับการเปรียบเทียบผลการจำลองการทำงานเพื่อหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการสื่อสารแบบโพลอนี่สองระดับที่ใช้งานร่วมกับไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันนั้นเริ่มจากการเปรียบเทียบตำแหน่งการตัดสินใจของกรณีที่ 3 ซึ่งผลการเปรียบเทียบตำแหน่งตัดสินใจแสดงดังรูปที่ ก.8 ใน

รูปแบบของอัตราความผิดพลาดต่อสัญลักษณ์ (SER) พบว่าอัตราความผิดพลาดต่อสัญลักษณ์ที่ตำแหน่งการตัดสินใจ m_{T2} มีค่าน้อยกว่าตำแหน่งการตัดสินใจ m_{T3} จึงเลือกตำแหน่งการตัดสินใจเป็น m_{T2}

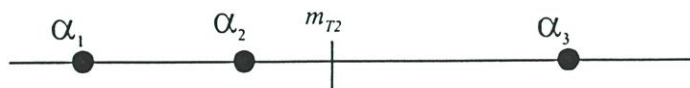
จากนั้นนำผลการจำลองการทำงานของทั้งสามกรณีมาเปรียบเทียบเพื่อหาค่าที่เหมาะสมโดยตัดสินใจจากอัตราความผิดพลาดต่อสัญลักษณ์ ดังแสดงในรูปที่ ก.9 พบว่ากรณีที่ 3 คือมีค่าของ $\alpha_1 = 1$ และ $\alpha_3 = 9$ ที่มีตำแหน่งการตัดสินใจเป็น m_{T2} มีอัตราความผิดพลาดต่อสัญลักษณ์น้อยที่สุดใน 3 กรณี จึงเลือกกรณีที่ 3 มาใช้งานกับการสื่อสารแบบโฟตอนสองระดับที่ใช้งานร่วมกับไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ซึ่งเมื่อแปรผลการทดสอบแล้วพบว่า กรณีที่ 3 มีระยะห่างระหว่างค่า α_i ทั้งสองค่ามากที่สุดและตำแหน่งการตัดสินใจที่ m_{T2} นั้นอยู่ระหว่างค่า α_1 และ α_3 ทำให้การตัดสินใจมีค่าถูกต้องมากยิ่งขึ้น



รูปที่ ก.5 รูปแบบของการสื่อสารแบบโฟตอนสองระดับ รูปแบบที่ 1



รูปที่ ก.6 รูปแบบของการสื่อสารแบบโฟตอนสองระดับ รูปแบบที่ 2

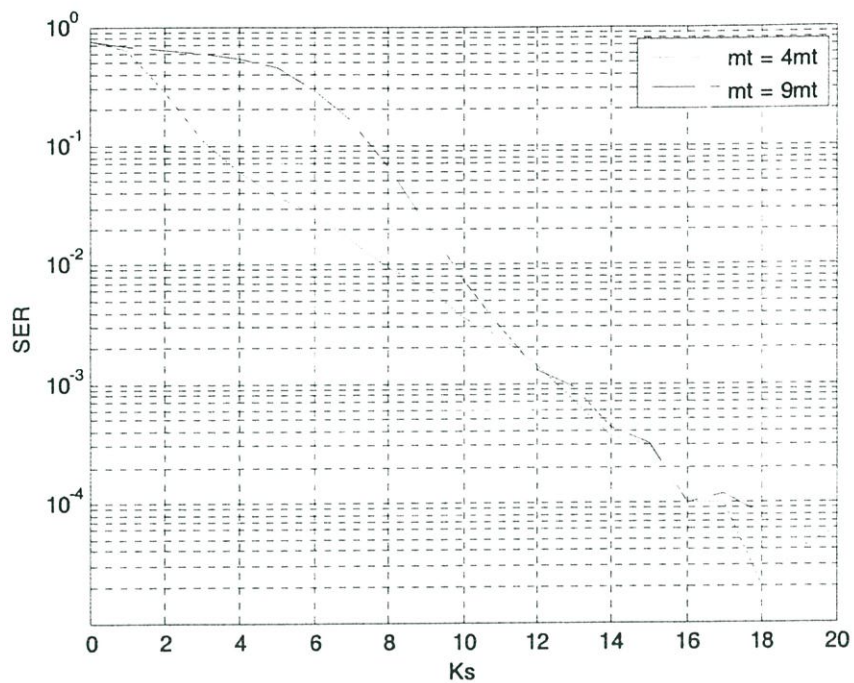


(a)

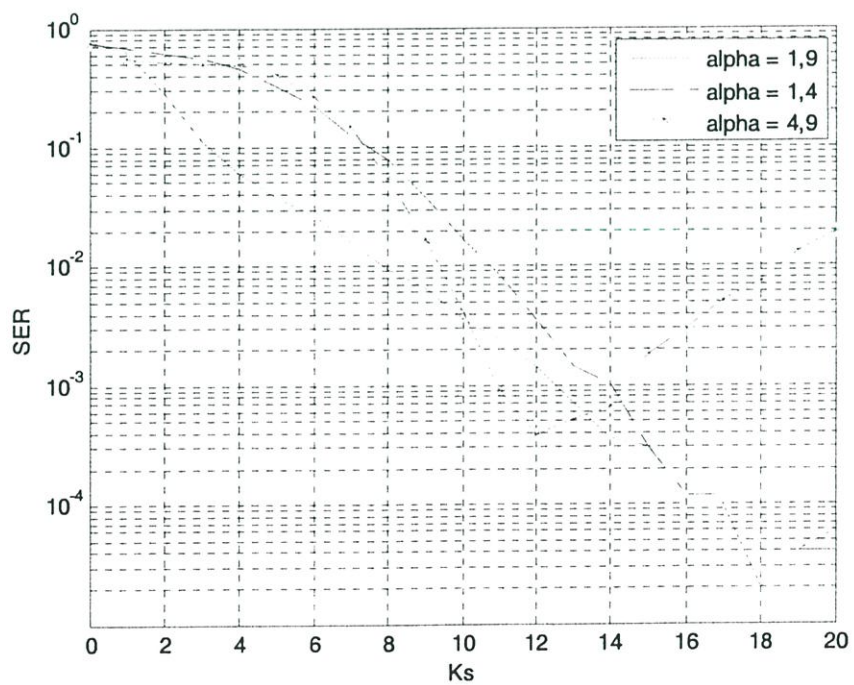


(b)

รูปที่ ก.7 รูปแบบของการสื่อสารแบบโฟตอนสองระดับ รูปแบบที่ 3 (a) ตำแหน่งของการตัดสินใจตัวที่ 1 (b) ตำแหน่งของการตัดสินใจตัวที่ 2



รูปที่ ๘.๘ การเปรียบเทียบระหว่างค่าตำแหน่งการตัดสินใจของการสื่อสารแบบโฟตอนสองระดับ รูปแบบที่ 3



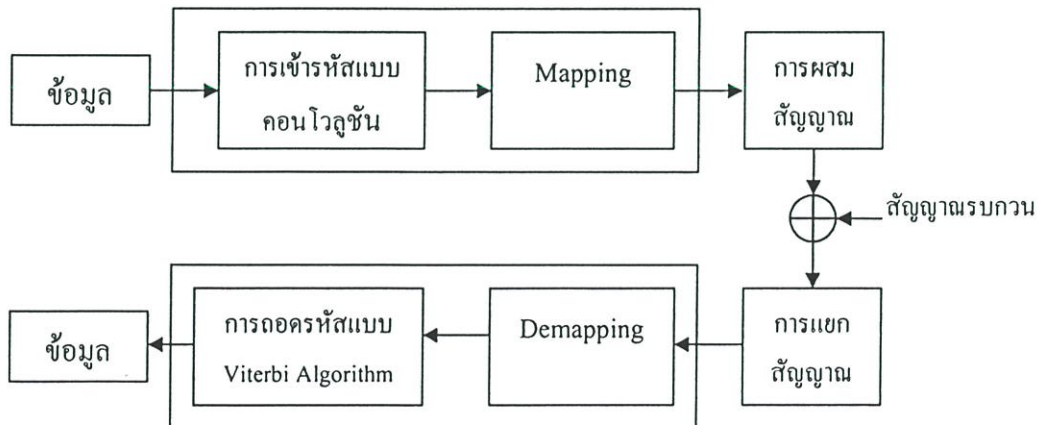
รูปที่ ๘.๙ การเปรียบเทียบกรณีการเลือกค่า α , ทั้งสามกรณี

ภาคผนวก ข

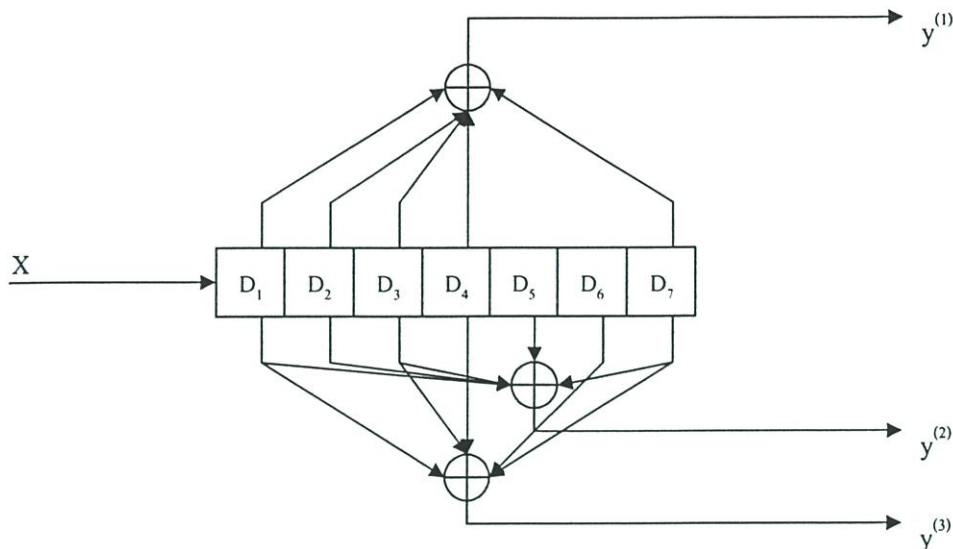
การเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันกับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับ การผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

เนื่องมาจากรูปแบบของการผสมสัญญาณแบบการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งาน
ร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน (4-level Photon Communication with
BPPM) ที่มีรูปแบบของการผสมสัญญาณเพียง 6 รูปแบบ ซึ่งไม่เหมาะสมต่อค่า Output ของการ
เข้ารหัสแบบคอนโวลูชันซึ่งมีทั้งหมด 8 รูปแบบ ได้แก่ 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111
ดังนั้นจึงมีการพิจารณานำการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันที่มีการตัดบิตบางส่วนออก (Puncture) เพื่อ
ลดจำนวนบิตข้อมูลในการส่งผ่านช่องสัญญาณให้ลดลง มาใช้งานร่วมกับการเพิ่มบิตเพิ่มเข้าไป
เพื่อให้มีรูปแบบของการส่งสัญญาณสอดคล้องกับการผสมสัญญาณแบบการสื่อสารแบบโฟตอนสี่
ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันซึ่งมีกระบวนการทำงาน
แสดงในรูปที่ ข.1 โดยมีหลักการทำงานดังนี้

1. การเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนั้นมีค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเข้ารหัสได้แก่อัตราการ
เข้ารหัส (R) ค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิด (Generator Matrix) และค่า Constraint length ซึ่งวิธีการที่นำเสนอ
นี้เลือกค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดเท่ากับ $[1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1]$ $[1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1]$ และ $[1\ 0\ 1\ 1\ 0\ 1\ 1]$ ซึ่งมีอัตราการ
เข้ารหัสเท่ากับ $1/3$ และค่า Constraint length เท่ากับ 7 ดังแสดงในรูปที่ ข.2



รูปที่ ข.1 กระบวนการทำงานของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณ
แบบไบนารีพัลส์โพสิชันและรหัสแบบคอนโวลูชันที่มีการลดจำนวนบิต



รูปที่ ข.2 โครงสร้างการเข้ารหัสแบบคอนวอลูชันที่มี $g = 1111001, 1110101$ และ 1011011

2. กระบวนการแมปปิง (Mapping) เป็นกระบวนการที่นำเสนอขึ้นเพื่อเปลี่ยนรูปแบบของชุดข้อมูลให้สามารถใช้งานได้กับการผสมสัญญาณแบบการสื่อสารแบบโพตอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ซึ่งมีขั้นตอนอยู่ 2 ขั้นตอนได้แก่

2.1 การเพิ่มบิตเข้าไปเพื่อตรวจสอบค่าที่ออกมาจากเอาต์พุตของการเข้ารหัสแบบคอนวอลูชัน ซึ่งได้นำแนวคิดของการเพิ่ม Parity bit check ที่ได้ทำการตรวจสอบจำนวนบิต 0 หรือบิต 1 ในชุดข้อมูลจำนวน n บิตว่าเป็นจำนวนคู่หรือเป็นจำนวนคี่ มาเปลี่ยนเป็นการตรวจสอบว่าบิตที่ออกมาจาก output ของการเข้ารหัสนั้นมีค่าเหมือนกันหรือต่างกันโดยจะทำการตรวจสอบทีละ 3 บิต เนื่องจากจำนวนบิตที่ต้องการใช้ในการผสมสัญญาณเป็น 3 บิตซึ่งต้องการจำนวนสัญญาณที่เป็นไปได้ทั้งหมดถึง 8 สัญญาณ แต่การผสมสัญญาณแบบการสื่อสารแบบโพตอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันนั้นมีรูปแบบของสัญญาณเพียง 6 รูปแบบเท่านั้น ซึ่งเมื่อพิจารณาค่าเอาต์พุตที่เป็นไปได้คือ 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111 จะพบว่า การที่จะทำให้สัญญาณเหลือเพียง 6 รูปแบบคือการเพิ่มเติมบิตเข้าไปโดยใช้คุณสมบัติที่สามารถแยกสัญญาณออกเป็น 2 กลุ่มดังนี้

- กลุ่มที่ 1 ได้แก่ 000 และ 111 เป็นกลุ่มที่มีค่าเหมือนกันทั้ง 3 บิต
- กลุ่มที่ 2 ได้แก่ 001, 010, 011, 100, 101 และ 110 เป็นกลุ่มที่มีค่าไม่เหมือนกันทั้ง 3 บิต

เมื่อทำการแบ่งสัญญาณเป็น 2 กลุ่มทำการทดลองเพิ่มค่าบิต 0 หรือ 1 เข้าได้ โดยให้กลุ่มที่ 1 นั้นเติมบิต 1 ส่วนกลุ่มที่ 2 นั้นเติมบิต 0 เข้าไปด้านท้ายของบิตที่ 3 ซึ่งจะทำให้เอาต์พุตของการเข้ารหัสแบบคอนวอลูชันเพิ่มเป็น 4 บิต จะได้ผลดังตารางที่ ข.1 และการเพิ่มเติมบิตนั้นจะพบว่าบิตที่เพิ่มเติมนั้นจะอยู่ในตำแหน่งที่มีค่า 4 หารลงตัวทั้งหมด ดังตัวอย่างในรูปที่ ข.3

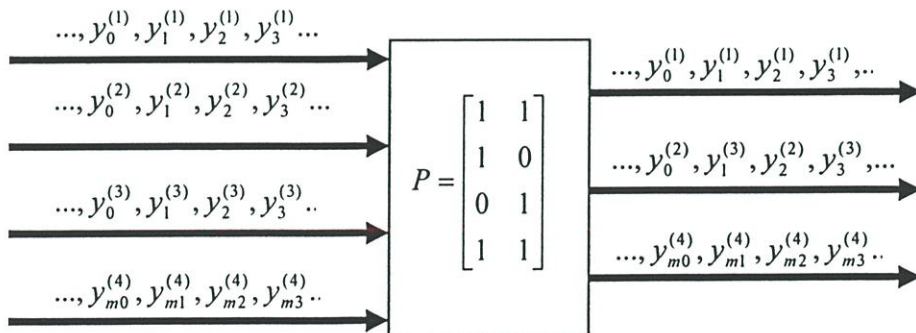
ตารางที่ ข.1 ผลของกระบวนการแมปปีงโดยการเพิ่มเติมบิต

ผลของการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน	ผลของการเพิ่มเติมบิตเพิ่มเติม
0 0 0	0 0 0 1
0 0 1	0 0 1 0
0 1 0	0 1 0 0
0 1 1	0 1 1 0
1 0 0	1 0 0 0
1 0 1	1 0 1 0
1 1 0	1 1 0 0
1 1 1	1 1 1 1

2.2 เมื่อทำการเพิ่มเติมบิตเพิ่มเติมแล้ว จะเป็นการนำกระบวนการลดจำนวนบิต (Puncture) เพื่อลดจำนวนบิตที่เกิดขึ้นและให้ได้รูปแบบที่เหมาะสมกับการผสมสัญญาณแบบการสื่อสารแบบโพตอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ซึ่งในวิธีการที่นำเสนอได้ใช้รูปแบบการลดจำนวนบิตที่สอดคล้องกับค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิด (Generator Matrix) คือ $[1\ 1\ 0\ 1]$ และ $[1\ 0\ 1\ 1]$ หลักการทำงานของกระบวนการลดจำนวนบิตแสดงในรูปที่ ข.4 ซึ่งกระบวนการลดจำนวนบิตนั้นจะทำให้อัตราการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันยังคงเท่ากับ $1/3$ กำหนดให้ $y_k^{(1)}, y_k^{(2)}$ และ $y_k^{(3)}$ เป็นเอาต์พุตของการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและ $y_{mk}^{(4)}$ เมื่อพิจารณาจากตารางที่ ข.1 พบว่ารูปแบบของความเป็นไปได้ของข้อมูลทั้งหมด 8 รูปแบบ เมื่อทำการ Puncture แล้วจะเกิดรูปแบบที่เป็นไปได้ของข้อมูลดังแสดงในตารางที่ ข.2

000001010 \longrightarrow 000100100100

รูปที่ ข.3 ตัวอย่างการเพิ่มเติมบิต



รูปที่ ข.4 หลักการทำงานของแมปปีง

ตารางที่ ข.2 ผลของกระบวนการลดจำนวนบิต

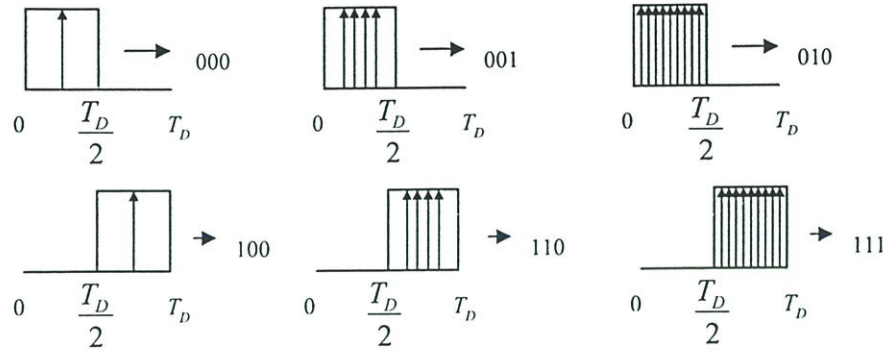
ผลของการเข้ารหัสแบบคอนวูลูชันและแมปปิง	ผลของการตัดบิตที่ 3	ผลของการตัดบิตที่ 2
0 0 0 1	0 0 1	0 0 1
0 0 1 0	0 0 0	0 1 0
0 1 0 0	0 1 0	0 0 0
0 1 1 0	0 1 0	0 1 0
1 0 0 0	1 0 0	1 0 0
1 0 1 0	1 1 0	1 0 0
1 1 0 0	1 0 0	1 1 0
1 1 1 1	1 1 1	1 1 1

เมื่อพิจารณาจากตารางทั้งหมดจะพบว่า มีรูปแบบที่เกิดขึ้นจำนวน 6 รูปแบบได้แก่ [0 0 0] [0 0 1] [0 1 0] [1 0 0] [1 1 0] และ [1 1 1]

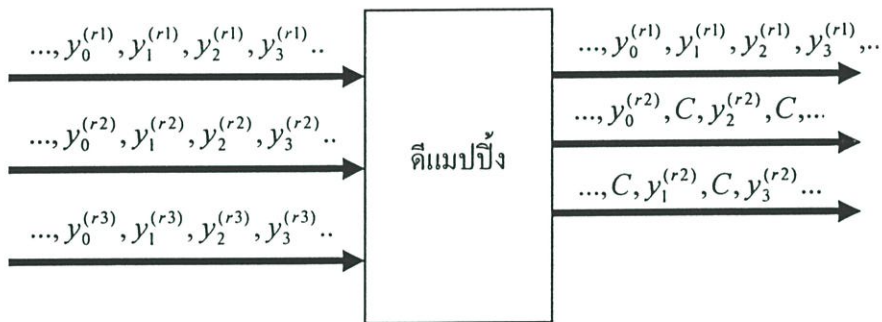
3. เมื่อได้รูปแบบที่เหมาะสมทั้ง 6 รูปแบบแล้วจึงนำมาทำการจัดให้เหมาะสมกับรูปแบบรูปแบบการสื่อสารแบบพอดอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ดังแสดงในรูปที่ ข.5

4. เมื่อทำการจัดรูปแบบที่เหมาะสมแล้วจึงนำสัญญาณที่ได้จากการผสมสัญญาณส่งผ่านช่องสัญญาณแบบพัลส์ของไปยังภาครับ โดยหลักการตัดสินใจของภาครับจะพิจารณาจากตำแหน่งของพัลส์แสงที่เกิดขึ้นและจำนวนพอดอนที่เกิดขึ้นว่าเหมาะสมในช่วงใดของตำแหน่งการตัดสินใจ

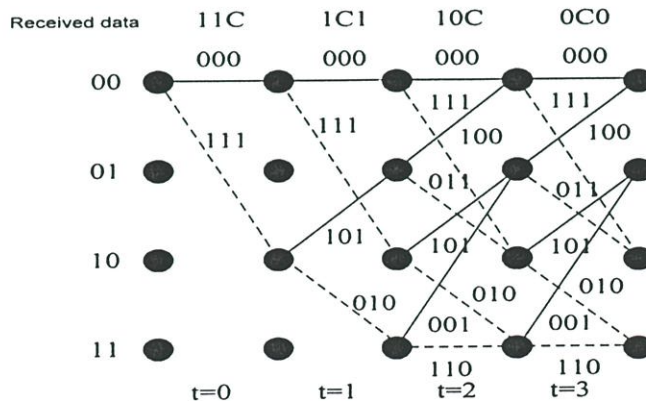
5. กระบวนการก่อนที่จะทำการถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บีนั้นคือกระบวนการดีแมปปิง (Demapping) ซึ่งมี 2 ขั้นตอนดังเช่นกับกระบวนการแมปปิงได้แก่ กระบวนการเพิ่มบิตที่ตัดออกไปจากกระบวนการ Puncture ณ ตำแหน่งที่ทำการตัดบิตออกไป ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สามารถคาดเดาได้ว่าค่าบิต 0 หรือบิต 1 และกระบวนการตัดบิตที่เพิ่มเข้ามา ซึ่งมีหลักการทำงานดังแสดงในรูปที่ ข.6 ให้ $y_k^{(r1)}$, $y_k^{(r2)}$ และ $y_k^{(r3)}$ เป็นค่าที่ได้รับจากช่องสัญญาณ และ C เป็นค่าที่เติมเข้ามาแทนที่บิตที่ได้ทำการตัดออกไปจากกระบวนการดีแมปปิงซึ่งเป็นค่าที่ไม่สามารถคาดเดาได้ว่าเป็น 0 หรือ 1 นั่นเอง ซึ่งสามารถประมาณค่าได้จากหลักการถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บีโดยอาศัยแผนภาพแบบทรีลิสที่ใช้วิธีการค้นหาเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด ซึ่งในแผนภาพแบบทรีลิสของการเข้ารหัสแบบคอนวูลูชันที่มีเมตริกซ์ตัวกำเนิดเท่ากับ [1111001] [1110101] และ [1011011] มีจำนวนสถานะทั้งหมดถึง $2^6 = 64$ สถานะนั้นมีความยุ่งยากในการนำเสนอ ดังนั้นในที่นี้จึงยกตัวอย่างของแผนภาพแบบทรีลิสที่มีค่า $g = [1 1 1], [1 0 0]$ และ $[1 1 0]$ เพื่อแสดงวิธีการหาเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมด ดังรูปที่ ข.7 ซึ่งสมมติให้ค่าของที่ได้จากการดีแมปปิง เป็น 1 1 C 1 C 1 1 0 C 0 C



รูปที่ ข.5 รูปแบบการสื่อสารแบบโพตอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันกับรหัสแบบคอนวอลูชันที่มีการลดจำนวนบิตข้อมูล



รูปที่ ข.6 หลักการทำงานของดีแมปปีง



รูปที่ ข.7 ตัวอย่างการถอดรหัสโดยใช้แผนภาพแบบทรีลิส

สำหรับกระบวนการเปรียบเทียบเพื่อหาเส้นทางที่เป็นไปได้จะทำการพิจารณาเปรียบเทียบครั้งละ 3 บิตตามจำนวนเอาท์พุทที่ได้จากการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน ซึ่งตัวอย่างของการถอดรหัสโดยใช้แผนภาพแบบทริลิสแสดงในรูปที่ ข.7 การเปรียบเทียบเส้นทางจะใช้สมการการหาค่า Hamming distance ดังนี้

$$d = |C'_i - C| \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่ C_i คือบิตที่รับเข้ามา (Received data)

C'_i คือบิตที่อยู่บนกิ่งของ Trellis Diagram

ในคาบเวลา $t = 0$ จะได้ $C'_i = 00C$ เส้นทางที่เป็นไปได้ 2 เส้นทางได้แก่

- สมมติให้ค่าข้อมูลที่ใช้ในการเข้ารหัสเป็น 0 ค่าที่ได้จากการเข้ารหัสคือ 000
- สมมติให้ค่าข้อมูลที่ใช้ในการเข้ารหัสเป็น 1 ค่าที่ได้จากการเข้ารหัสคือ 111

เมื่อนำค่าบิตที่รับเข้ามามาเปรียบเทียบกับค่า 000 จะได้ว่ามีระยะ Hamming เท่ากับ

$$d_1 = |0 - 0| + |0 - 0| + |0 - C| \quad (\text{ข.2})$$

เมื่อนำค่าบิตที่รับเข้ามามาเปรียบเทียบกับค่า 111 จะได้ว่ามีระยะ Hamming เท่ากับ

$$d_1 = |1 - 0| + |1 - 0| + |1 - C| \quad (\text{ข.3})$$

ซึ่งพบว่าทั้งสองสมการนั้นจะมีค่าที่หาไม่ได้คือพจน์ที่ 3 ซึ่งค่า C ที่เป็นไปได้นั้นเป็นค่าที่ทำให้ความน่าจะเป็นของข้อมูลเป็น 0 และ 1 เท่าๆ กันจึงสามารถหาได้จาก

$$|0 - C_i| = |1 - C_i| \quad (\text{ข.4})$$

ความเป็นน่าจะเป็น 0 หรือ 1 เท่าๆ กันจะได้สมการที่นำมาเปรียบกัน 4 เงื่อนไข ดังนี้

- เมื่อด้านซ้ายและด้านขวาเป็นบวกเหมือนกันจะได้

$$0 - C_i = 1 - C_i \quad (\text{ข.5})$$

พบว่าเงื่อนไขนี้หาค่าไม่ได้

- เมื่อด้านซ้ายเป็นลบและด้านขวาเป็นบวก

$$\begin{aligned}
 -(0 - C_i) &= 1 - C_i \\
 2C_i &= 1 \\
 C_i &= \frac{1}{2}
 \end{aligned}
 \tag{ข.6}$$

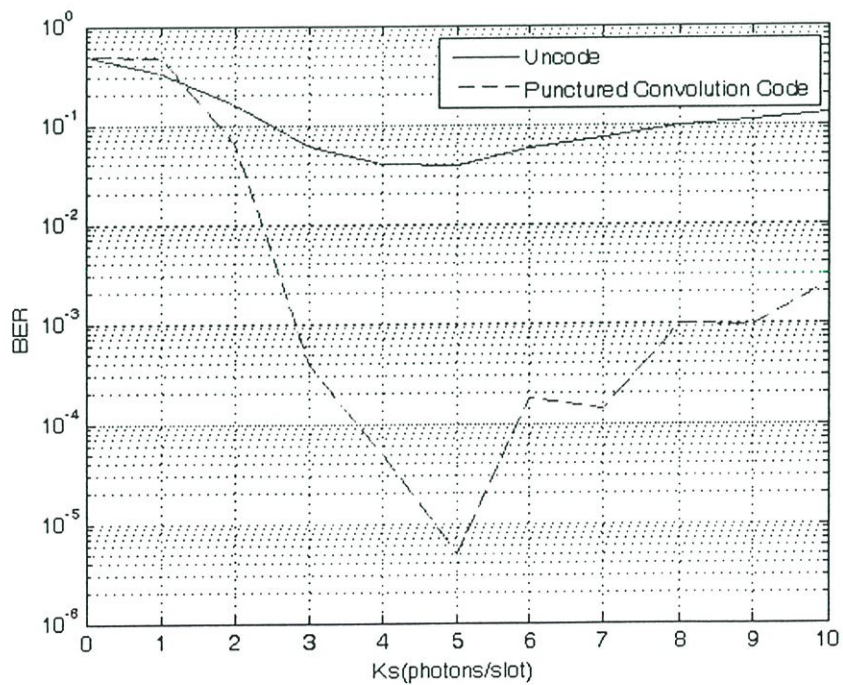
- เมื่อด้านซ้ายเป็นบวกและด้านขวาเป็นลบ

$$\begin{aligned}
 0 - C_i &= -(1 - C_i) \\
 1 &= 2C_i \\
 \frac{1}{2} &= C_i
 \end{aligned}
 \tag{ข.7}$$

- เมื่อด้านซ้ายและด้านขวาเป็นลบเหมือนกัน

$$-(0 - C_i) = -(1 - C_i)
 \tag{ข.8}$$

พบว่าเงื่อนไขนี้หาค่าไม่ได้



รูปที่ ข.8 อัตราความผิดพลาดต่อบิตของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน เมื่อมีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส เมื่อ $Kb = 1$

6. สรุปได้ว่าค่า C' ที่นำมาแทนในตำแหน่งที่ทำการ Puncture ออกไปนั้นควรจะเป็นค่า 0.5 เพื่อให้ระยะของ Hamming distance มีค่าเท่ากัน ดังนั้นค่าที่จะนำไปถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บี ในตัวอย่างรูปที่ ข.7 คือ 1 1 0.5 1 0.5 1 1 0 0.5 0 0.5 0 ระยะเวลาสุดท้ายคือระยะเวลาการถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บีซึ่งผลของกระบวนการทั้งหมดนั้นแสดงอยู่ในรูปกราฟระหว่างจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อสล็อตกับค่าอัตราความผิดพลาดต่อบิตแสดงดังรูปที่ ข.8 พบว่าระยะเวลาการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันที่นำเสนอสามารถลดอัตราความผิดพลาดต่อบิตลงได้มากในช่วงที่อัตราส่วนระหว่างจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อสล็อตกับจำนวนสัญญาณรบกวนเฉลี่ยต่อสล็อตมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานในการส่งเฉลี่ยซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.5 ส่วนในช่วงที่สูงกว่านั้นอัตราความผิดพลาดต่อบิตจะเพิ่มขึ้นแต่ยังคงต่ำกว่าค่าที่ไม่มีเข้ารหัสซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากตำแหน่งการตัดสินใจในกระบวนการแยกสัญญาณมีค่าไม่เหมาะสม

ภาคผนวก ก

เทคนิคการสร้างการผสมสัญญาณและหลักการคำนวณความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดของข้อมูล

การผสมสัญญาณแบบเชิงแสงแต่ละรูปแบบนั้นมีเทคนิคการสร้างสัญญาณและหลักการคำนวณความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดของข้อมูลที่แตกต่างกันในช่องสัญญาณแบบบีวส์ของ ซึ่งจะนำวิธีการต่างๆ นี้ไปใช้ในการออกแบบการผสมสัญญาณในหัวข้อ 4.3 เพื่อตรวจสอบการทำงานของกระบวนการผสมสัญญาณ แยกตามลักษณะของการผสมสัญญาณได้ดังนี้

ก.1 การผสมสัญญาณแบบ On-off Keying (OOK)

เทคนิคการสร้างการผสมสัญญาณแบบ OOK ที่ทำงานร่วมกับช่องสัญญาณแบบช้อตน้อยยส์นั้นมีการกำเนิดค่าเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์แสง K_s โดยมีลักษณะการกระจายของสัญญาณแบบบีวส์ของ (Poisson Distribution) โดยมีการแทนค่า “1” ด้วยค่า K_s และแทนค่าแทนค่า “0” ด้วยค่า 0 จากนั้นนำสัญญาณที่ทำการผสมสัญญาณแล้วส่งผ่านช่องสัญญาณแบบช้อตน้อยยส์ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ K_b ซึ่งมีลักษณะของการกระจายของแบบบีวส์ของ นำค่าสัญญาณจากภาคส่งมาบวกกับค่าสัญญาณรบกวน

ที่ภาครับจะทำการตัดสินใจโดยการคำนวณค่า Threshold (m_T) แล้วเปรียบเทียบสัญญาณที่รับได้กับค่า Threshold ที่คำนวณได้ ถ้าสัญญาณที่ได้รับมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า Threshold จะตัดสินใจให้เป็นค่า “1” และถ้าค่าที่ได้รับมีค่าน้อยกว่าค่า Threshold จะตัดสินใจให้เป็นค่า “0” ดังแสดงในรูปที่ ก.1

สำหรับหลักการคำนวณหาความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดของข้อมูลนั้นพิจารณาจากการตัดสินใจโดยอาศัยค่า Threshold นั้นช่องสัญญาณรบกวนแบบช้อตน้อยยส์สามารถคำนวณหาของ Threshold ได้จากสมการดังนี้

$$m_T = \frac{K_s}{\log\left(1 + \frac{K_s}{K_b}\right)} \quad (ก.1)$$

โดยที่ค่า m_T เป็นค่าจำนวนนับที่เกิดจากสัญญาณรบกวนแบบช้อตน้อยยส์

การตัดสินใจที่เกิดขึ้นนั้นสามารถก่อให้เกิดความผิดพลาดได้ และเกิดความผิดพลาดเกิดได้ 2 รูปแบบคือ ความผิดพลาดแบบที่หนึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ต้นทางตั้งใจจะส่งค่า “1” ออก จึงได้ให้

กำเนิดสัญญาณ $s_0(t)$ และส่งออก หากแต่ระดับของสัญญาณรบกวนแบบซอดน้อยส์และสัญญาณที่เกิดจากพัลส์แสงมีค่าน้อยมากจนทำให้สัญญาณที่ได้รับมีค่าต่ำกว่าค่า Threshold กรณีเช่นนี้ทำให้วงจรการรับมีการตัดสินใจที่ผิดพลาด สำหรับความผิดพลาดแบบที่สอง ดันทางตั้งใจส่งค่า “0” ออก จึงได้ให้กำเนิดสัญญาณ $s_1(t)$ และส่งออก หากแต่ระดับของสัญญาณรบกวนแบบซอดน้อยส์และสัญญาณที่เกิดจากพัลส์แสงมีค่ามากจนทำให้สัญญาณที่ได้รับมีค่าสูงกว่าค่า Threshold ผลที่เกิดขึ้นคือวงจรการรับมีการตัดสินใจผิดพลาดเช่นกัน

การคำนวณความน่าจะเป็นของความผิดพลาดทั้งสองรูปแบบนั้นอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้

$$\Pr[m = k] = \frac{(K_s + K_b)^k e^{-(K_s + K_b)}}{k!} \quad (\text{ก.2})$$

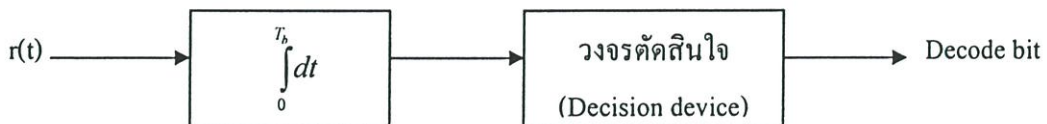
สำหรับกรณีความผิดพลาดแบบที่หนึ่ง ดันทางส่งสัญญาณ $s_0(t)$ ออก เพื่อแทนข้อมูลดิจิทัล 1 เมื่อคำนวณฟังก์ชันความน่าจะเป็นจะได้ดังสมการ

$$P[m > m_T | 0] = \sum_{k=0}^{m_T} \frac{(K_s + K_b)^k e^{-(K_s + K_b)}}{k!} \quad (\text{ก.3})$$

สำหรับกรณีความผิดพลาดแบบที่สอง ดันทางส่งสัญญาณ $s_1(t)$ ออก เพื่อแทนข้อมูลดิจิทัล 0 เมื่อคำนวณฟังก์ชันความน่าจะเป็นจะได้ดังสมการ

$$P[m < m_T | 1] = \sum_{k=m_T}^{\infty} \frac{K_b e^{-K_b}}{k!} \quad (\text{ก.4})$$

สมมติว่าดันทางส่งค่า “0” และ “1” ด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากัน ฉะนั้นถ้าความผิดพลาดทั้งสองแบบมาพิจารณาารวมกันเพื่อหาค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดโดยรวม จะได้ว่ากรณีการผสมสัญญาณแบบ OOK จะมีค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดต่อบิตเท่ากับ



ตัดสินใจเป็นบิต “1” ถ้า $r > m_T$

ตัดสินใจเป็นบิต “0” ถ้า $r < m_T$

รูปที่ ก.1 แผนภาพวงจรการรับแบบ On-Off Keying

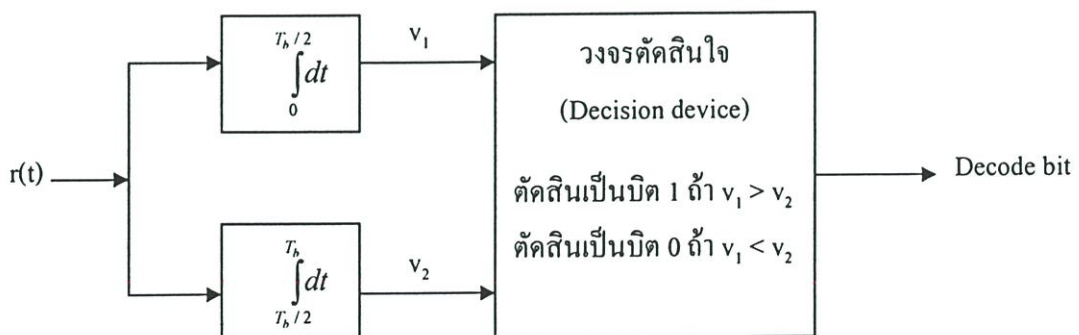
$$PE = \frac{1}{2} P[m > m_T | 0] + \frac{1}{2} P[m < m_T | 1] \quad (ก.5)$$

เมื่อแทนด้วยการกระจายสัญญาณแบบปัวส์ซองจะได้ดังนี้

$$PE = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{m_T} \frac{(K_s + K_b)^k e^{-(K_s + K_b)}}{k!} + \frac{1}{2} \sum_{k=m_T}^{\infty} \frac{K_b^k e^{-K_b}}{k!} \quad (ก.6)$$

ก.2 การผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน (BPPM)

เทคนิคการสร้างการผสมสัญญาณแบบ BPPM ที่ทำงานร่วมกับช่องสัญญาณแบบช้อนน้อยสั่นนั้นต้องมีการกำเนิดค่าเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์แสง K_s โดยมีลักษณะการกระจายของสัญญาณแบบปัวส์ซอง (Poisson Distribution) เช่นเดียวกับการผสมสัญญาณแบบ OOK โดยมีการแทนค่าข้อมูลดิจิทัลที่เกิดขึ้นเป็นจำนวน 2 ค่า คือค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ 0 ถึง $T_b/2$ และค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ $T_b/2$ ถึง T_b ซึ่งมีการแทนค่าของข้อมูลในแต่ละแบบ คือ การแทนค่าข้อมูลดิจิทัล 1 นั้นจะทำการแทนค่าสัญญาณในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ 0 ถึง $T_b/2$ ด้วยค่า K_s โดยให้เป็นสัญญาณที่ 1 และค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ $T_b/2$ ถึง T_b ด้วยค่า 0 โดยให้เป็นสัญญาณที่ 2 ส่วนการแทนค่าข้อมูลดิจิทัล 0 นั้นจะแทนค่าสัญญาณด้วยค่า 0 ในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ 0 ถึง $T_b/2$ โดยให้เป็นสัญญาณที่ 1 และแทนค่าค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ $T_b/2$ ถึง T_b ด้วยค่า K_s โดยให้เป็นสัญญาณที่ 2 จากนั้นนำสัญญาณที่ทำการผสมสัญญาณแล้วส่งผ่านช่องสัญญาณแบบช้อนน้อยสั่นที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ K_s ซึ่งมีลักษณะของการกระจายของแบบปัวส์ซอง นำค่าสัญญาณจากภาคส่งในแต่ละครั้งคาบเวลามาวกกับค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้งคาบเวลา



รูปที่ ก.2 แผนภาพวงจรภาครับแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

ที่ภาครับจะทำการตัดสินใจโดยการเปรียบเทียบสัญญาณที่รับได้ในแต่ละครั้งคาบเวลา ถ้าสัญญาณที่ 1 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงคาบเวลาดังแต่ 0 ถึง $T_b/2$ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสัญญาณที่ 2 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงในช่วงคาบเวลาดังแต่ $T_b/2$ ถึง T_b จะตัดสินใจให้เป็นค่าดิจิทัล 1 และถ้าสัญญาณที่ 1 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงคาบเวลาดังแต่ 0 ถึง $T_b/2$ มีค่าน้อยกว่าสัญญาณที่ 2 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงในช่วงคาบเวลาดังแต่ $T_b/2$ ถึง T_b จะตัดสินใจให้เป็นค่าดิจิทัล 0 ดังแสดงในรูป ค.2

สำหรับหลักการคำนวณหาความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดของข้อมูลนั้น พิจารณาจากการตัดสินใจที่ใช้การเปรียบเทียบกับกระหว่างสัญญาณสองสัญญาณที่เกิดจากวงจรอินทิเกรตนั้นสามารถก่อให้เกิดความผิดพลาดได้ และเกิดความผิดพลาดเกิดได้ทั้งหมด 3 รูปแบบคือ ความผิดพลาดแบบที่หนึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ต้นทางตั้งใจจะส่งข้อมูลเท่ากับ “1” ออก จึงได้ให้กำเนิดสัญญาณ $s_0(t)$ และส่งออก หากแต่ระดับของสัญญาณรบกวนแบบซ้อตน้อยส์และสัญญาณที่เกิดจากพัลส์แสงในช่วงคาบเวลา 0 ถึง $T_b/2$ มีค่าน้อยจนทำให้สัญญาณที่รับได้มีค่าต่ำกว่าค่าที่เกิดจากสัญญาณรบกวนแบบซ้อตน้อยส์เพียงอย่างเดียวในช่วงคาบเวลา $T_b/2$ ถึง T_b กรณีเช่นนี้ทำให้วงจรภาครับมีการตัดสินใจที่ผิดพลาด สำหรับความผิดพลาดแบบที่สอง ต้นทางตั้งใจส่งข้อมูลเท่ากับ “0” ออก จึงได้ให้กำเนิดสัญญาณ $s_1(t)$ และส่งออก หากแต่ระดับของสัญญาณรบกวนแบบซ้อตน้อยส์เพียงอย่างเดียวในช่วงคาบเวลา 0 ถึง $T_b/2$ มีค่ามากจนทำให้สัญญาณที่รับได้มีค่าสูงกว่าค่าที่เกิดจากสัญญาณรบกวนแบบซ้อตน้อยส์และสัญญาณที่เกิดจากพัลส์แสงในช่วงคาบเวลา $T_b/2$ ถึง T_b กรณีเช่นนี้ทำให้วงจรภาครับมีการตัดสินใจที่ผิดพลาดเช่นกัน

จากความผิดพลาดทั้งสองรูปแบบสามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นรวมกันเป็นดังสมการ

$$\Pr[k_1 < k_2] = \sum_{k_1=0}^{\infty} \sum_{k_2=k_1+1}^{\infty} \text{Pos}(k_1, K_s + K_b) \text{Pos}(k_2, K_b) \quad (\text{ค.7})$$

$$\text{โดยที่ } \text{Pos}(k, m) = \frac{m^k e^{-m}}{k!}, \quad m = K_s + K_b \text{ หรือ } m = K_b$$

ส่วนความผิดพลาดแบบที่สาม เป็นค่าความผิดพลาดที่เกิดจากค่าระดับของสัญญาณรบกวนแบบซ้อตน้อยส์และสัญญาณที่เกิดจากพัลส์แสงในแต่ละครั้งคาบเวลานั้นมีค่าเท่ากับค่าที่เกิดจากสัญญาณรบกวนแบบซ้อตน้อยส์เพียงอย่างเดียว ซึ่งมีการคำนวณความน่าจะเป็นของความผิดพลาดได้จากสมการ

$$\Pr[k_1] = \frac{1}{2} \sum_{k_1=0}^{\infty} \text{Pos}(k_1, K_s + K_b) \text{Pos}(k_1, K_b) \quad (\text{ค.8})$$

เมื่อนำค่าความผิดพลาดทั้งหมดมารวมกัน และสมมติว่าต้นทุนทางส่งค่า “0 และ “1 ด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากัน จะพบว่ากรณีการผสมสัญญาณแบบ BPPM จะมีค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดต่อบิตเท่ากับ

$$PE = \sum_{k_1=0}^{\infty} \sum_{k_2=k_1+1}^{\infty} Pos(k_1, K_s + K_b) Pos(k_2, K_b) + \frac{1}{2} \sum_{k_1=0}^{\infty} Pos(k_1, K_s + K_b) Pos(k_1, K_b) \quad (ก.9)$$

ก.3 การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน (PPM)

เทคนิคการสร้างการผสมสัญญาณแบบ PPM ที่ทำงานร่วมกับช่องสัญญาณแบบช็อคน้อยซ์นั้นต้องมีการกำเนิดค่าเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์แสง K_s โดยมีลักษณะการกระจายของสัญญาณแบบปัวซอง (Poisson Distribution) เช่นเดียวกับการผสมสัญญาณแบบ BPPM โดยมีการแทนค่าข้อมูลแบบสัญลักษณ์ที่เกิดขึ้นเป็นจำนวน M ค่า คือค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา

การแทนค่าข้อมูลจะทำการแทนค่าสัญลักษณ์ในตำแหน่งต่างๆ ของสล็อตโดยแทนค่าของสัญลักษณ์ที่มีค่า 0 ถึง $M-1$ ในตำแหน่งสล็อตที่ 1 ไปจนถึงสล็อตที่ M ตามลำดับ ซึ่งในตำแหน่งสล็อตที่แทนนั้นจะแทนด้วยค่า K_s ส่วนในสล็อตอื่นๆ จะมีค่าเป็น 0 ดังนี้

$$\begin{aligned} s_0 &= (K_s, 0, \dots, \dots, 0) \\ s_1 &= (0, K_s, \dots, \dots, 0) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ s_{M-2} &= (0, \dots, \dots, K_s, 0) \\ s_{M-1} &= (0, \dots, \dots, 0, K_s) \end{aligned} \quad (ก.10)$$

ตัวอย่างของการแทนสัญญาณที่มีค่า $k = 2$ จะได้สัญญาณจำนวน 4 รูปแบบแทนค่าสัญลักษณ์ 00, 01, 10 และ 11 ตามลำดับ

$$\begin{aligned} s_0 &= (K_s, 0, 0, 0) \\ s_1 &= (0, K_s, 0, 0) \\ s_2 &= (0, 0, K_s, 0) \\ s_3 &= (0, 0, 0, K_s) \end{aligned} \quad (ก.11)$$

นำสัญญาณที่ทำการผสมสัญญาณแล้วส่งผ่านช่องสัญญาณแบบช็อคน้อยซ์ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ K_s ซึ่งมีลักษณะของการกระจายของแบบปัวซอง นำค่าสัญญาณจากภาคส่งในแต่ละคาบเวลามาวกกับค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในแต่ละคาบเวลา

ที่ภาครับจะทำการตัดสินใจโดยการเปรียบเทียบสัญญาณที่รับได้ในแต่ละคาบเวลา โดยเลือกสัญญาณในสล็อตที่มีค่าสูงที่สุด แปลงออกมาเป็นค่าแบบสัญลักษณ์ ตัวอย่างการตัดสินใจของสัญญาณ 4 รูปแบบที่เกิดจากการส่งบิตข้อมูลจำนวน 2 บิตต่อสัญลักษณ์ ถ้าสัญญาณที่ 1 มีค่าสูงที่สุดจะตัดสินใจเป็นสัญลักษณ์ 00 ถ้าสัญญาณที่ 2 มีค่าสูงที่สุดจะตัดสินใจเป็นสัญลักษณ์ 01 ถ้าสัญญาณที่ 3 มีค่าสูงที่สุดจะตัดสินใจเป็นสัญลักษณ์ 10 ถ้าสัญญาณที่ 4 มีค่าสูงที่สุดจะตัดสินใจเป็นสัญลักษณ์ 11 ดังแสดงในรูปที่ ก.3

สำหรับหลักการคำนวณหาความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดของข้อมูลนั้น พิจารณาจากการตัดสินใจที่ใช้การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณจำนวน M สัญญาณที่เกิดจากวงจรอินทิเกรตนั้นสามารถก่อให้เกิดความผิดพลาดได้ แต่ไม่สามารถคำนวณหาความผิดพลาดได้โดยตรงจึงต้องคำนวณหาความน่าจะเป็นของการตัดสินใจที่ถูกต้องซึ่งมีทั้งหมด 3 รูปแบบคือการตัดสินใจถูกต้องรูปแบบแรกเกิดจากการที่ทุกสล็อตมีค่าสัญญาณเป็น 0 คือ ไม่มีทั้งสัญญาณเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์และสัญญาณรบกวนแบบซอคน้อยส์ สามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นของความถูกต้องที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ

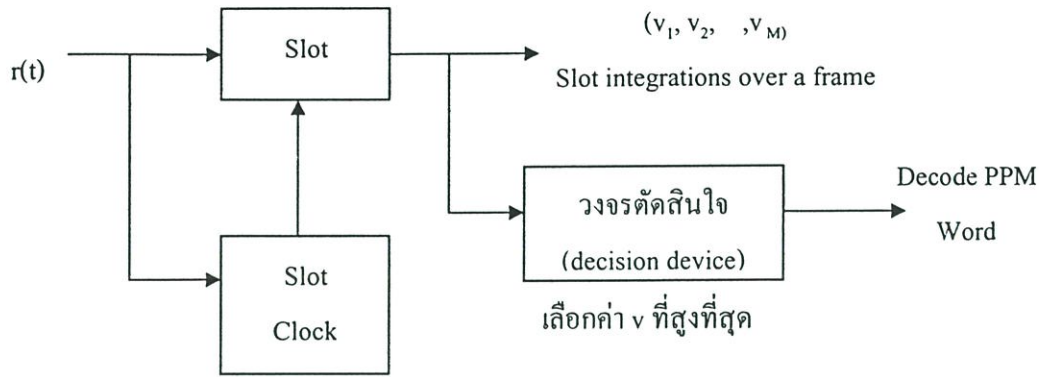
$$\Pr[m = 0] = \frac{\exp[-(K_s + MK_b)]}{M} \quad (\text{ก.12})$$

การตัดสินใจที่ถูกต้องแบบที่สองคือความน่าจะเป็นที่จะมีสัญญาณเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์และสัญญาณรบกวนแบบซอคน้อยส์เกิดขึ้นในสล็อตมีค่าสูงกว่าความน่าจะเป็นที่จะมีสัญญาณรบกวนแบบซอคน้อยส์เกิดขึ้นในสล็อตอื่นๆ สามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นของความถูกต้องที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ

$$\Pr[k_1 > k_2] = \sum_{k_1=1}^{\infty} \text{Pos}(k_1, K_s + K_b) \left[\sum_{k_2=0}^{k_1-1} \text{Pos}(k_2, K_b) \right]^{M-1} \quad (\text{ก.13})$$

การตัดสินใจที่ถูกต้องแบบที่สามคือความน่าจะเป็นที่จะมีสัญญาณเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์และสัญญาณรบกวนแบบซอคน้อยส์เกิดขึ้นในสล็อตมีค่าเท่ากับความน่าจะเป็นที่จะมีสัญญาณรบกวนแบบซอคน้อยส์เกิดขึ้นในสล็อตอื่นจำนวน r สล็อตจากทั้งหมด $M-1$ สล็อต และมีสัญญาณรบกวนแบบซอคน้อยส์เกิดขึ้นน้อยกว่าสองสัญญาณแรกในสล็อตที่เหลือ สามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นของความถูกต้องที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ

$$\Pr[k > j] = \sum_{r=1}^{M-1} \frac{(M-1)!}{r!(M-1-r)!(r+1)!} \sum_{k=1}^{\infty} \text{Pos}(k, K_s + K_b) [\text{Pos}(k, K_b)]^r \left[\sum_{j=0}^{k-1} \text{Pos}(j, K_b) \right]^{M-1-r} \quad (\text{ก.14})$$



รูปที่ ก.3 แผนภาพวงจรถอดรหัสแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

เมื่อคำนวณค่าความถูกต้องได้ครบทั้ง 3 รูปแบบสามารถหาค่าอัตราความน่าจะเป็นของความผิดพลาดต่อสัญลักษณ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$PWE = 1 - \frac{\exp[-(K_s + MK_b)]}{M} - \sum_{k_1=1}^{\infty} Pos(k_1, K_s + K_b) \left[\sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_2, K_s + K_b) \right]^{M-1} - \sum_{r=1}^{M-1} \frac{(M-1)!}{r!(M-1-r)!(r+1)} \sum_{k=1}^{\infty} Pos(k, K_s + K_b) [Pos(k, K_b)]^r \left[\sum_{j=0}^{k-1} Pos(j, K_b) \right]^{M-1-r} \quad (ก.15)$$

ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดของข้อมูลต่อบิตมีค่าเท่ากับ

$$PE = \frac{M}{M-1} PWE \quad (ก.16)$$

ก.4 การผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation (MPPM)

เทคนิคการสร้างการผสมสัญญาณแบบ MPPM ที่ทำงานร่วมกับช่องสัญญาณแบบช้อนน้อยสั้นนั้นต้องมีการกำเนิดค่าเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์แสง K_s โดยมีลักษณะการกระจายของสัญญาณแบบปัวส์ซอง (Poisson Distribution) เช่นเดียวกับการผสมสัญญาณแบบ PPM โดยมีการแทนค่าข้อมูลแบบสัญลักษณ์ที่เกิดขึ้นเป็นจำนวน M ค่า คือค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลา

การแทนค่าข้อมูลจะทำการแทนค่าสัญลักษณ์ในตำแหน่งต่างๆ ของสล็อตโดยแทนในตำแหน่งต่างๆ ที่กำหนดขึ้นจำนวน k สล็อตต่อหนึ่งคาบเวลา ตัวอย่างของการแทนสัญญาณที่มีค่า $N = 2$ และ $k = 2$ จะได้สัญญาณจำนวน 6 รูปแบบแทนค่าสัญลักษณ์ 000, 001, 010, 011, 100 และ 101 ตามลำดับ

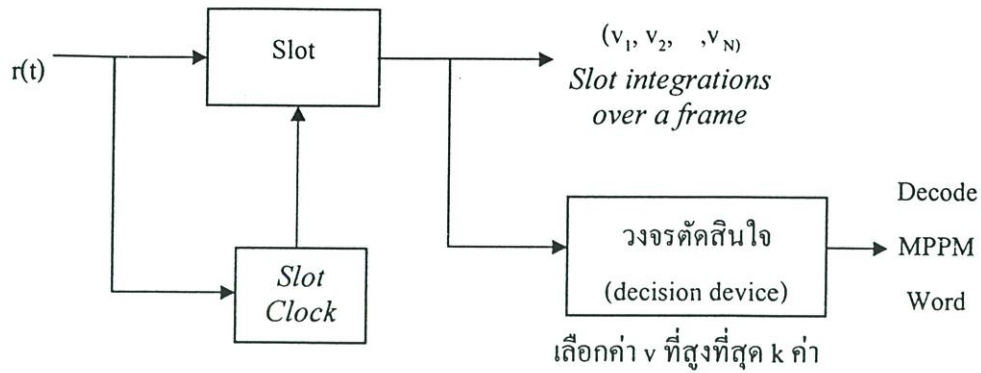
$$\begin{aligned}
s_0 &= (K_s, K_s, 0, 0) \\
s_1 &= (K_s, 0, K_s, 0) \\
s_2 &= (K_s, 0, 0, K_s) \\
s_3 &= (0, K_s, K_s, 0) \\
s_4 &= (0, K_s, 0, K_s) \\
s_5 &= (0, 0, K_s, K_s)
\end{aligned} \tag{ก.17}$$

นำสัญญาณที่ทำการผสมสัญญาณแล้วส่งผ่านช่องสัญญาณแบบช้อนน้อยสล็อตที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ K_s ซึ่งมีลักษณะของการกระจายของแบบปัวส์ซอง นำค่าสัญญาณจากภาคส่งในแต่ละคาบเวลามาวกกับค่าสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในแต่ละคาบเวลา

ที่ภาครับจะทำการตัดสินใจโดยการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้รับได้ในแต่ละคาบเวลา โดยเลือกสัญญาณในสล็อตที่มีค่าสูงที่สุดจำนวน k สล็อต แปลงออกมาเป็นค่าแบบสัญลักษณ์ ตัวอย่างการตัดสินใจของสัญญาณ 6 รูปแบบที่เกิดจากการส่งบิตข้อมูลจำนวน 3 บิตต่อสัญลักษณ์ที่มีการผสมสัญญาณแบบ (4,2)MPPM เพื่อไม่ให้เกิดความยุ่งยากในการตัดสินใจจึงนำค่าของสัญญาณแต่ละตำแหน่งมาบวกกันตามรูปแบบที่กำหนดในการผสมสัญญาณทั้ง 6 แบบ จากนั้นจึงทำการตัดสินใจโดยวิธีดังนี้ ถ้าสัญญาณที่ 1 และสัญญาณที่ 2 รวมกันแล้วมีค่าสูงที่สุดจะตัดสินใจเป็นสัญลักษณ์ 000 ถ้าสัญญาณที่ 1 และสัญญาณที่ 3 รวมกันแล้วมีค่าสูงที่สุดจะตัดสินใจเป็นสัญลักษณ์ 001 ถ้าสัญญาณที่ 1 และสัญญาณที่ 4 รวมกันแล้วมีค่าสูงที่สุดจะตัดสินใจเป็นสัญลักษณ์ 010 ถ้าสัญญาณที่ 2 และสัญญาณที่ 3 รวมกันแล้วมีค่าสูงที่สุดจะตัดสินใจเป็นสัญลักษณ์ 011 ถ้าสัญญาณที่ 2 และสัญญาณที่ 4 รวมกันแล้วมีค่าสูงที่สุดจะตัดสินใจเป็นสัญลักษณ์ 100 ถ้าสัญญาณที่ 3 และสัญญาณที่ 4 รวมกันแล้วมีค่าสูงที่สุดจะตัดสินใจเป็นสัญลักษณ์ 101 ดังแสดงในรูปที่ ก.4

สำหรับหลักการคำนวณหาความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดของข้อมูลนั้น พิจารณาจากการตัดสินใจที่ใช้การเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณจำนวน M สัญญาณที่เกิดจากวงจรอินทิเกรตนั้นสามารถก่อให้เกิดความผิดพลาดได้ แต่ไม่สามารถคำนวณหาความผิดพลาดได้โดยตรงจึงต้องอาศัยการคำนวณหาความน่าจะเป็นของการตัดสินใจที่ถูกต้องซึ่งขึ้นอยู่กับจำนวนพัลส์ต่อบล็อกสัญญาณที่กำหนดขึ้น สำหรับตัวอย่างของการคำนวณความผิดพลาดความน่าจะเป็นของการผสมสัญญาณแบบ (N,2)MPPM นั้นมีทั้งหมด 6 รูปแบบคือการตัดสินใจถูกต้องรูปแบบแรกเกิดจากการที่มีสัญญาณเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์และสัญญาณรบกวนแบบช้อนน้อยสล็อตเกิดขึ้นมีค่าสูงที่สุดจำนวน 2 สล็อตสามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นของความถูกต้องที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ

$$\Pr[j < \min(k_1, k_2)] = \sum_{k_1=1}^{\infty} \text{Pos}(k_1, K_s + K_b) \sum_{k_2=1}^{\infty} \text{Pos}(k_2, K_s + K_b) \left[\sum_{j=0}^{k_{\min}-1} \text{Pos}(j, K_b) \right]^{N-2} \tag{ก.18}$$



รูปที่ ๓.๔ แผนภาพวงจรถัดสินใจแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation

การตัดสินใจที่ถูกต้องแบบที่สองคือความน่าจะเป็นที่จะมีสัญญาณเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์และสัญญาณรบกวนแบบซัดน้อยส์เกิดขึ้นมีค่าสูงที่สุดจำนวน 2 สล็อตและยังมีสัญญาณรบกวนแบบซัดน้อยส์เกิดขึ้นในสล็อตอื่นที่มีค่าเท่ากับค่าต่ำสุดของสองสล็อตแรกจำนวน 1 สล็อตจากทั้งหมด $N-2$ สล็อตซึ่งมีค่าสูงกว่าความน่าจะเป็นที่จะมีสัญญาณรบกวนแบบซัดน้อยส์เกิดขึ้นในสล็อตอื่นๆ สามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นของความถูกต้องที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ

$$\Pr[j < \min(k_1, k_2) | k_1 \neq k_2] = \sum_{l=1}^{N-2} \frac{(N-2)}{l!(N-2-l)!(l+1)} \sum_{k_1=1}^{\infty} \text{Pos}(k_1, K_s + K_b) \times \sum_{\substack{k_2=1 \\ k_2 \neq k_1}}^{\infty} \text{Pos}(k_2, K_s + K_b) \text{Pos}(k_{\min}, K_b) \left[\sum_{j=0}^{k_{\min}-1} \text{Pos}(j, K_b) \right]^{N-2-l} \quad (\text{ก.19})$$

การตัดสินใจที่ถูกต้องแบบที่สามคือความน่าจะเป็นที่จะมีสัญญาณเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์และสัญญาณรบกวนแบบซัดน้อยส์เกิดขึ้นมีค่าสูงที่สุดที่เท่ากันจำนวน 2 สล็อตและยังมีสัญญาณรบกวนแบบซัดน้อยส์เกิดขึ้นในสล็อตอื่นที่มีค่าเท่ากับค่าสูงที่สุดจำนวน 1 สล็อตจากทั้งหมด $N-2$ สล็อตซึ่งมีค่าสูงกว่าความน่าจะเป็นที่จะมีสัญญาณรบกวนแบบซัดน้อยส์เกิดขึ้นในสล็อตอื่นๆ สามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นของความถูกต้องที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ

$$\Pr[j < \min(k_1, k_2) | k_1 = k_2] = \sum_{l=1}^{N-2} \frac{2(N-2)}{l!(N-2-l)!(l+1)(l+2)} \sum_{k_1=1}^{\infty} [\text{Pos}(k_1, K_s + K_b)]^2 \text{Pos}(k_{\min}, K_b) \times \left[\sum_{j=0}^{k_{\min}-1} \text{Pos}(j, K_b) \right]^{N-2-l} \quad (\text{ก.20})$$

การตัดสินใจที่ถูกต้องแบบที่สี่คือความน่าจะเป็นที่จะมีสัญญาณเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์และสัญญาณรบกวนแบบซัดน้อยส์เกิดขึ้นในสล็อตแรกเท่านั้น ส่วนสล็อตอื่นๆ มีค่าสัญญาณเป็น 0

คือไม่มีทั้งสัญญาณเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์และสัญญาณรบกวนแบบซัดน้อยส์ สามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นของความถูกต้องที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ

$$\Pr[(n-1) = 0] = \frac{\exp[-(K_s + (N-1)K_b)] - \exp[-(2K_s + NK_b)]}{N-1} \quad (\text{ค.21})$$

การตัดสินใจที่ถูกต้องแบบที่ห้าคือความน่าจะเป็นที่จะมีสัญญาณเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์และสัญญาณรบกวนแบบซัดน้อยส์เกิดขึ้นในสล็อตที่สองเท่านั้น ส่วนสล็อตอื่นๆ มีค่าสัญญาณเป็น 0 คือไม่มีทั้งสัญญาณเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์และสัญญาณรบกวนแบบซัดน้อยส์ ซึ่งมีสมการความน่าจะเป็นของความถูกต้องที่เกิดขึ้นเหมือนกับการตัดสินใจถูกต้องแบบที่สี่

การตัดสินใจที่ถูกต้องแบบที่หกคือความน่าจะเป็นที่ทุกสล็อตมีค่าสัญญาณเป็น 0 คือไม่มีทั้งสัญญาณเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์และสัญญาณรบกวนแบบซัดน้อยส์ สามารถคำนวณหาความน่าจะเป็นของความถูกต้องที่เกิดขึ้นเป็นดังสมการ

$$\Pr[n = 0] = \frac{2 \times (\exp[-(2K_s + NK_b)])}{N(N-1)} \quad (\text{ค.22})$$

เมื่อกำหนดค่าความถูกต้องได้ครบทั้ง 6 รูปแบบสามารถหาค่าอัตราความน่าจะเป็นของความผิดพลาดต่อสัญลักษณ์ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\begin{aligned} PWE = & 1 - \frac{\exp[-(K_s + (N-1)K_b)]}{N-1} + \frac{2 \exp[-(2K_s + NK_b)]}{N} - 2 \sum_{k_1=2}^{\infty} Pos(k_1, K_s + K_b) \\ & \times \sum_{k_2=1}^{k_1-1} Pos(k_2, K_s + K_b) \sum_{l=0}^{N-2} \frac{(N-2)!}{l!(N-2-l)!(l+1)} [Pos(k_2, K_b)]^l \left[\sum_{j=0}^{k_2-1} Pos(j, K_b) \right]^{N-2-l} \\ & - \sum_{k=1}^{\infty} [Pos(k, K_s + K_b)]^2 \sum_{l=0}^{N-2} \frac{2 \times (N-2)!}{l!(N-2-l)!(l+1)(l+2)} [Pos(k, K_b)]^l \left[\sum_{j=0}^{k-1} Pos(j, K_b) \right]^{N-2-l} \quad (\text{ค.23}) \end{aligned}$$

ค.5 การสื่อสารแบบโพตอนสี่ระดับ

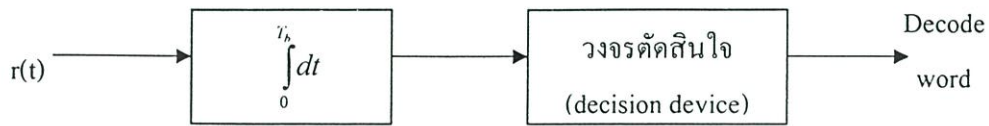
เทคนิคการสร้างการผสมสัญญาณแบบโพตอนที่มีหลายระดับ (α_i) ที่ทำงานร่วมกับช่องสัญญาณแบบซัดน้อยส์นั้นต้องมีการกำหนดค่าเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์แสง α_i ในหลายระดับสัญญาณ โดยมีลักษณะการกระจายของสัญญาณแบบปัวส์ซอง (Poisson Distribution) โดยสามารถแทนค่าสัญลักษณ์ 00 ด้วยค่า α_0 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0 ค่าสัญลักษณ์ 01 ด้วยค่า α_1 ซึ่งมีค่าประมาณ 1 ค่าสัญลักษณ์ 10 ด้วยค่า α_2 ซึ่งมีค่าประมาณ 4 ค่าสัญลักษณ์ 11 ด้วยค่า α_3 ซึ่งมีค่าประมาณ 9 จากนั้น

นำสัญญาณที่ทำการผสมสัญญาณแล้วส่งผ่านช่องสัญญาณแบบช็อคน้อยสที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ K_b ซึ่งมีลักษณะของการกระจายของแบบปัวส์ซอง นำค่าสัญญาณจากภาคส่งมาบวกกับค่าสัญญาณรบกวน

ที่ภาครับจะทำการตัดสินใจโดยการคำนวณหาค่าการตัดสินใจแบบประมาณค่าซึ่งจะมีทั้งหมดจำนวน 3 ค่าที่เหมาะสมกับแต่ละช่วงของสัญญาณ โดยที่ m_{T1} มีค่าเท่ากับ m_T แล้ว m_{T2} มีค่าเป็นสี่เท่าของ m_T และ m_{T3} มีค่าเป็นเก้าเท่าของ m_T แล้วเปรียบเทียบสัญญาณที่รับได้กับค่า Threshold ที่คำนวณได้ ถ้าสัญญาณที่ได้รับมีค่าน้อยกว่าค่าการตัดสินใจตัวแรก (m_{T1}) จะตัดสินใจให้เป็นค่าสัญญาณ 00 ถ้าค่าที่ได้รับมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าการตัดสินใจตัวแรกแต่น้อยกว่าค่าการตัดสินใจตัวที่สอง (m_{T2}) จะตัดสินใจให้เป็นค่าสัญญาณ 01 ถ้าค่าที่ได้รับมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าการตัดสินใจที่สองแต่น้อยกว่าค่าการตัดสินใจตัวที่สาม (m_{T3}) จะตัดสินใจให้เป็นค่าสัญญาณ 10 และถ้าค่าที่ได้รับมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าการตัดสินใจตัวที่สาม (m_{T3}) จะตัดสินใจให้เป็นค่าสัญญาณ 11 ดังรูปที่ ก.5

สำหรับหลักการคำนวณหาความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดของข้อมูลนั้น พิจารณาจากการตัดสินใจโดยอาศัยค่าการตัดสินใจซึ่งแสดงดังหลักการคำนวณในภาคผนวก ก การตัดสินใจที่เกิดขึ้นนั้นสามารถก่อให้เกิดความผิดพลาดได้ แต่ไม่สามารถคำนวณหาความผิดพลาดได้โดยตรงจึงต้องคำนวณหาความน่าจะเป็นของการตัดสินใจที่ถูกต้องซึ่งมีทั้งหมด 4 รูปแบบคือ การตัดสินใจถูกต้องรูปแบบที่หนึ่งเกิดขึ้นในกรณีที่ต้นทางส่งข้อมูลสัญญาณเท่ากับ 00 ออก จึงได้ให้กำเนิดสัญญาณ $s_0(t)$ และส่งออก โดยที่ระดับของสัญญาณรบกวนแบบช็อคน้อยสและสัญญาณที่เกิดจากพัลส์แสงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าค่า Threshold ตัวแรก กรณีเช่นนี้ทำให้วงจรภาครับมีการตัดสินใจที่ถูกต้อง การตัดสินใจถูกต้องรูปแบบที่สองเกิดขึ้นในกรณีที่ต้นทางส่งข้อมูลสัญญาณเท่ากับ 01 ออก จึงได้ให้กำเนิดสัญญาณ $s_1(t)$ และส่งออก โดยที่ระดับของสัญญาณรบกวนแบบช็อคน้อยสและสัญญาณที่เกิดจากพัลส์แสงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าค่าการตัดสินใจตัวแรกแต่น้อยกว่าค่าการตัดสินใจตัวที่สองกรณีเช่นนี้ทำให้วงจรภาครับมีการตัดสินใจที่ถูกต้อง การตัดสินใจถูกต้องรูปแบบที่สามเกิดขึ้นในกรณีที่ต้นทางส่งข้อมูลสัญญาณเท่ากับ 10 ออก จึงได้ให้กำเนิดสัญญาณ $s_2(t)$ และส่งออก โดยที่ระดับของสัญญาณรบกวนแบบช็อคน้อยสและสัญญาณที่เกิดจากพัลส์แสงที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่าค่าการตัดสินใจตัวที่สองแต่น้อยกว่าค่าการตัดสินใจตัวที่สาม กรณีเช่นนี้ทำให้วงจรภาครับมีการตัดสินใจที่ถูกต้อง การตัดสินใจถูกต้องรูปแบบที่สี่เกิดขึ้นในกรณีที่ต้นทางส่งข้อมูลสัญญาณเท่ากับ 11 ออก จึงได้ให้กำเนิดสัญญาณ $s_3(t)$ และส่งออก หากแต่ระดับของสัญญาณรบกวนแบบช็อคน้อยสและสัญญาณที่เกิดจากพัลส์แสงที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าค่าการตัดสินใจตัวสาม กรณีเช่นนี้ทำให้วงจรภาครับมีการตัดสินใจที่ถูกต้องเช่นเดียวกับกรณีการตัดสินใจแบบอื่นๆ

ในการคำนวณความน่าจะเป็นของความถูกต้องทั้งสี่รูปแบบนั้นจะอาศัยความสัมพันธ์ดังนี้



ตัดสินใจเป็นสัญลักษณ์ 00 ถ้า $r < m_{T1}$

ตัดสินใจเป็นสัญลักษณ์ 01 ถ้า $m_{T1} < r < m_{T2}$

ตัดสินใจเป็นสัญลักษณ์ 10 ถ้า $m_{T2} < r < 9 m_{T3}$

ตัดสินใจเป็นสัญลักษณ์ 11 ถ้า $r > 9 m_{T3}$

รูปที่ ค.5 แผนภาพวงจรภาครับแบบการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ

$$\Pr[m = k] = \frac{(K_s + K_b)^k e^{-(K_s + K_b)}}{k!} \quad (\text{ค.24})$$

สำหรับกรณีความถูกต้องแบบที่หนึ่ง ต้นทางส่งสัญญาณ $s_0(t)$ ออก เพื่อแทนข้อมูลสัญลักษณ์ 00 เมื่อคำนวณฟังก์ชันความน่าจะเป็นจะได้ดังสมการ

$$P[m < m_{T1} | 00] = \sum_{k=0}^{m_{T1}} \frac{K_b e^{-K_b}}{k!} \quad (\text{ค.25})$$

สำหรับกรณีความถูกต้องแบบที่สอง ต้นทางส่งสัญญาณ $s_1(t)$ ออก เพื่อแทนข้อมูลสัญลักษณ์ 01 เมื่อคำนวณฟังก์ชันความน่าจะเป็นจะได้ดังสมการ

$$P[m_{T1} > m > m_{T2} | 01] = \sum_{k=m_{T1}}^{m_{T2}} \frac{(K_s + K_b) e^{-(K_s + K_b)}}{k!} \quad (\text{ค.26})$$

สำหรับกรณีความถูกต้องแบบที่สาม ต้นทางส่งสัญญาณ $s_2(t)$ ออก เพื่อแทนข้อมูลสัญลักษณ์ 10 เมื่อคำนวณฟังก์ชันความน่าจะเป็นจะได้ดังสมการ

$$P[m_{T2} > m > m_{T3} | 10] = \sum_{k=m_{T2}}^{m_{T3}} \frac{(4K_s + K_b) e^{-(4K_s + K_b)}}{k!} \quad (\text{ค.27})$$

สำหรับกรณีความถูกต้องแบบที่สี่ ต้นทางส่งสัญญาณ $s_3(t)$ ออก เพื่อแทนข้อมูลสัญลักษณ์ 11 เมื่อคำนวณฟังก์ชันความน่าจะเป็นจะได้ดังสมการ

$$P[m < m_{T_3}|11] = \sum_{k=m_{T_3}}^{\infty} \frac{(9K_s + K_b)e^{-(9K_s+K_b)}}{k!} \quad (\text{ก.28})$$

สมมติว่าคันทางส่งข้อมูลสัญลักษณ์ 00, 01, 10 และ 11 ด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากัน ฉะนั้น ถ้าความถูกต้องทั้งสี่แบบมาพิจารณารวมกันเพื่อหาค่าเฉลี่ยของความถูกต้องโดยรวม จากนั้น สามารถนำไปหาความน่าจะเป็นของความผิดพลาด จะได้ว่ากรณีการผสมสัญญาณแบบโพตอนี่ระดับ จะมีค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดต่อสัญลักษณ์เท่ากับ

$$\begin{aligned} PWE = 1 - \frac{1}{4}P[m > m_{T_1}|00] - \frac{1}{4}P[m_{T_1} < m < m_{T_2}|01] - \frac{1}{4}P[m_{T_2} < m < m_{T_3}|10] \\ - \frac{1}{4}P[m < m_{T_3}|11] \end{aligned} \quad (\text{ก.29})$$

เมื่อแทนด้วยการกระจายสัญญาณแบบปัวส์ซองแล้ว สามารถนำไปหาค่าอัตราความน่าจะเป็นของความผิดพลาดต่อสัญลักษณ์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} PWE = 1 - \frac{1}{4} \sum_{k=0}^{m_{T_1}} \frac{K_b^k e^{-K_b}}{k!} - \frac{1}{4} \sum_{k=m_{T_1}}^{m_{T_2}} \frac{(K_s + K_b)^k e^{-(K_s+K_b)}}{k!} - \frac{1}{4} \sum_{k=m_{T_2}}^{m_{T_3}} \frac{(4K_s + K_b)^k e^{-(4K_s+K_b)}}{k!} \\ - \frac{1}{4} \sum_{k=m_{T_3}}^{\infty} \frac{(9K_s + K_b)^k e^{-(9K_s+K_b)}}{k!} \end{aligned} \quad (\text{ก.30})$$

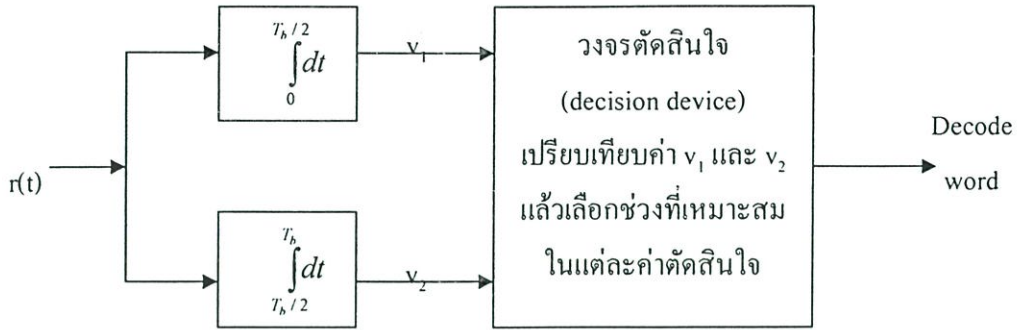
ก.6 การสื่อสารแบบโพตอนี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

เทคนิคการสร้างการผสมสัญญาณแบบโพตอนี่ระดับที่มีหลายระดับ (α_i) ที่ประยุกต์ใช้งานกับการผสมสัญญาณแบบ BPPM ที่ทำงานในช่องสัญญาณแบบช็อดน้อยสั้นนั้นต้องมีการกำหนดค่าเฉลี่ยที่เกิดจากพัลส์แสง α_i ในหลายระดับสัญญาณโดยมีลักษณะการกระจายของสัญญาณแบบปัวส์ซอง (Poisson Distribution) ในที่นี้ให้มีการกำหนดค่าเฉลี่ยของพัลส์เป็นสามระดับคือ $\alpha_0 = 1$, $\alpha_1 = 4$ และ $\alpha_2 = 9$ สามารถแทนค่าสัญลักษณ์ต่างๆ ดังนี้ ค่าสัญลักษณ์ 000 จะทำการแทนค่าสัญญาณในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ 0 ถึง $T_u/2$ ด้วยค่า α_0 ซึ่งมีค่าประมาณ 1 โดยให้เป็นสัญญาณที่ 1 และค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ $T_u/2$ ถึง T_u ด้วยค่า 0 โดยให้เป็นสัญญาณที่ 2 ค่าสัญลักษณ์ 001 จะแทนค่าสัญญาณด้วยค่า α_1 ซึ่งมีค่าประมาณ 4 ในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ 0 ถึง $T_u/2$ โดยให้เป็นสัญญาณที่ 1 และแทนค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ $T_u/2$ ถึง T_u ด้วยค่า 0 โดยให้เป็นสัญญาณที่ 2 ค่าสัญลักษณ์ 010 จะทำการแทนค่าสัญญาณในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ 0 ถึง $T_u/2$ ด้วยค่า α_2 ซึ่งมีค่าประมาณ 9 โดยให้เป็นสัญญาณที่ 1 และค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงคาบเวลา

ตั้งแต่ $T_0/2$ ถึง T_0 ด้วยค่า 0 โดยให้เป็นสัญญาณที่ 2 ค่าสัญลักษณ์ 011 จะแทนค่าสัญญาณด้วยค่า 0 ในช่วงคาบเวลาดังแต่ 0 ถึง $T_0/2$ โดยให้เป็นสัญญาณที่ 1 และแทนค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงคาบเวลาดังแต่ $T_0/2$ ถึง T_0 ด้วยค่า α_0 ซึ่งมีค่าประมาณ 1 โดยให้เป็นสัญญาณที่ 2 ค่าสัญลักษณ์ 100 จะแทนค่าสัญญาณด้วยค่า 0 ในช่วงคาบเวลาดังแต่ 0 ถึง $T_0/2$ โดยให้เป็นสัญญาณที่ 1 และแทนค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงคาบเวลาดังแต่ $T_0/2$ ถึง T_0 ด้วยค่า α_1 ซึ่งมีค่าประมาณ 4 โดยให้เป็นสัญญาณที่ 2 และค่าสัญลักษณ์ 101 จะแทนค่าสัญญาณด้วยค่า 0 ในช่วงคาบเวลาดังแต่ 0 ถึง $T_0/2$ โดยให้เป็นสัญญาณที่ 1 และแทนค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงคาบเวลาดังแต่ $T_0/2$ ถึง T_0 ด้วยค่า α_2 ซึ่งมีค่าประมาณ 9 โดยให้เป็นสัญญาณที่ 2 จากนั้นนำสัญญาณที่ทำการผสมสัญญาณแล้วส่งผ่านช่องสัญญาณแบบชอนนีย์ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ K_0 ซึ่งมีลักษณะของการกระจายของแบบปัวส์ซอง นำค่าสัญญาณจากภาคส่งมาบวกกับค่าสัญญาณรบกวน

ที่ภาครับจะทำการตัดสินใจโดยการเปรียบเทียบค่าของสัญญาณที่รับได้ในแต่ละครั้ง คาบเวลาคือสัญญาณที่ 1 และสัญญาณที่ 2 ว่าค่าใดมีค่ามากกว่าจากนั้นจึงทำการพิจารณาหาค่าตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่า ผลของการตัดสินใจจะเป็นดังนี้ ถ้าสัญญาณที่ 1 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงคาบเวลาดังแต่ 0 ถึง $T_0/2$ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสัญญาณที่ 2 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงในช่วงคาบเวลาดังแต่ $T_0/2$ ถึง T_0 และมีค่าน้อยกว่าค่าการตัดสินใจตัวแรก (m_{T1}) จะตัดสินใจให้เป็นค่าสัญลักษณ์ 000 ถ้าสัญญาณที่ 1 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงคาบเวลาดังแต่ 0 ถึง $T_0/2$ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสัญญาณที่ 2 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงในช่วงคาบเวลาดังแต่ $T_0/2$ ถึง T_0 และมีค่ามากกว่าค่าการตัดสินใจตัวแรก (m_{T1}) แต่น้อยกว่าค่าการตัดสินใจตัวที่สอง (m_{T2}) จะตัดสินใจให้เป็นค่าสัญลักษณ์ 001 ถ้าสัญญาณที่ 1 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงคาบเวลาดังแต่ 0 ถึง $T_0/2$ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสัญญาณที่ 2 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงในช่วงคาบเวลาดังแต่ $T_0/2$ ถึง T_0 และมีค่ามากกว่าค่าการตัดสินใจตัวที่สอง (m_{T2}) จะตัดสินใจให้เป็นค่าสัญลักษณ์ 010 ถ้าสัญญาณที่ 1 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงคาบเวลาดังแต่ 0 ถึง $T_0/2$ มีค่าน้อยกว่าสัญญาณที่ 2 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงในช่วงคาบเวลาดังแต่ $T_0/2$ ถึง T_0 และมีค่าน้อยกว่าค่าการตัดสินใจตัวแรก (m_{T1}) จะตัดสินใจให้เป็นค่าสัญลักษณ์ 011 ถ้าสัญญาณที่ 1 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงคาบเวลาดังแต่ 0 ถึง $T_0/2$ มีค่าน้อยกว่าสัญญาณที่ 2 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงในช่วงคาบเวลาดังแต่ $T_0/2$ ถึง T_0 และมีค่ามากกว่าค่าการตัดสินใจตัวแรก (m_{T1}) แต่ค่าน้อยกว่าค่าการตัดสินใจตัวที่สอง (m_{T2}) จะตัดสินใจให้เป็นค่าสัญลักษณ์ 100 ถ้าสัญญาณที่ 1 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงคาบเวลาดังแต่ 0 ถึง $T_0/2$ มีค่าน้อยกว่าสัญญาณที่ 2 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงในช่วงคาบเวลาดังแต่ $T_0/2$ ถึง T_0 และมีค่ามากกว่าค่าการตัดสินใจตัวที่สอง (m_{T2}) จะตัดสินใจให้เป็นค่าสัญลักษณ์ 101 ดังรูปที่ ก.6

สำหรับหลักการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดของข้อมูลพิจารณาจากการตัดสินใจโดยอาศัยค่าตำแหน่งการตัดสินใจในภาคผนวก ก และการเปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณสองสัญญาณที่เกิดจากวงจรมอดูเลเตอร์ ซึ่งการตัดสินใจทั้งสองแบบนี้สามารถก่อให้เกิด



รูปที่ ค.6 แผนภาพวงจรถัดสินใจรับแบบการสื่อสารแบบโพดอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

$$\Pr[k_1 > k_2] = \sum_{k_1} \sum_{k_2} Pos(k_1, K_s + K_b) Pos(k_2, K_b) \tag{ค.31}$$

โดยที่ $Pos(k, m) = \frac{m^k e^{-m}}{k!}$, $m = K_s + K_b$ และ $m = K_b$ ตามลำดับ

สำหรับกรณีความถูกต้องแบบที่หนึ่ง สามารถคำนวณฟังก์ชันความน่าจะเป็นจะได้ดังสมการ

$$\Pr[k_1 > k_2] = \sum_{k_1=1}^{m_{T1}} \sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_1, K_s + K_b) Pos(k_2, K_b) \tag{ค.32}$$

สำหรับกรณีความถูกต้องแบบที่สอง สามารถคำนวณฟังก์ชันความน่าจะเป็นจะได้ดังสมการ

$$\Pr[k_1 > k_2] = \sum_{k_1=m_{T2}}^{m_{T2}} \sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_1, 4K_s + K_b) Pos(k_2, K_b) \tag{ค.33}$$

สำหรับกรณีความถูกต้องแบบที่สาม สามารถคำนวณฟังก์ชันความน่าจะเป็นจะได้ดังสมการ

$$\Pr[k_1 > k_2] = \sum_{k_1=m_{T2}}^{\infty} \sum_{k_2=0}^{k_1-1} Pos(k_1, 9K_s + K_b) Pos(k_2, K_b) \tag{ค.34}$$

สำหรับกรณีความถูกต้องแบบที่สี่มีการคำนวณค่าความถูกต้องเหมือนกับค่าความถูกต้องแบบที่หนึ่ง กรณีความถูกต้องแบบที่ห้ามีการคำนวณค่าความถูกต้องเหมือนกับค่าความถูกต้องแบบที่สอง กรณีความถูกต้องแบบที่หกมีการคำนวณค่าความถูกต้องเหมือนกับค่าความถูกต้องแบบที่สาม ตามลำดับ

ส่วนความถูกต้องแบบที่เจ็ดเป็นค่าความถูกต้องที่เกิดจากค่าระดับของสัญญาณรบกวนแบบช็อคน้อยสและสัญญาณที่เกิดจากพัลส์แสงในแต่ละครั้งคาบเวลานั้นมีค่าเท่ากับค่าที่เกิดจากสัญญาณรบกวนแบบช็อคน้อยสเพียงอย่างเดียว แต่มีค่าน้อยกว่าค่าการตัดสินใจตัวที่หนึ่ง ทำให้มีการตัดสินใจที่ถูกต้อง ความถูกต้องแบบที่แปดเป็นค่าความถูกต้องที่เกิดจากค่าระดับของสัญญาณรบกวนแบบช็อคน้อยสและสัญญาณที่เกิดจากพัลส์แสงในแต่ละครั้งคาบเวลานั้นมีค่าเท่ากับค่าที่เกิดจากสัญญาณรบกวนแบบช็อคน้อยสเพียงอย่างเดียว และมีค่ามากกว่าค่าการตัดสินใจตัวที่หนึ่ง แต่น้อยกว่าค่าการตัดสินใจตัวที่สอง ทำให้มีการตัดสินใจที่ถูกต้อง ความถูกต้องแบบที่เก้าเป็นค่าความถูกต้องที่เกิดจากค่าระดับของสัญญาณรบกวนแบบช็อคน้อยสและสัญญาณที่เกิดจากพัลส์แสงในแต่ละครั้งคาบเวลานั้นมีค่าเท่ากับค่าที่เกิดจากสัญญาณรบกวนแบบช็อคน้อยสเพียงอย่างเดียว และมีค่ามากกว่าค่าการตัดสินใจตัวที่สอง ทำให้มีการตัดสินใจที่ถูกต้อง ซึ่งความถูกต้องทั้งสามรูปแบบสามารถคำนวณความน่าจะเป็นของความถูกต้องโดยอาศัยสมการของความน่าจะเป็นจากการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันดังนี้

$$\Pr[k_1] = \frac{1}{6} \sum_{k_1} \text{Pos}(k_1, K_s + K_b) \text{Pos}(k_1, K_b) \quad (\text{ก.35})$$

สำหรับกรณีความถูกต้องแบบที่เจ็ด สามารถคำนวณฟังก์ชันความน่าจะเป็นจะได้ดังสมการ

$$\Pr[k_1] = \frac{1}{6} \sum_{k_1=0}^{m_{r1}} \text{Pos}(k_1, K_s + K_b) \text{Pos}(k_1, K_b) \quad (\text{ก.36})$$

สำหรับกรณีความถูกต้องแบบที่แปด สามารถคำนวณฟังก์ชันความน่าจะเป็นจะได้ดังสมการ

$$\Pr[k_1] = \frac{1}{6} \sum_{k_1=m_{r1}}^{m_{r2}} \text{Pos}(k_1, 4K_s + K_b) \text{Pos}(k_1, K_b) \quad (\text{ก.37})$$

สำหรับกรณีความถูกต้องแบบที่เก้า สามารถคำนวณฟังก์ชันความน่าจะเป็นจะได้ดังสมการ

$$\Pr[k_1] = \frac{1}{6} \sum_{k_1=m_{r_2}}^{\infty} \text{Pos}(k_1, 9K_s + K_b) \text{Pos}(k_1, K_b) \quad (\text{ท.38})$$

เมื่อนำค่าความถูกต้องทั้งหมดมารวมกัน และสมมติว่าเส้นทางส่งข้อมูลออกมาด้วยความน่าจะเป็นที่เท่ากัน จะพบว่ากรณีการผสมสัญญาณโพตอนหลายระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบ BPPM จะมีค่าความน่าจะเป็นของความผิดพลาดต่อสัญลักษณ์เท่ากับ

$$\begin{aligned} PWE = & 1 - \frac{1}{3} \sum_{k_1=1}^{m_{r_1}} \sum_{k_2=0}^{k_1-1} \text{Pos}(k_1, K_s + K_b) \text{Pos}(k_2, K_b) - \frac{1}{3} \sum_{k_1=m_{r_1}}^{m_{r_2}} \sum_{k_2=0}^{k_1-1} \text{Pos}(k_1, 4K_s + K_b) \text{Pos}(k_2, K_b) \\ & - \frac{1}{3} \sum_{k_1=m_{r_2}}^{\infty} \sum_{k_2=0}^{k_1-1} \text{Pos}(k_1, 9K_s + K_b) \text{Pos}(k_2, K_b) - \frac{1}{6} \sum_{k_1=0}^{m_{r_1}} \text{Pos}(k_1, K_s + K_b) \text{Pos}(k_1, K_b) \quad (\text{ท.39}) \\ & - \frac{1}{6} \sum_{k_1=m_{r_1}}^{m_{r_2}} \text{Pos}(k_1, 4K_s + K_b) \text{Pos}(k_1, K_b) - \frac{1}{6} \sum_{k_1=m_{r_2}}^{\infty} \text{Pos}(k_1, 9K_s + K_b) \text{Pos}(k_1, K_b) \end{aligned}$$

ประวัติผู้เขียน

นางสาวจิตฎาม์กานต์ วงศ์พุ่ม เกิดเมื่อวันที่ 30 มกราคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดน่าน สำเร็จ การศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม จาก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2546

ระหว่างการศึกษาในระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เป็นพนักงาน ชั่วคราวของศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ระหว่างเดือน กุมภาพันธ์ 2547 - กรกฎาคม 2547 และได้รับทุนสนับสนุนการวิจัย จากสถาบันพัฒนาบัณฑิต วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST) ระหว่างเดือน มิถุนายน 2547 - พฤษภาคม 2550