

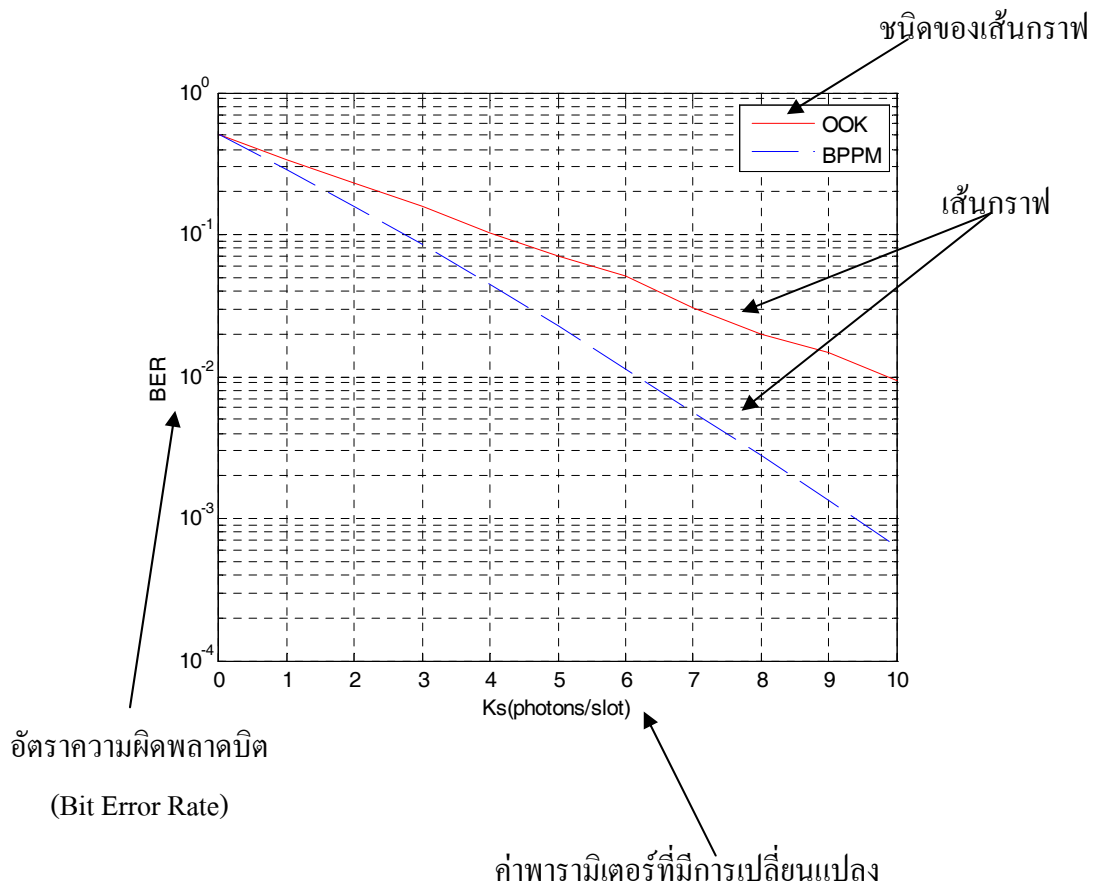
บทที่ 5

ผลการทดสอบ

บทนี้แสดงผลของการทดสอบในรูปแบบต่างๆ ที่กล่าวในบทที่ 4 ได้แก่การออกแบบระบบสื่อสาร การออกแบบช่องสัญญาณ การออกแบบการผสมสัญญาณเชิงแสง การสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ และการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนวูลูชัน ซึ่งผลการทดสอบจะแสดงในรูปของกราฟที่เปรียบเทียบตามข้อกำหนดต่างๆ ที่กล่าวไว้ดังต่อไปนี้

5.1 ผลการออกแบบระบบสื่อสารเชิงแสง

ผลการของหาอัตราความผิดพลาดของข้อมูลระบบสื่อสารเชิงแสงนั้นมีการนำเสนอรูปแบบของแบบกราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราความผิดพลาดกับจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อสล็อตเมื่อเป็นช่องสัญญาณแบบพัลส์ช่อง และกราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราความผิดพลาดบิตเมื่อเป็นช่องสัญญาณแบบเกาส์ ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ตัวอย่างผลการจำลองการทำงานของโปรแกรม MATLAB

5.2 ผลการออกแบบช่องสัญญาณ

ผลการออกแบบช่องสัญญาณแบ่งออกเป็นสองส่วน ตามหัวข้อการออกแบบช่องสัญญาณในบทที่ 4 คือผลของการออกแบบช่องสัญญาณแบบเกาส์เซียนและผลของการออกแบบช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง

5.2.1 ผลการออกแบบช่องสัญญาณแบบเกาส์

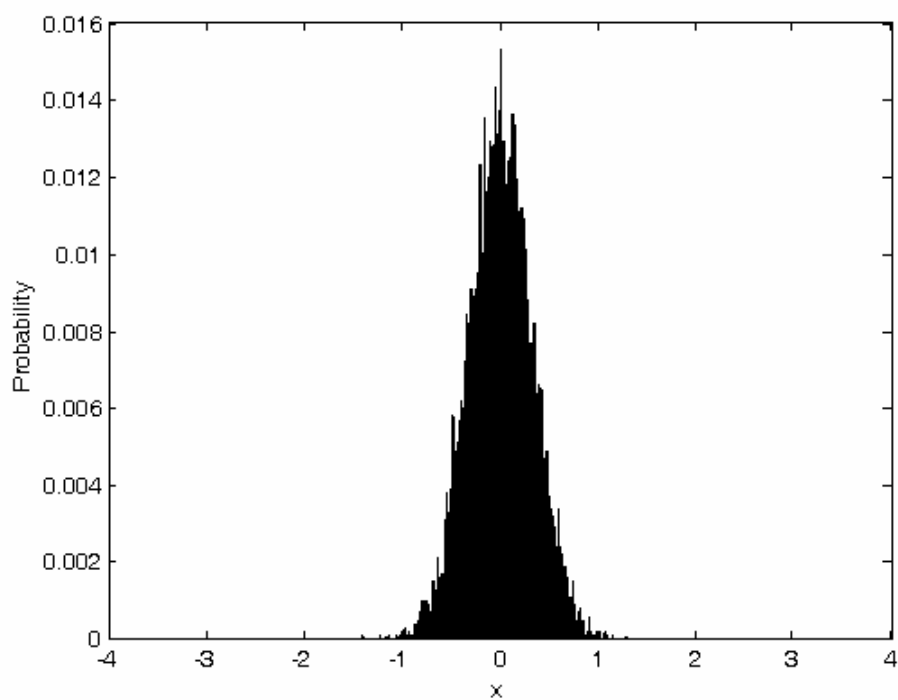
การกระจายแบบเกาส์เป็นการกระจายที่มีลักษณะคล้ายกับระฆังคว่ำซึ่งตัวแปรที่มีผลต่อการกระจายแบบเกาส์ได้แก่ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าความแปรปรวน (Variance) สำหรับผลของการออกแบบช่องสัญญาณแบบเกาส์นั้นแสดงดังรูปที่ 5.2 ซึ่งเป็นผลการออกแบบการกระจายโดยใช้ค่าเฉลี่ยของการกระจายเท่ากับศูนย์เพื่อจะนำไปใช้งานกับช่องสัญญาณแบบเกาส์จริงที่ใช้ในระบบสื่อสารโดยทั่วไป

สรุปได้ว่าเมื่อค่าความแปรปรวนเพิ่มขึ้นจะทำให้การกระจายตัวของสัญญาณเพิ่มมากขึ้นมีการกระจายตัวห่างจากค่าเฉลี่ยมากยิ่งขึ้น ซึ่งเมื่อเทียบกับระบบสื่อสารจริงพบว่ามีความสอดคล้องกับค่าของอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวน (SNR) คือเมื่อค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณกับสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าของสัญญาณรบกวนมีค่าลดลง ส่งผลให้ค่าความแปรปรวนของสัญญาณรบกวนมีค่าลดลง ดังนั้นการกระจายของสัญญาณรบกวนจึงมีค่าลดลงตามไปด้วย

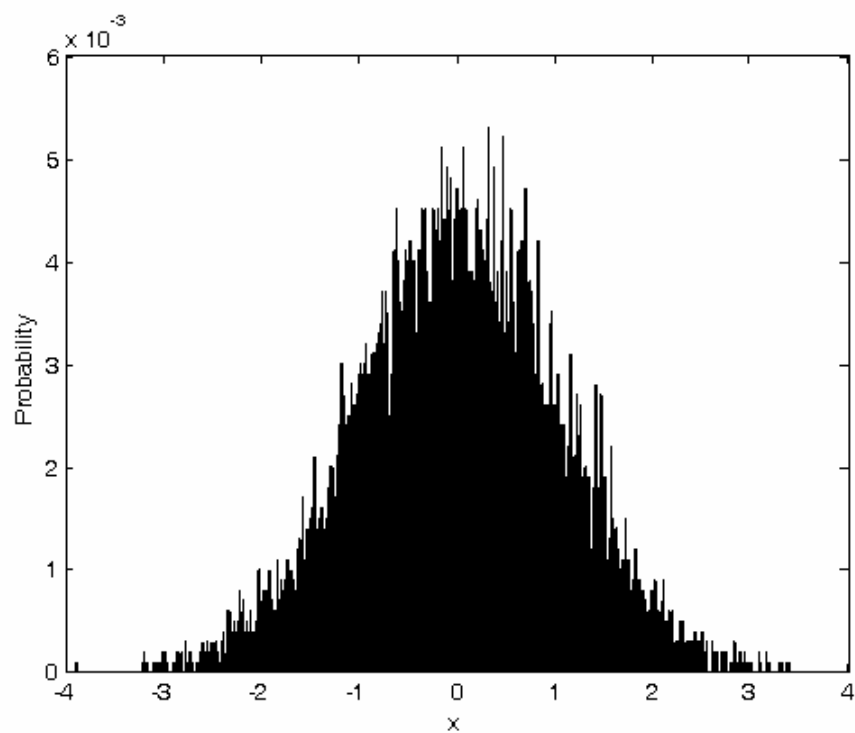
5.2.2 ผลการออกแบบช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง

การกระจายแบบปัวส์ซองเป็นการกระจายที่มีลักษณะเบ้ไปทางด้านใดด้านหนึ่งซึ่งเป็นผลมาจากการที่ค่าเฉลี่ย (Mean) และค่าความแปรปรวน (Variance) มีค่าเท่ากัน ผลของการออกแบบช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองนั้นแสดงดังรูปที่ 5.3 ซึ่งเป็นผลการออกแบบช่องสัญญาณที่มีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนเท่ากับ 5 ณ ตำแหน่งของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนนี้จะใช้วิธีการการออกแบบโดยทฤษฎีแบบโดยตรงดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.5.2.4 ก. ซึ่งจะมีลักษณะของการกระจายของสัญญาณมีการเบ้ไปทางด้านซ้ายมือ ส่วนผลการออกแบบช่องสัญญาณที่มีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนเท่ากับ 20 ณ ตำแหน่งของค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนนี้จะใช้วิธีการออกแบบโดยใช้ทฤษฎีโดยอ้อม ซึ่งจะมีลักษณะใกล้เคียงกับระฆังคว่ำ

สรุปได้ว่าเมื่อค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนของการกระจายแบบปัวส์ซองมีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้มีการกระจายของสัญญาณเพิ่มมากขึ้น จะทำให้มีลักษณะของการกระจายตัวแบบปัวส์ซองมีความใกล้เคียงกับระฆังคว่ำมากยิ่งขึ้น ซึ่งเมื่อนำมาเทียบกับระบบสื่อสารจริงนั้นจะพบว่าสามารถนำมาใช้ในระบบสื่อสารเชิงแสงซึ่งมีตัวแปรที่สอดคล้องกับการกระจายแบบปัวส์ซองคือการเกิดจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อสล็อตและสัญญาณรบกวนเฉลี่ยต่อสล็อตในพัลส์แสง ซึ่งจะมีการกระจายตัวของจำนวนโฟตอนและสัญญาณรบกวนที่กว้างขึ้นเมื่อค่าเพิ่มขึ้น

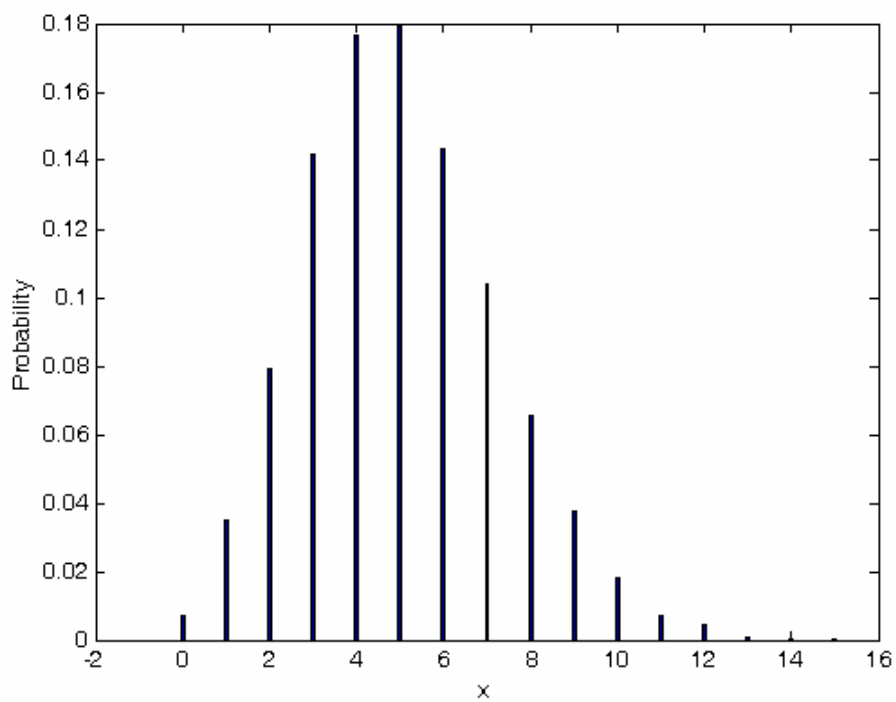


(a)

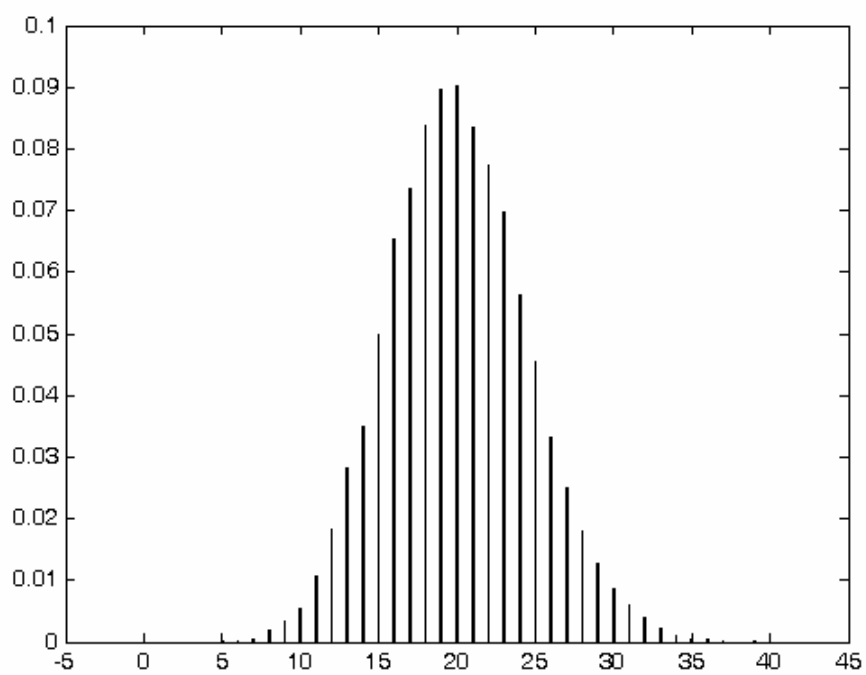


(b)

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



(a)



(b)

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

5.3 ผลการจำลองการทำงานของการผสมสัญญาณ

การจำลองการทำงานของการผสมสัญญาณรูปแบบต่างๆ ดังหัวข้อ 4.3 ในรูปแบบของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB เพื่อเปรียบเทียบกับ PE ที่คำนวณจากสมการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดนั้นไม่สามารถทำได้ทุกรูปแบบของการผสมสัญญาณและทุกช่องสัญญาณ เนื่องจากรูปแบบความน่าจะเป็นในการเกิดความถูกต้องของการเกิดสัญญาณของการผสมสัญญาณบางรูปแบบนั้นมีความยากในการคำนวณออกมาเป็นทางสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแสดงผลได้ดังนี้

5.3.1 ผลการจำลองการทำงานของสัญญาณแบบ On-Off Keying

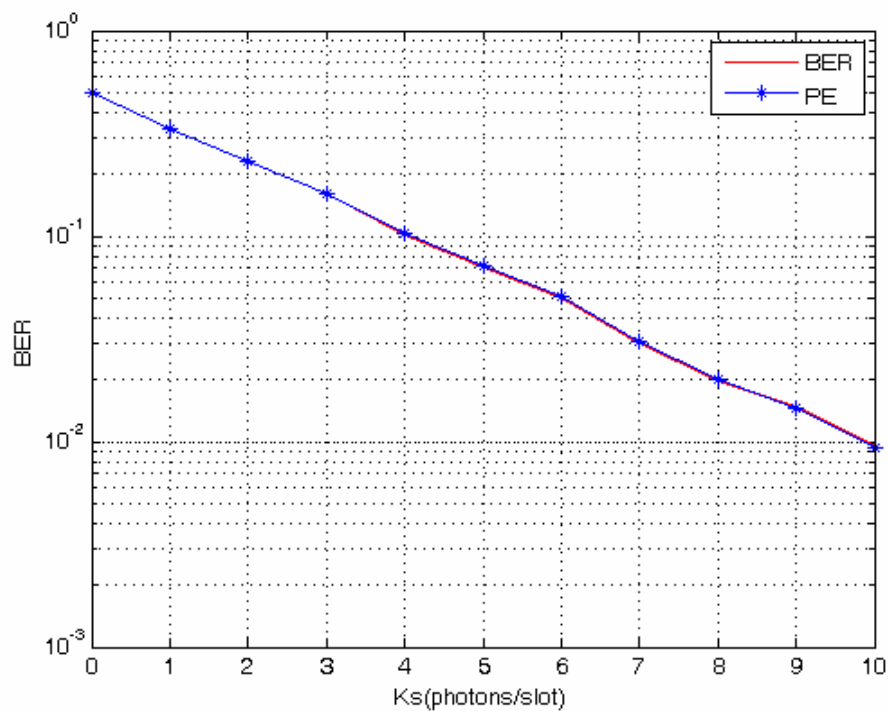
การทดสอบการจำลองการทำงานของสัญญาณแบบ On-Off Keying สามารถทำการทดสอบได้ทั้งช่องสัญญาณแบบเกาส์และช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง ซึ่งผลของการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณได้จากสมการ แสดงได้ดังรูปที่ 5.4

การจำลองการทำงานของสัญญาณแบบ On-Off Keying มีรูปแบบของการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.2 ส่วนค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดของช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองนั้นแสดงในสมการ (4.1) และช่องสัญญาณแบบเกาส์แสดงในสมการ (4.2) รายละเอียดของการสร้างการผสมสัญญาณและหลักการคำนวณสมการค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดในช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองแสดงในภาคผนวก ค.1 ผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงานในช่องสัญญาณทั้งสองรูปแบบนั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมากจนเส้นกราฟเกือบจะซ้อนทับกันแสดงว่าโปรแกรมมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้

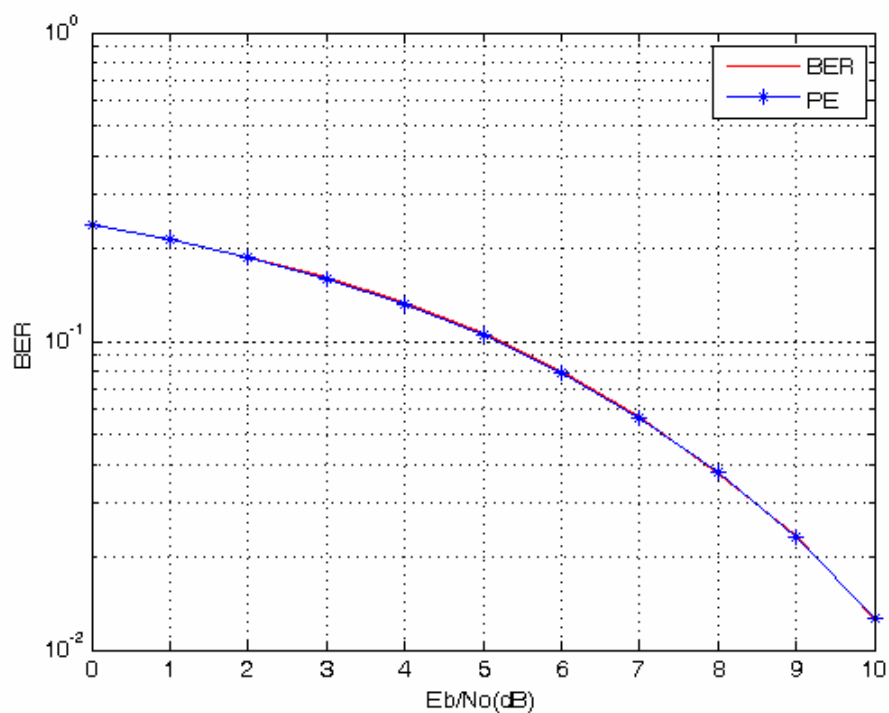
5.3.2 ผลการจำลองการทำงานของสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

การทดสอบการจำลองการทำงานของสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันสามารถทำได้ทั้งช่องสัญญาณแบบเกาส์และช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง ผลของการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณได้จากสมการ แสดงดังรูปที่ 5.5

การจำลองการทำงานของสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันมีรูปแบบของการจำลองการทำงานดังรูปที่ 4.2 ส่วนค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดของช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองนั้นแสดงในสมการ (4.3) และช่องสัญญาณแบบเกาส์แสดงในสมการ (4.4) รายละเอียดของการสร้างการผสมสัญญาณและหลักการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดในช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองแสดงในภาคผนวก ค.2 ผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงานในช่องสัญญาณทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมากจนเส้นกราฟเกือบจะซ้อนทับกันแสดงว่าโปรแกรมมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้

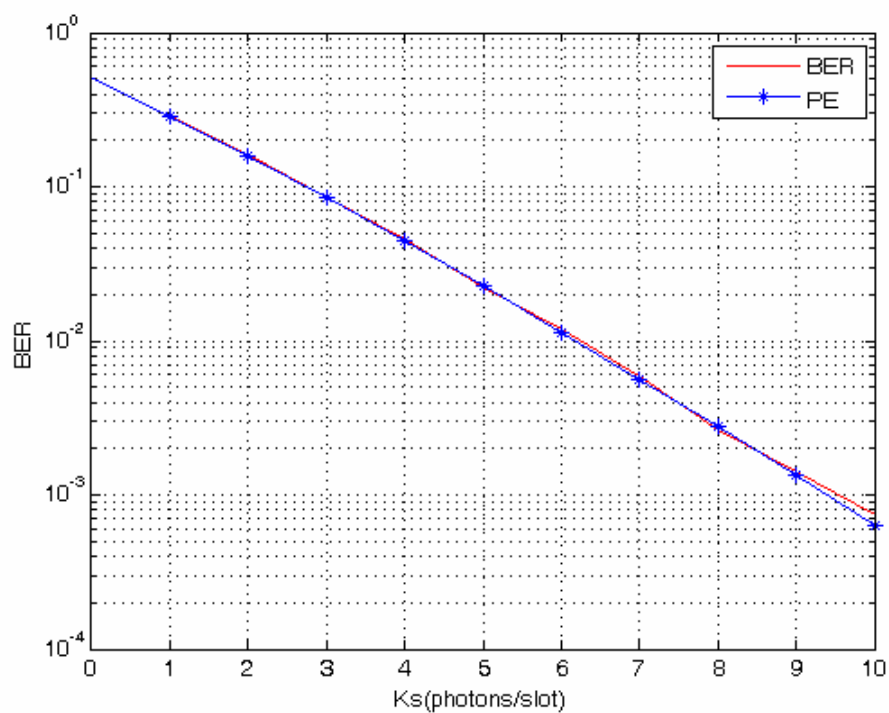


(a)

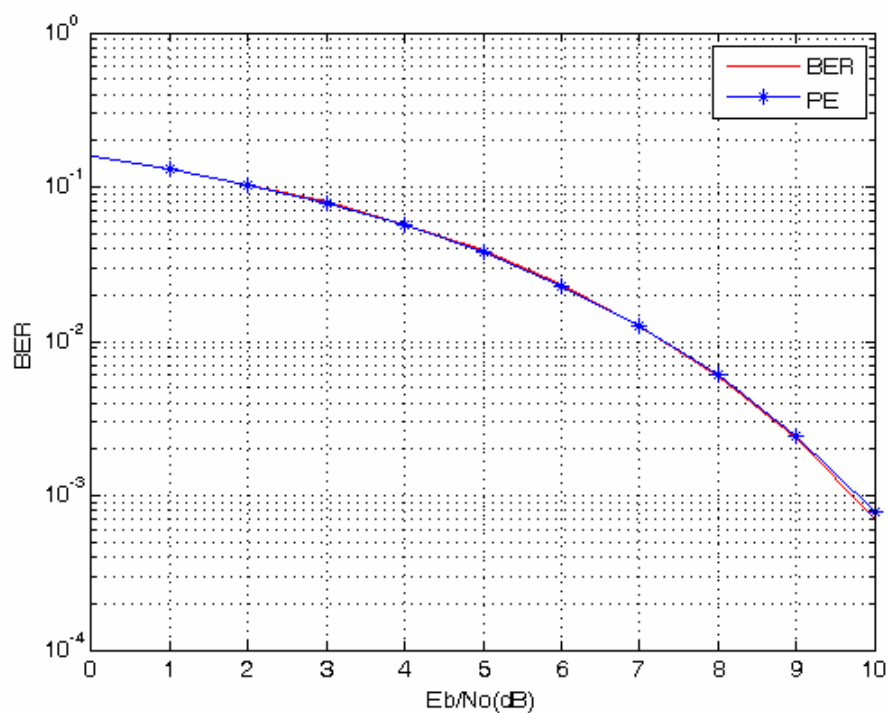


(b)

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) ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์

5.3.3 ผลการจำลองการทำงานสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

การทดสอบการจำลองการทำงานของการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันสามารถทำได้ทั้งช่องสัญญาณแบบเกาส์และช่องสัญญาณแบบบิวส์ซอง ซึ่งผลของการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ แสดงดังรูปที่ 5.6

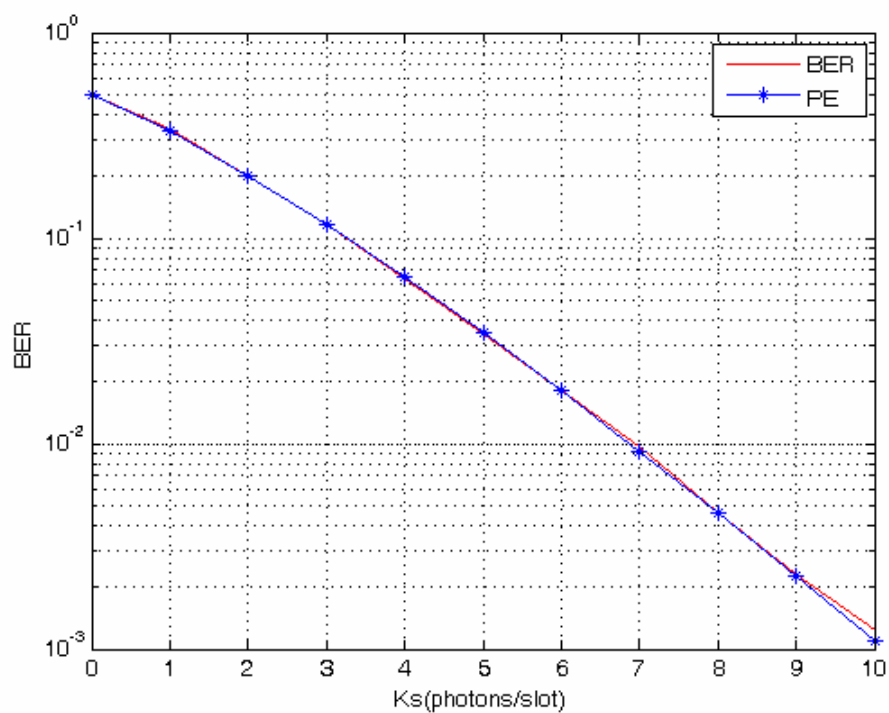
การจำลองการทำงานของการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันมีรูปแบบของการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 4.2 ส่วนค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดสัญลักษณ์ของช่องสัญญาณแบบบิวส์ซองนั้นแสดงในสมการ (4.6) และช่องสัญญาณแบบเกาส์แสดงในสมการ (4.7) สำหรับรายละเอียดของการสร้างการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันและหลักการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดสัญลักษณ์ในช่องสัญญาณแบบบิวส์ซองแสดงในภาคผนวก ก.3 ซึ่งค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตสามารถคำนวณได้จากสมการ

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

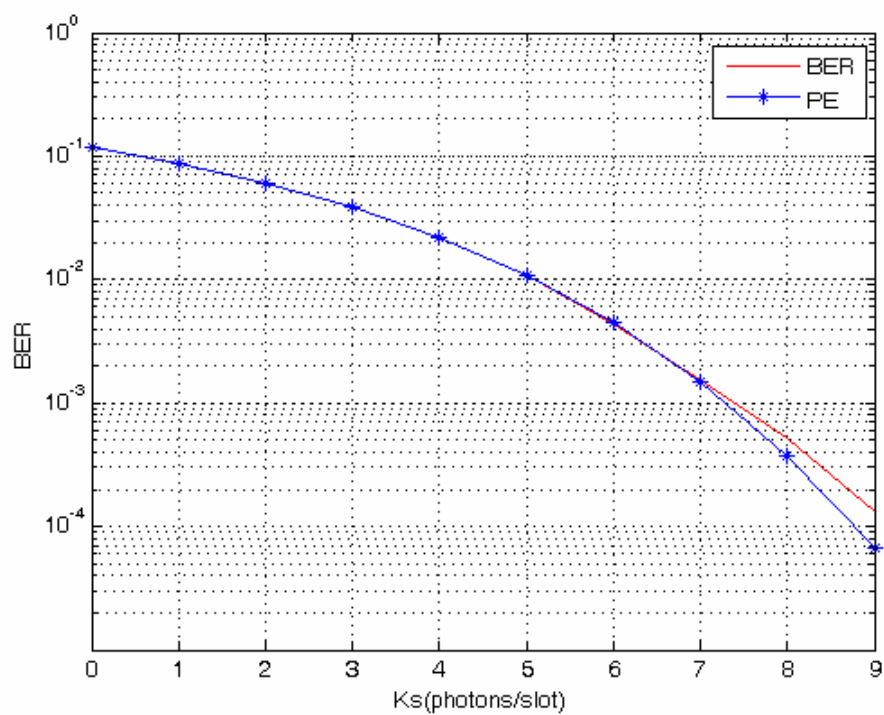
จากผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงานในช่องสัญญาณทั้งสองรูปแบบพบว่ามีความผิดพลาดใกล้เคียงกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่ได้จากการคำนวณจากเส้นกราฟเกือบจะซ้อนทับกันแสดงว่าโปรแกรมที่ได้ทำการออกแบบมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้

5.3.4 ผลการจำลองการทำงานสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation

การทดสอบการจำลองการทำงานของการผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation เปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดสัญลักษณ์ที่คำนวณได้จากสมการนั้นสามารถทำการเปรียบเทียบได้เฉพาะในช่องสัญญาณแบบบิวส์ซองเท่านั้น ส่วนช่องสัญญาณแบบเกาส์นั้นไม่สามารถคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดสัญลักษณ์ได้เนื่องจากลักษณะของการเกิดความผิดพลาดแต่ละรูปแบบนั้นมีความซับซ้อนค่อนข้างมากยากต่อการทำความเข้าใจและยังไม่มีผู้แนะนำการแปรผลการเกิดความผิดพลาดออกมาให้อยู่ในรูปสมการค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาด สำหรับผลของการจำลองการทำงานเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการในช่องสัญญาณแบบบิวส์ซองและผลของการจำลองการทำงานในช่องสัญญาณแบบเกาส์ แสดงดังรูปที่ 5.7

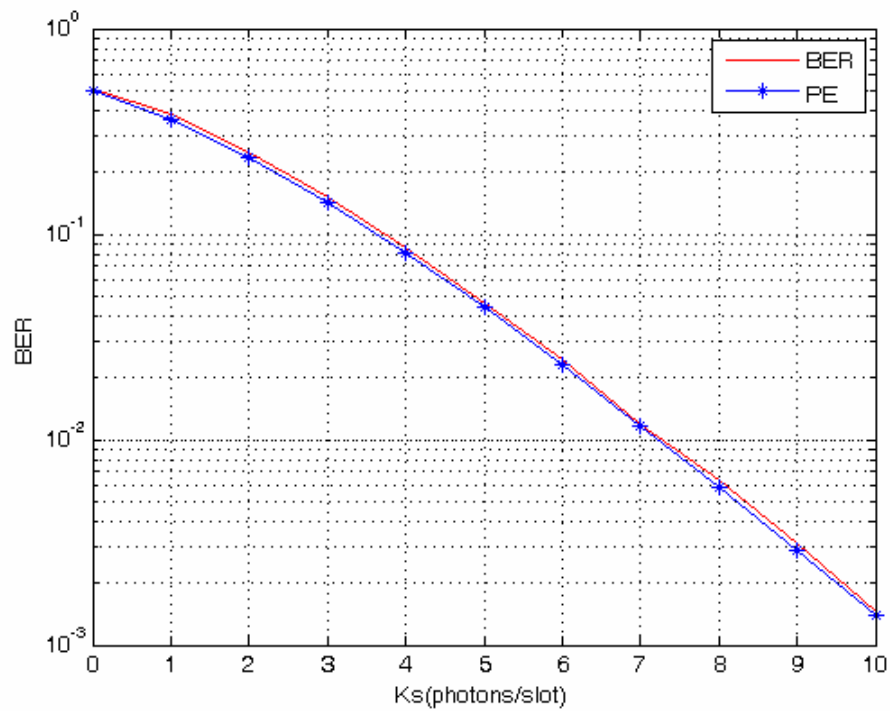


(a)

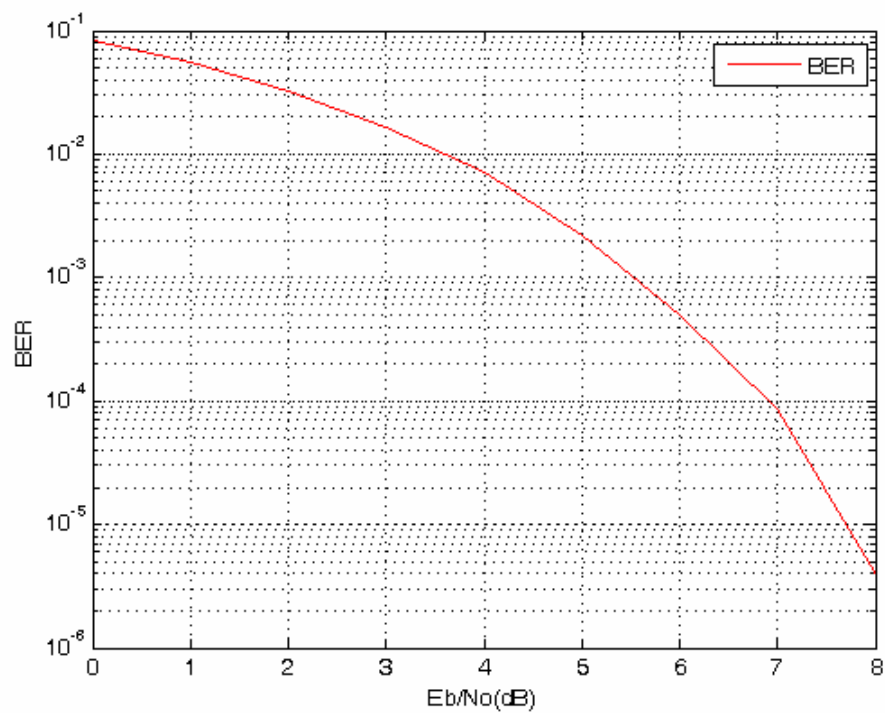


(b)

รูปที่ 5.6 การจำลองการทำงานการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ (4.6) และ (4.7)
 (a) ช่องสัญญาณแบบปีวส์ซอง (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์



(a)



(b)

รูปที่ 5.7 การจำลองการทำงานการผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation (a) ช่องสัญญาณแบบพัลส์ของเปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นที่คำนวณได้จากสมการ (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

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

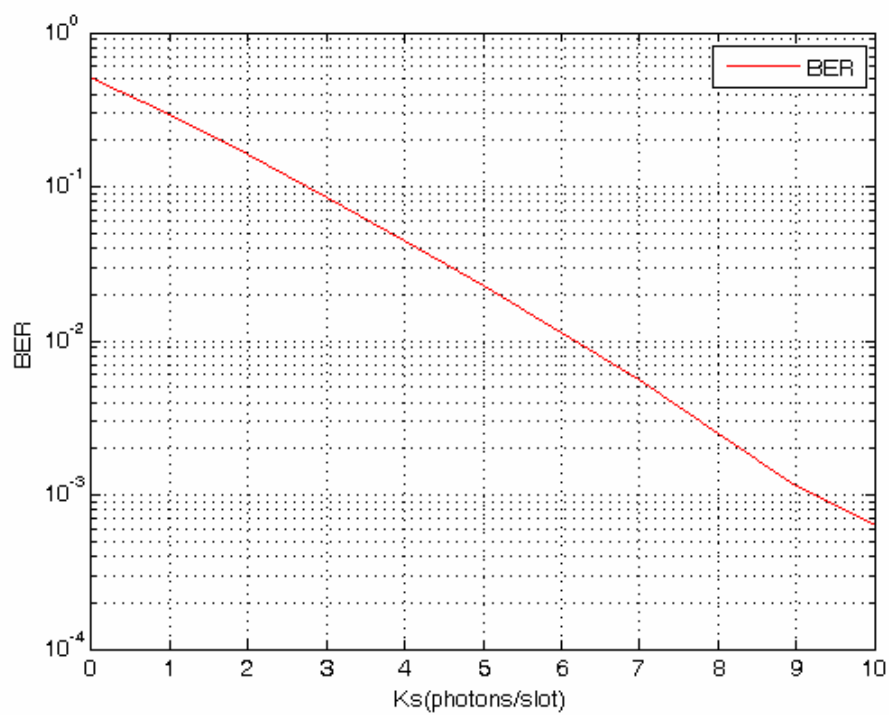
ผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงานในช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองมีค่าต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีเล็กน้อยแสดงว่าโปรแกรมมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้ ส่วนช่องสัญญาณแบบเกาส์นั้นกราฟมีการลดลงคล้ายน้ำตกซึ่งเป็นคุณสมบัติของอัตราความผิดพลาดแสดงว่าการจำลองการทำงานน่าจะมีค่าความถูกต้อง

5.3.5 ผลการจำลองการทำงานสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation

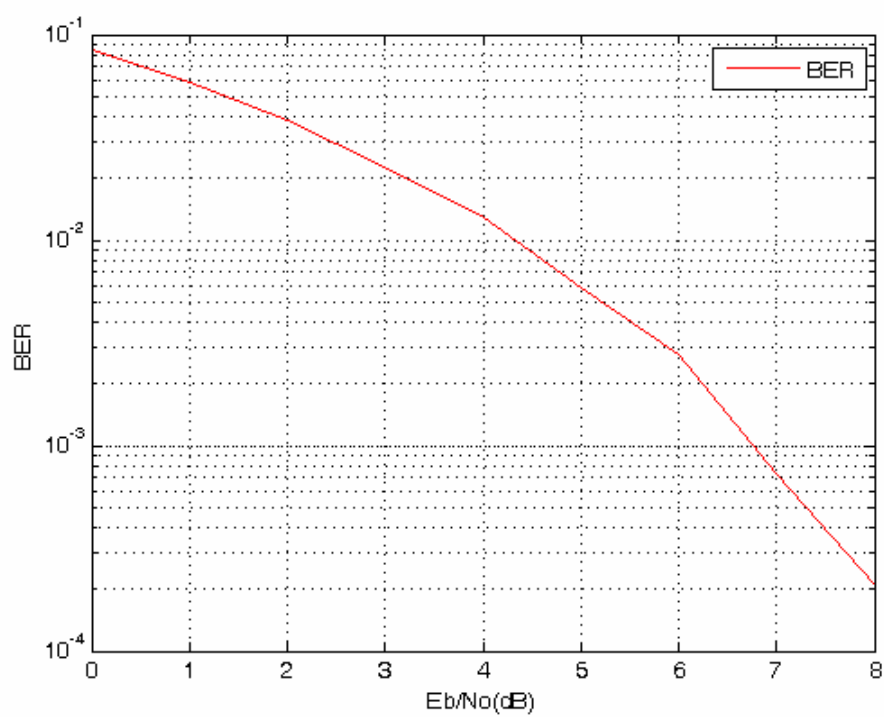
การทดสอบการจำลองการทำงานของการผสมสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation นั้นใช้วิธีการสังเกตความถูกต้องของโปรแกรมจากรูปแบบของกราฟเนื่องจากยังไม่มีผลการแปรผลค่าอัตราความผิดพลาดให้อยู่ในรูปของสมการ ซึ่งผลของการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 5.8 จากกราฟพบว่าผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงานในช่องสัญญาณทั้งสองรูปแบบนั้นมีค่าลดลงโดยมีลักษณะการลดลงของค่าอัตราความผิดพลาดต่อบิตคล้ายกับน้ำตกซึ่งเป็นคุณสมบัติของการเกิดอัตราความผิดพลาดที่มีผลตามหลักการของการจำลองการทำงานในระบบสื่อสาร

5.3.6 ผลการจำลองการทำงานสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation

การทดสอบการจำลองการทำงานของการผสมสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation ไม่มีผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดสัญลักษณ์มาเปรียบเทียบแต่จะสังเกตความถูกต้องของโปรแกรมจากรูปแบบของกราฟ ผลของการจำลองการทำงานแสดงดังรูปที่ 5.9 จากกราฟพบว่าผลการทดสอบการทำงานของโปรแกรมจำลองการทำงานในช่องสัญญาณทั้งสองรูปแบบนั้นมีค่าลดลงโดยมีลักษณะการลดลงของค่าอัตราความผิดพลาดต่อบิตคล้ายกับน้ำตกซึ่งเป็นคุณสมบัติของการเกิดอัตราความผิดพลาดที่มีผลตามหลักการของการจำลองการทำงานในระบบสื่อสาร



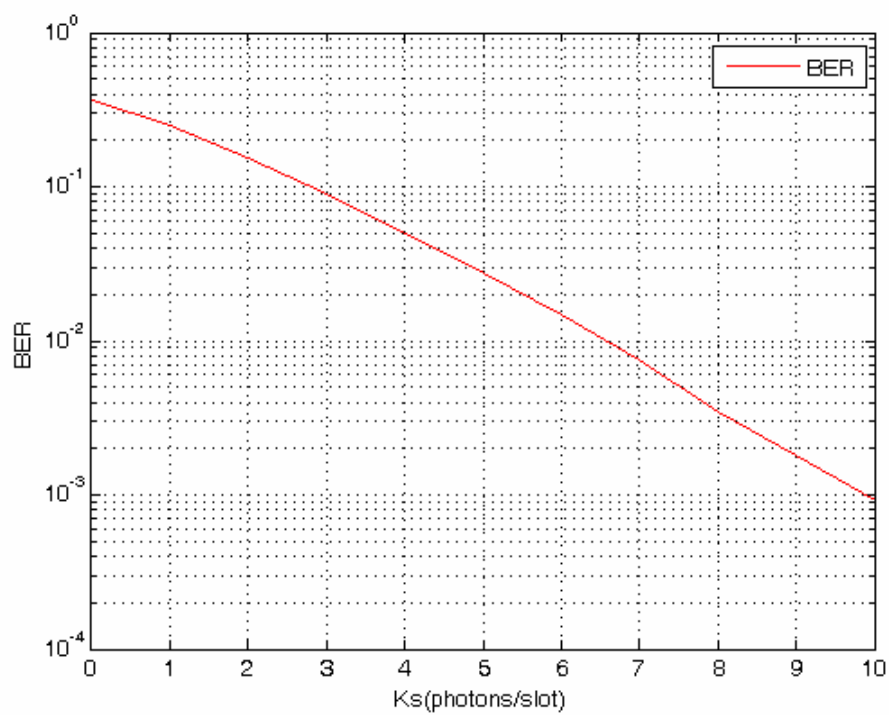
(a)



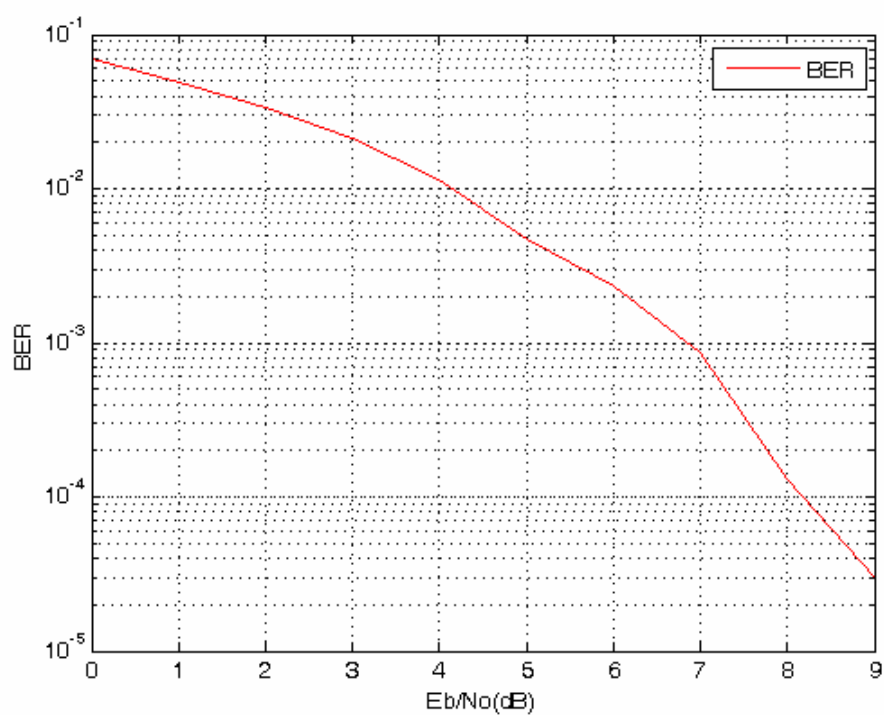
(b)

รูปที่ 5.8 การจำลองการทำงานการผสมสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation

(a) ช่องสัญญาณแบบปัลส์ของ (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์



(a)



(b)

รูปที่ 5.9 การจำลองการทำงานการผสมสัญญาณแบบ Differential Pulse Position Modulation

(a) ช่องสัญญาณแบบปัลส์ชอง (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์

5.3.7 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณโดยพิจารณาจากค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูล (Throughput)

การพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณโดยพิจารณาจากค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูลนั้นเป็นการทดสอบว่าเมื่อมีปริมาณข้อมูลที่ส่งไปในระบบสื่อสารที่เท่ากัน รูปแบบการผสมสัญญาณใดมีประสิทธิภาพการทำงานดีที่สุด ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพทั้งในช่องสัญญาณแบบปั๊มช่องและช่องสัญญาณแบบเกาส์ ผลของการทดสอบเป็นดังต่อไปนี้

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

สรุปได้ว่า เมื่อมีปริมาณของข้อมูลที่ใช้ส่งไปในระบบสื่อสารที่เท่ากันการผสมสัญญาณที่ใช้พัลส์แตรในการส่งสัญญาณนั้นจะมีประสิทธิภาพดีขึ้นเมื่อมีแบนด์วิธเพิ่มขึ้น 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 พบว่าในช่องสัญญาณแบบปั๊มช่อง การผสมสัญญาณแบบ (3, 2) Overlapping Pulse Position Modulation และการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation นั้นมีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณดีกว่าการผสมสัญญาณแบบ 4-พัลส์โพสิชันมอดูเลชันอันเนื่องมาจากการผสมสัญญาณแบบ (3, 2) Overlapping Pulse Position Modulation นั้นยอมให้พัลส์แตรมีการเหลื่อมล้ำกันได้ทำให้เมื่อเกิดความผิดพลาดของการเกิดพัลส์แตรที่ภาครับก็ยังคงสามารถตัดสินใจได้อย่างถูกต้องและการเกิดการเหลื่อมล้ำนี้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้แบนด์วิธที่อีกด้วย

ส่วนการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation นั้นได้มีการลดจำนวนสล็อตในการส่งสัญญาณลงทำให้ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่ภาครับมีค่าน้อยลงตำแหน่งของ

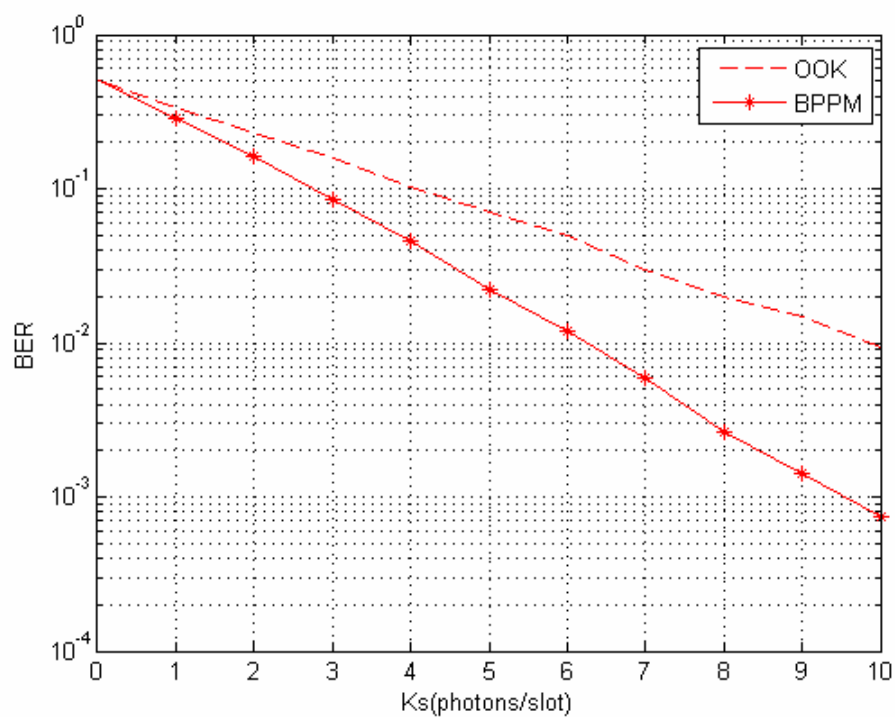
พัลส์แสงที่เกิดขึ้นที่ภาครับมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation และการผสมสัญญาณแบบ (3, 2) Overlapping Pulse Position Modulation นั้นพบว่าในช่วงที่จำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อพัลส์แสงน้อย การผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position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

ในช่องสัญญาณแบบเกาส์นั้นพบว่า การผสมสัญญาณแบบ (3, 2) Overlapping Pulse Position Modulation และการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation มีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณดีกว่าการผสมสัญญาณแบบ 4-พัลส์โพสิชันมอดูเลชันซึ่งมีสาเหตุเดียวกับช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง แต่เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการผสมสัญญาณแบบ (3, 2) Overlapping Pulse Position Modulation และการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation จะพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากช่องสัญญาณแบบเกาส์นั้นให้ค่าของสัญญาณรบกวนที่ไม่สูงมากเท่ากับช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองทำให้การเหลื่อมล้ำของสัญญาณไม่ส่งผลให้ประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณแตกต่างกัน

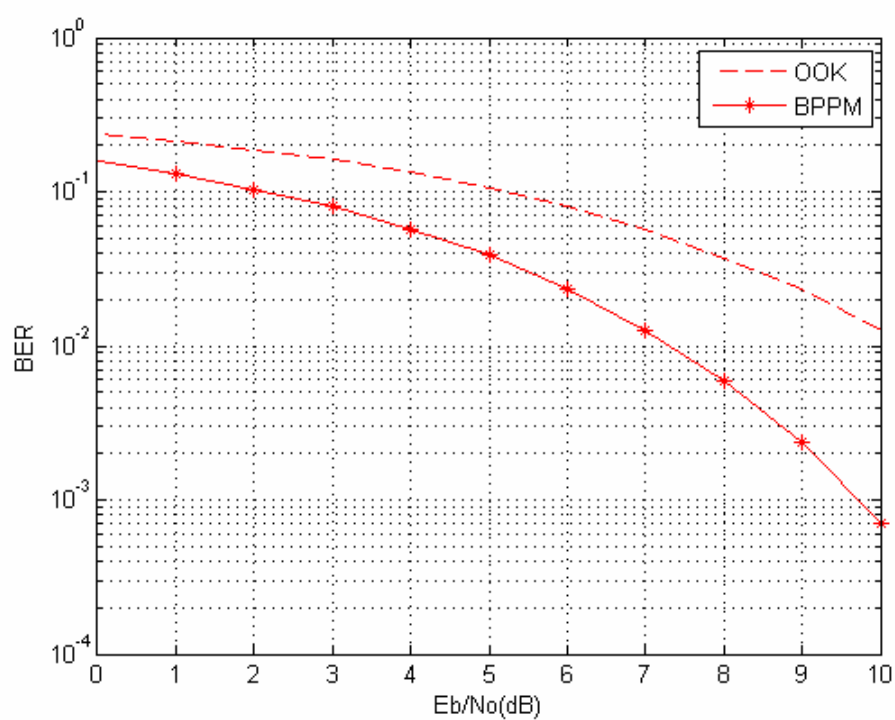
สรุปได้ว่าเมื่อมีปริมาณข้อมูลที่ส่งไปในระบบสื่อสารที่เท่ากันแล้วรูปแบบของการผสมสัญญาณที่มีความแตกต่างกันจะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณแตกต่างกันแล้วช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณก็มีส่วนทำให้ประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลในระบบสื่อสารมีความแตกต่างกันด้วย

ค. 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 ในช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองนั้นประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณของการผสมสัญญาณทั้งสองรูปแบบมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนในช่องสัญญาณแบบเกาส์นั้นการผสมสัญญาณแบบ (4, 2) Multi-Pulse Pulse Position Modulation มีประสิทธิภาพของการส่งสัญญาณดีกว่าการผสมสัญญาณแบบ 8-พัลส์โพสิชันมอดูเลชันเนื่องจากมีแบนด์วิดท์ที่สูงกว่าและค่าของสัญญาณรบกวนแบบเกาส์นั้นมีค่าไม่สูงมากนัก

สรุปได้ว่าเมื่อมีปริมาณของข้อมูลที่ส่งไปในระบบสื่อสารเท่ากันแล้วการเพิ่มจำนวนพัลส์แสงที่ใช้ในการส่งไม่มีผลต่อการส่งสัญญาณมากนัก แต่ช่องสัญญาณที่ใช้ในการส่งสัญญาณนั้นมีส่วนทำให้ประสิทธิภาพในการรับส่งข้อมูลในระบบสื่อสารมีความแตกต่างกัน

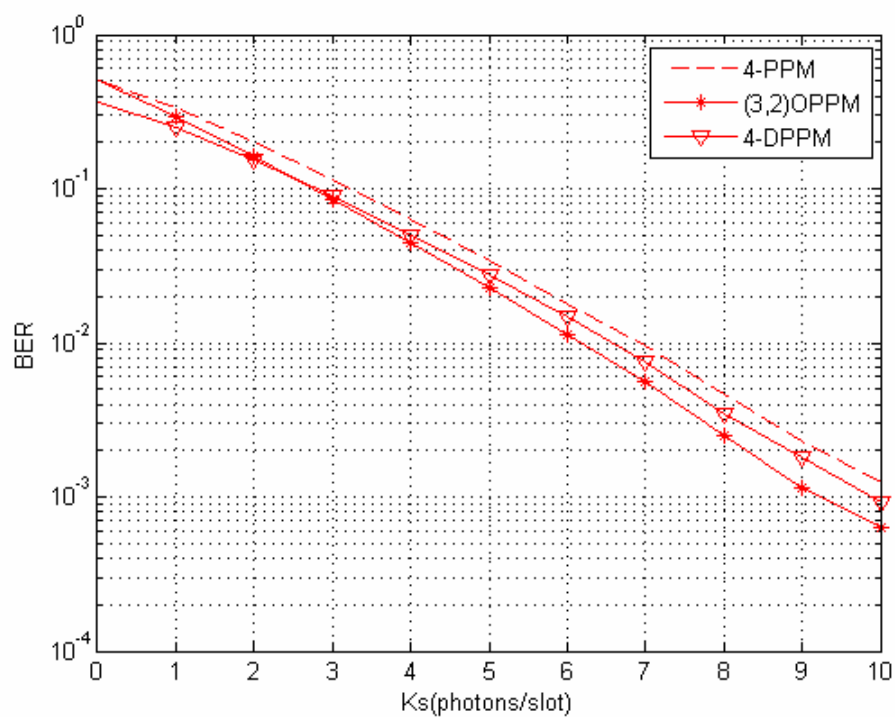


(a)

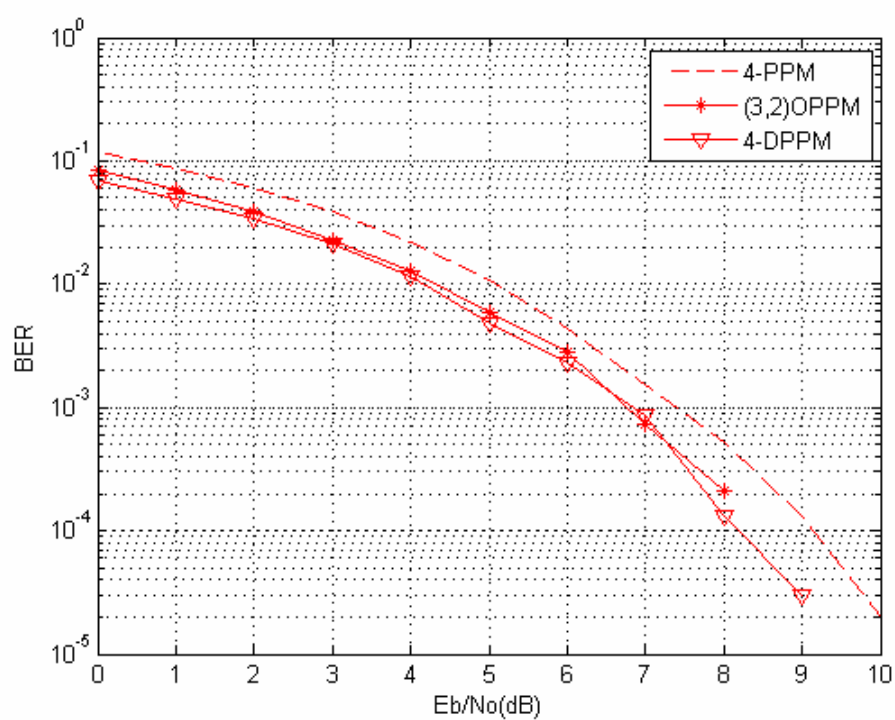


(b)

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

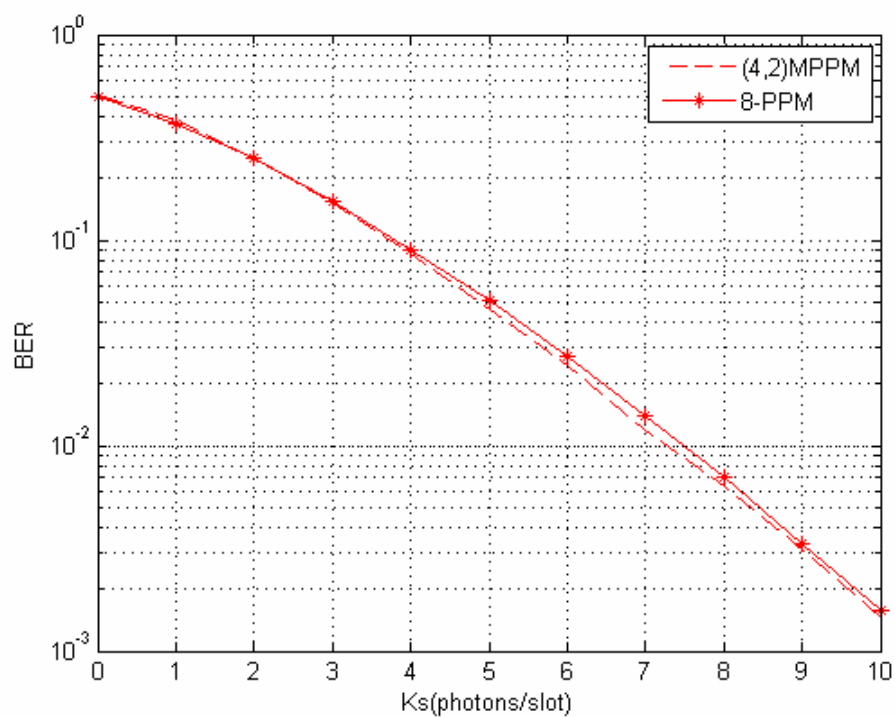


(a)

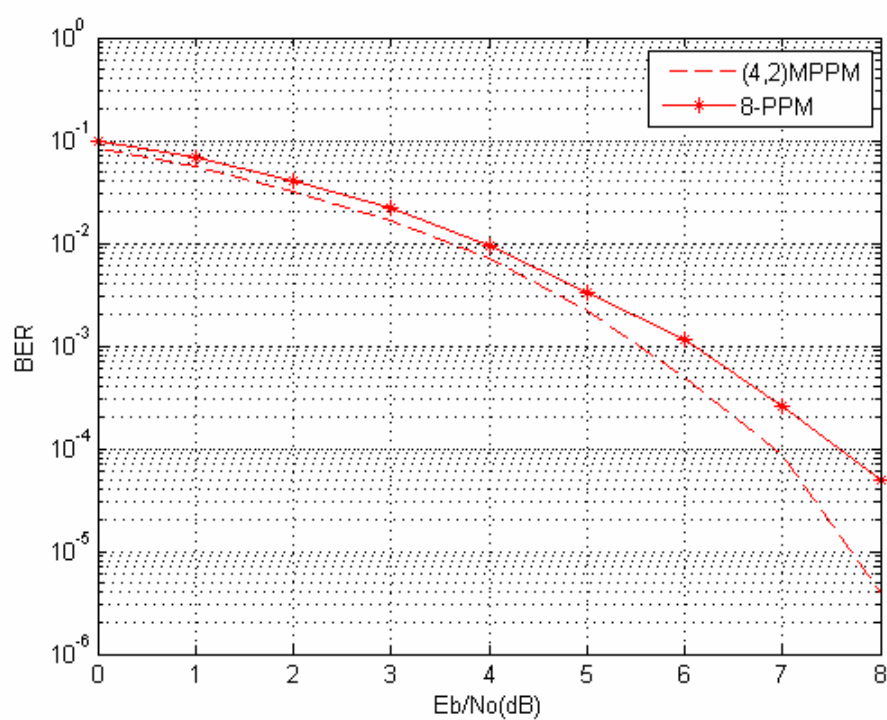


(b)

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



(a)



(b)

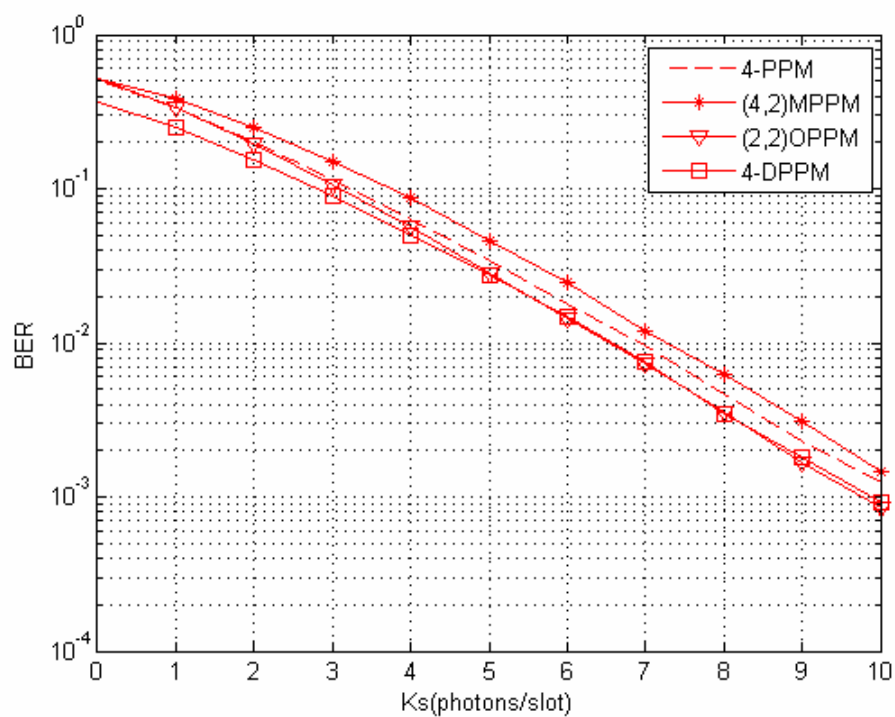
รูปที่ 5.12 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ เมื่อมีค่า Throughput เท่ากับ 3 b/sec/Hz (a) ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์

5.3.8 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณโดยพิจารณาจากจำนวนสลอตที่เท่ากัน

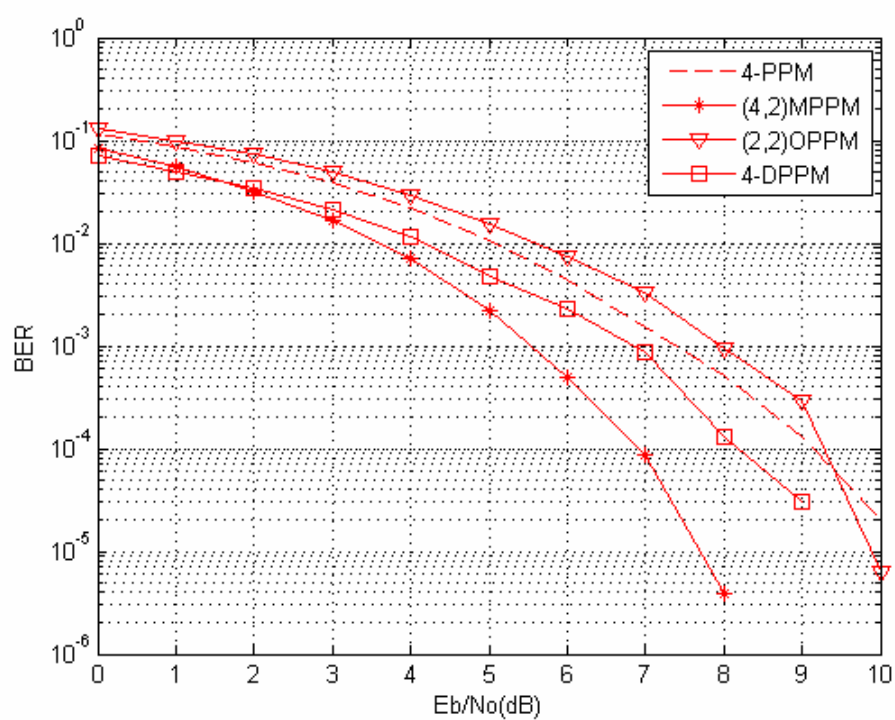
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยดูจากจำนวนสลอตที่เท่ากันเป็นคุณสมบัติหนึ่งในการผสมสัญญาณที่อาศัยพื้นฐานจากการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ซึ่งผลการทดสอบเป็นดังนี้

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 พบว่าในช่วงสัญญาณแบบพัลส์ของประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณของการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation ใกล้เคียงกับการผสมสัญญาณแบบ (2, 2) Overlapping Pulse Position Modulation และดีกว่าการผสมสัญญาณแบบ 4-พัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ส่วนแบบ (4, 2) Multi-pulse Pulse Position Modulation นั้นมีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณต่ำสุดเนื่องจากการแทนค่าของบิตข้อมูลที่มีมากถึง 3 บิต ส่วนในช่วงสัญญาณแบบเกาส์นั้นมีประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณจากมากไปหาน้อยตามลำดับดังนี้ การผสมสัญญาณแบบ (4, 2) Multi-pulse Pulse Position Modulation มีประสิทธิภาพดีกว่าการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation ดีกว่าการผสมสัญญาณแบบ 4-พัลส์โพสิชันมอดูเลชันดีกว่า การผสมสัญญาณแบบ (2, 2) Overlapping Pulse Position Modulation เนื่องจากการในช่วงสัญญาณแบบเกาส์นั้นค่าของสัญญาณรบกวนมีน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของสัญญาณที่ส่งเข้ามาทำให้ (4, 2) Multi-pulse Pulse Position Modulation มีโอกาสที่จะเกิดความผิดน้อยเนื่องจากการตัดสินใจโดยดูจากพัลส์ถึง 2 ตำแหน่งที่สูงที่สุด

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



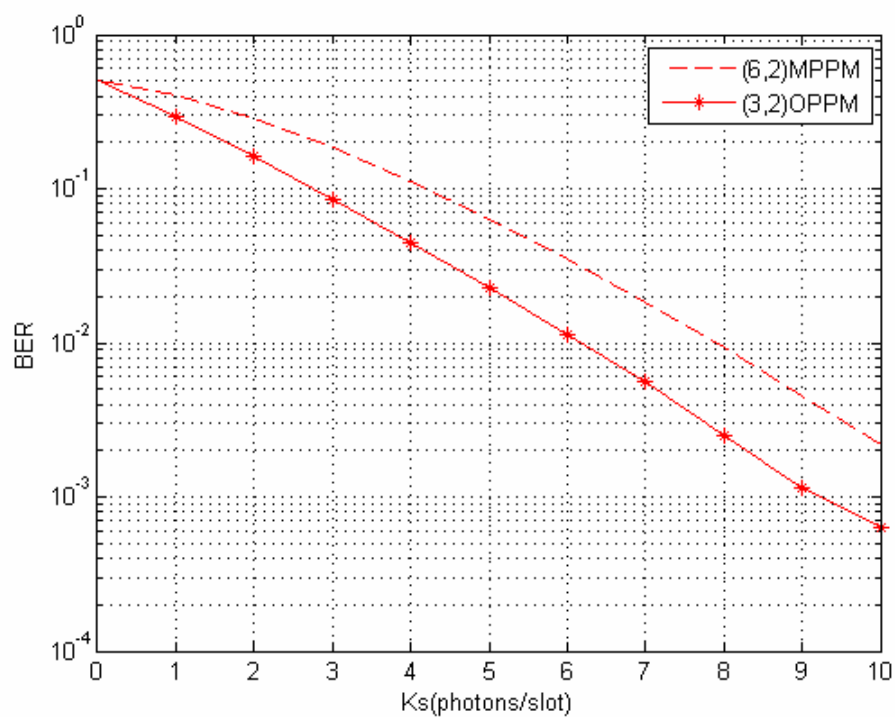
(a)



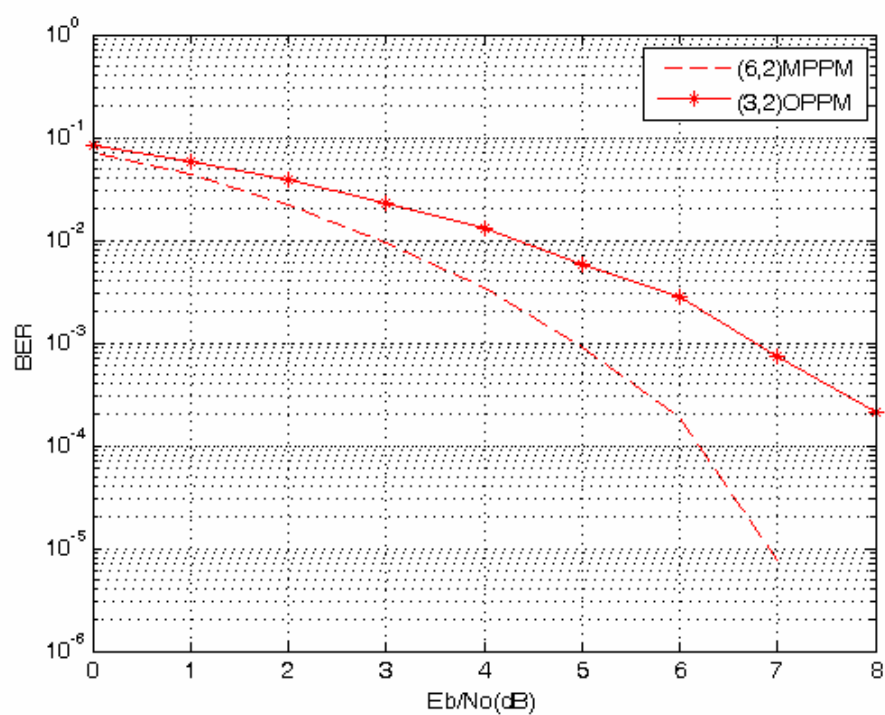
(b)

รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ เมื่อจำนวนสล็อตมีค่าเท่ากับ 4

(a) ช่องสัญญาณแบบปัสซอง (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์



(a)



(b)

รูปที่ 5.14 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณ เมื่อจำนวนสล็อตมีค่าเท่ากับ 6

(a) ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์

5.4 ผลการจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ

การทดสอบการทำงานของการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับนั้นเป็นการจำลองการทำงานโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB และนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิต ดังต่อไปนี้

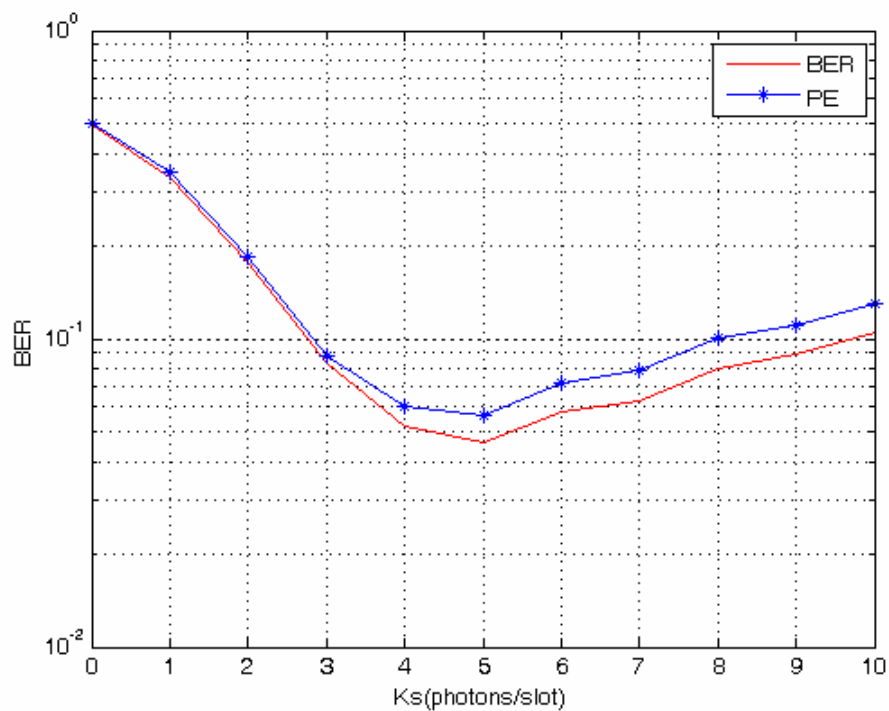
5.4.1 ผลการจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ

การทดสอบการจำลองการทำงานของการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับซึ่งมีตำแหน่งการตัดสินใจสองรูปแบบคือตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่าและแบบคำนวณนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 5.15 ซึ่งพบว่ามีความใกล้เคียงกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตจากการคำนวณ ซึ่งรายละเอียดของการสร้างการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับและการคำนวณอัตราความผิดพลาดแสดงไว้ในภาคผนวก ค.5 แสดงว่าโปรแกรมมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้ ซึ่งการใช้ตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่านั้นมีส่วนที่นำไปใช้งานได้คือช่วงที่อัตราความผิดพลาดของบิตมีการลดลงมาจนกระทั่งถึงตำแหน่งที่มีการเกิดจุด Return point ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีอัตราส่วนระหว่างจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อสล็อตตัวที่สอง (α_1) ต่อจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อสัญญาณรบกวนเฉลี่ยต่อสล็อตมีค่าเท่ากับ 3.5

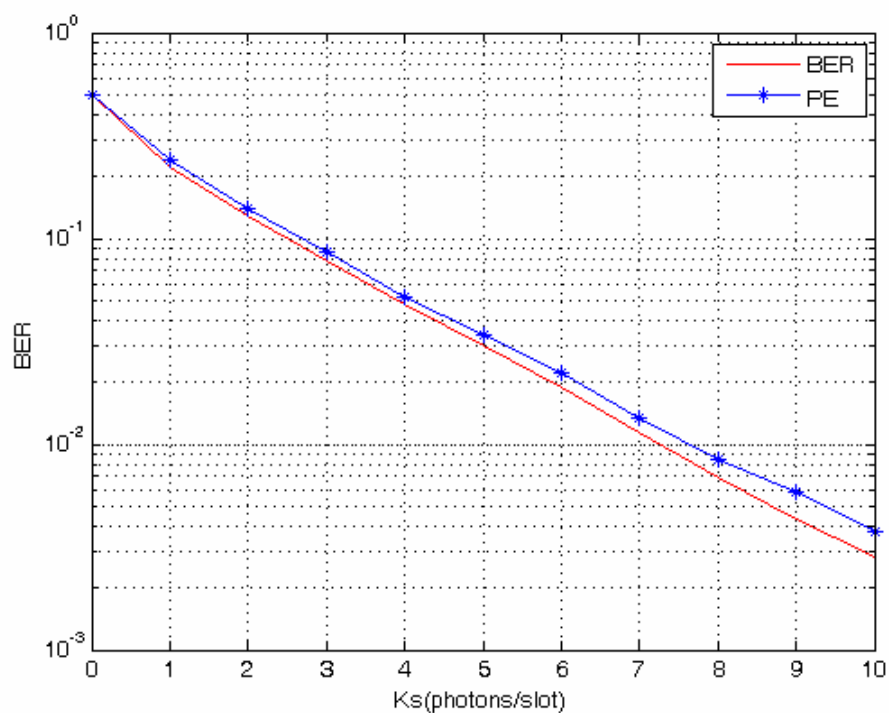
5.4.2 ผลการจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

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

นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบการทำงานของการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีการเพิ่มระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตจากการคำนวณเพื่อให้มีรูปแบบของสัญญาณที่เหมาะสมต่อจำนวนรูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในระบบสื่อสาร ซึ่งวิธีการเพิ่มระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยนั้นแสดงไว้ในภาคผนวก ก. ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5.17 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน แสดงว่าโปรแกรมมีความถูกต้องสามารถนำไปใช้งานได้

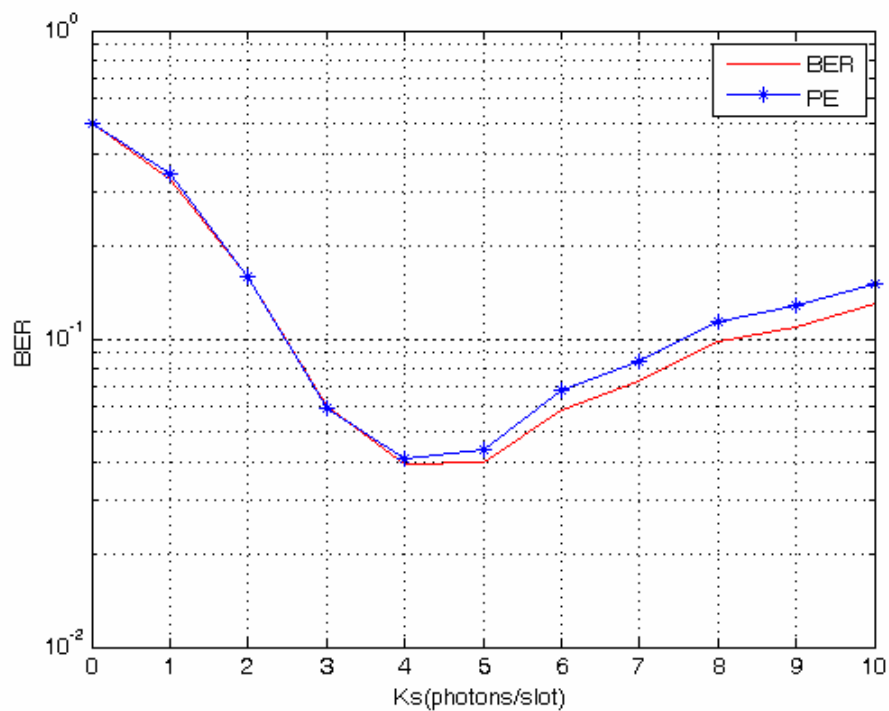


(a)

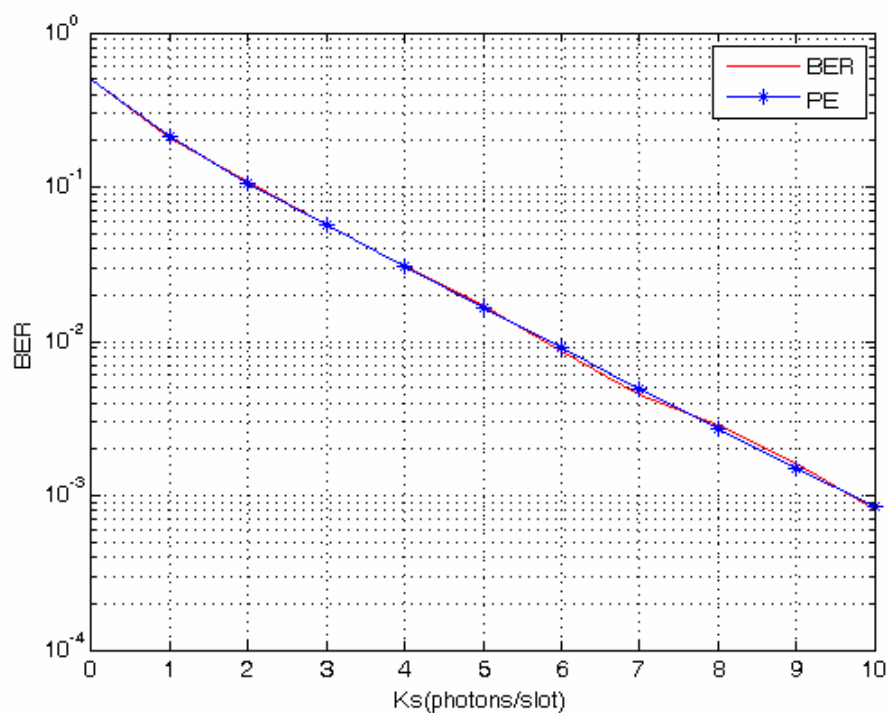


(b)

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

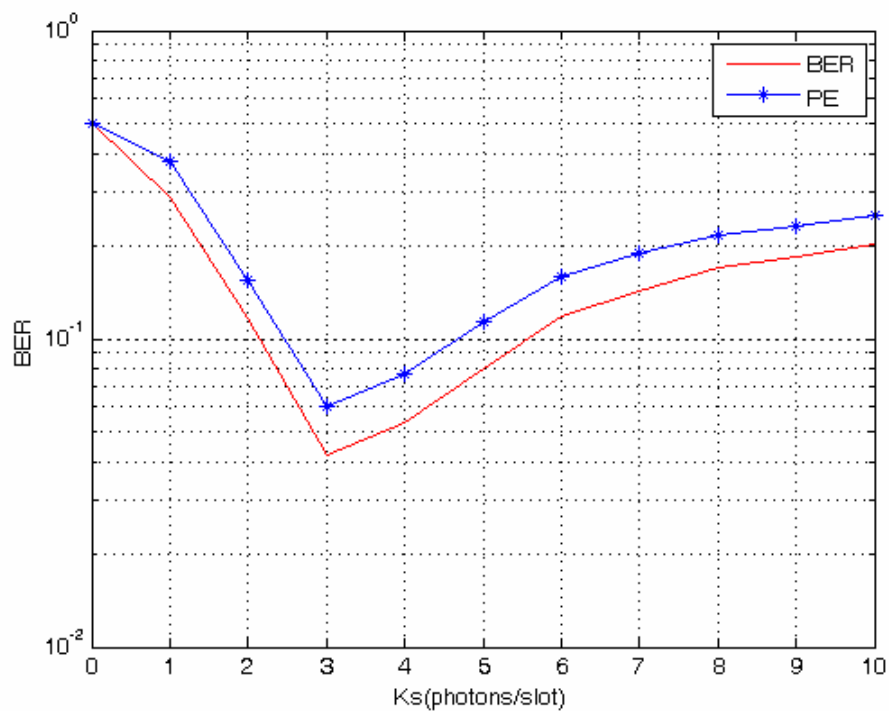


(a)

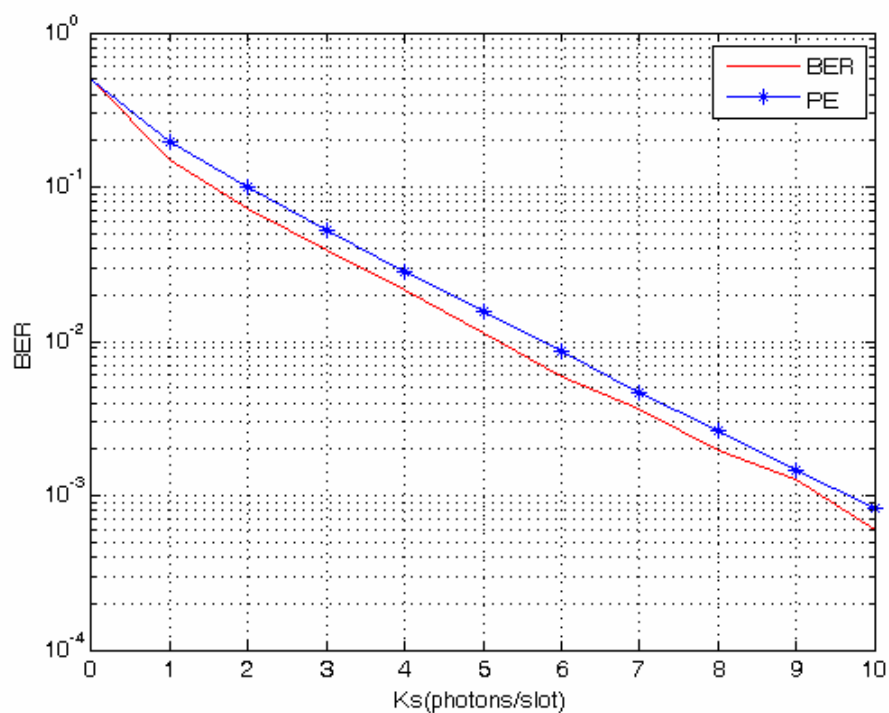


(b)

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



(a)



(b)

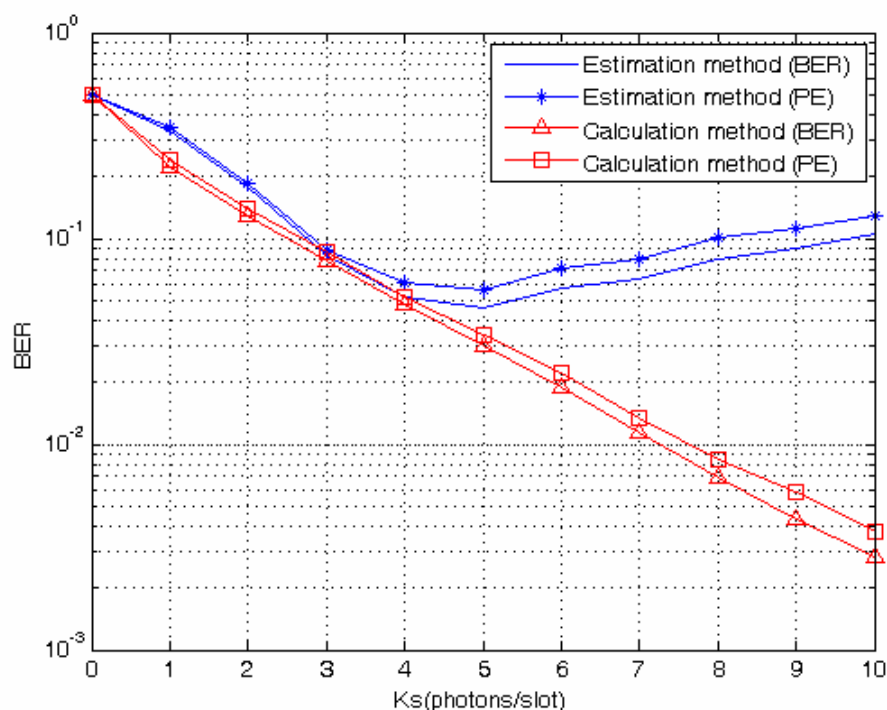
รูปที่ 5.17 การจำลองการทำงานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับเมื่อมีการเพิ่มระดับจำนวนของโฟตอนเฉลี่ยเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดที่คำนวณจากสมการ (4.16) (a) ตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่า (b) ตำแหน่งการตัดสินใจแบบคำนวณ

5.4.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับแต่ละรูปแบบ

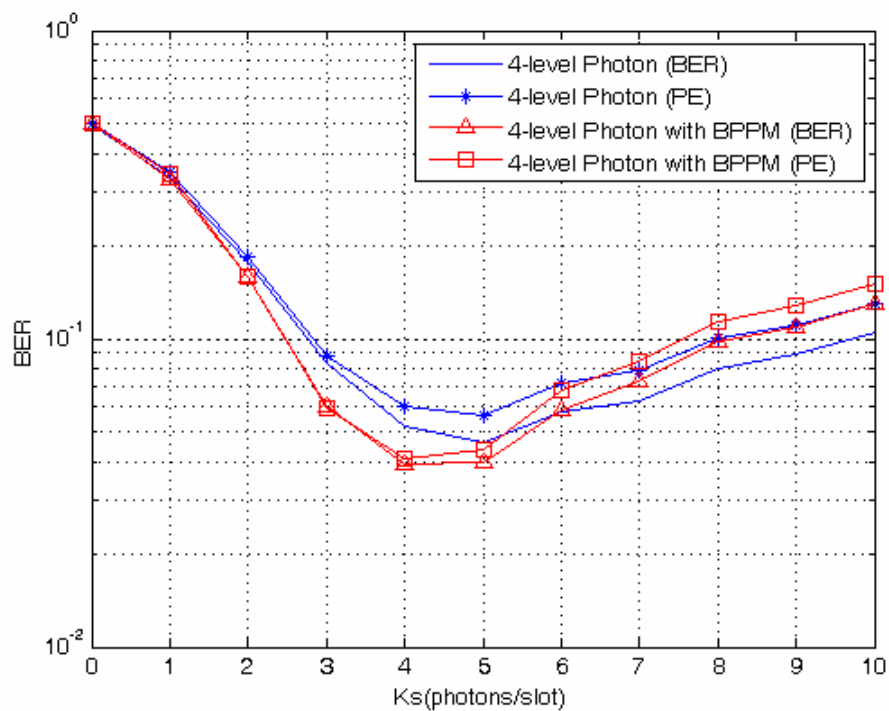
การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับเป็นดังต่อไปนี้

ก. การเปรียบเทียบระหว่างการตัดสินใจแบบประมาณค่ากับการตัดสินใจแบบคำนวณ ซึ่งใช้การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับเป็นพื้นฐานในการเปรียบเทียบ แสดงดังรูปที่ 5.18 ซึ่งจากกราฟพบว่า การตัดสินใจแบบคำนวณสามารถแก้ปัญหาจุด Return point ที่เกิดขึ้นในตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่าได้ ทำให้สรุปได้ว่าตำแหน่งการตัดสินใจแบบคำนวณนี้มีความเหมาะสมต่อการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับมากกว่าตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่าที่ใช้ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนแท่งของโฟตอนเฉลี่ยในแต่ละระดับในการตัดสินใจ เนื่องจากการคำนวณหาค่าตำแหน่งการตัดสินใจจากสมการอย่างแท้จริง

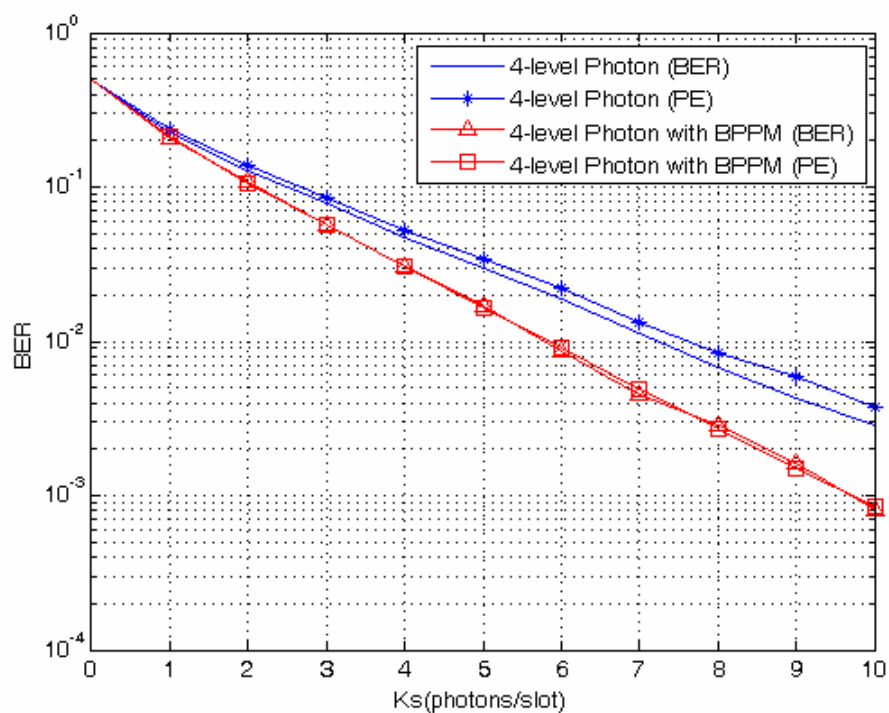
ข. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับกับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ทั้งวิธีการตัดสินใจแบบประมาณค่ากับการตัดสินใจแบบการคำนวณ พบว่าเมื่อการนำการผสมสัญญาณ ไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันมาใช้งานร่วมกันจะสามารถค่าอัตราความผิดพลาดบิตได้ ทั้งการตัดสินใจแบบคำนวณและประมาณค่าแบบแสดงดังรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.18 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของการทำงานของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับระหว่างการตัดสินใจแบบประมาณค่ากับการตัดสินใจแบบการคำนวณ

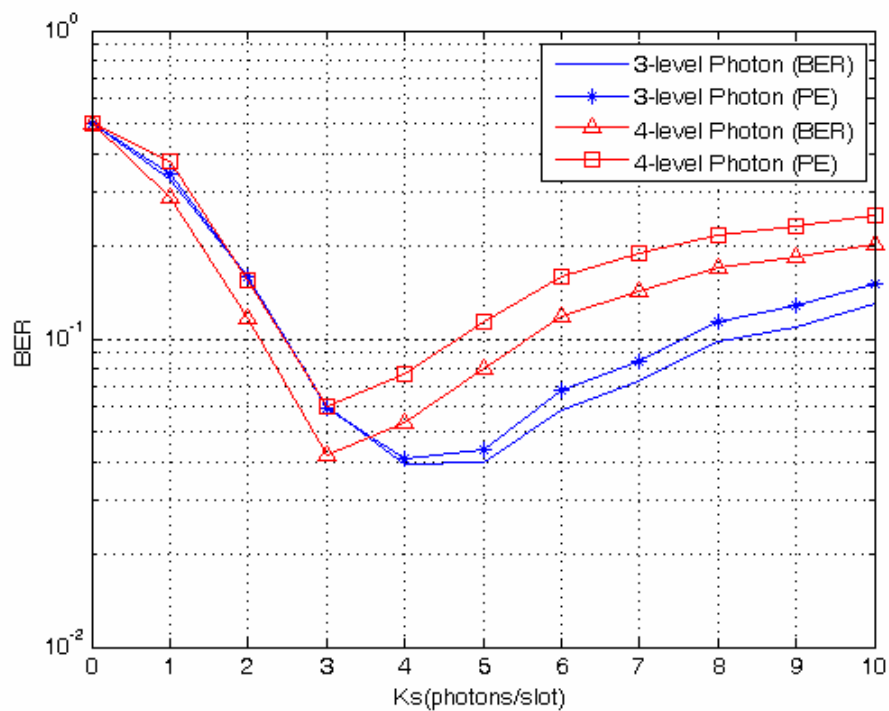


(a)

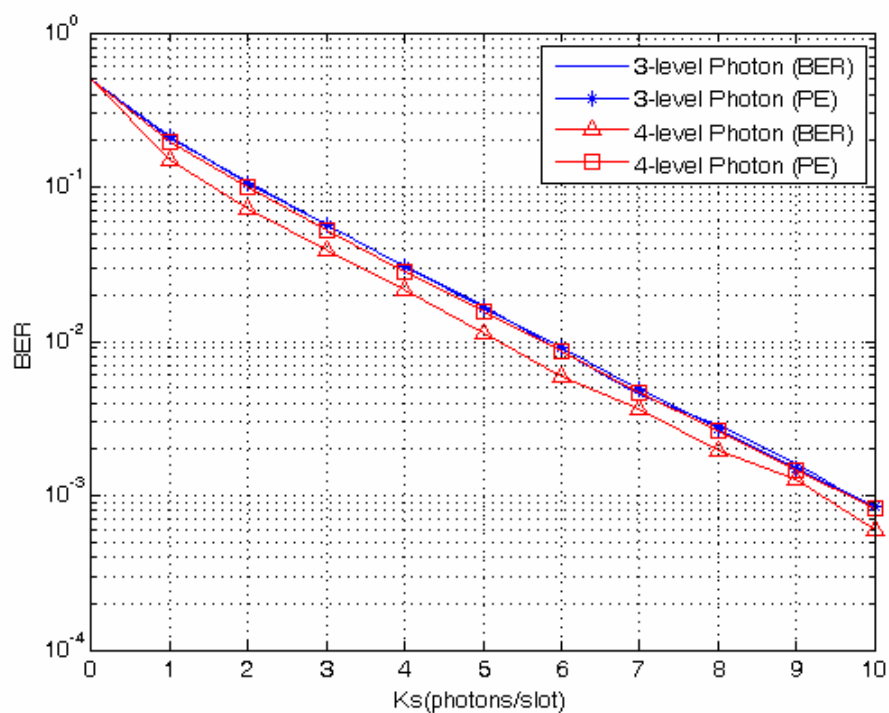


(b)

รูปที่ 5.19 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับกับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน (a) ตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่า (b) ตำแหน่งการตัดสินใจแบบคำนวณ



(a)



(b)

รูปที่ 5.20 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันระหว่างจำนวนโฟตอนเฉลี่ยสามระดับและสี่ระดับ (a) ตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่า (b) ตำแหน่งการตัดสินใจแบบคำนวณ

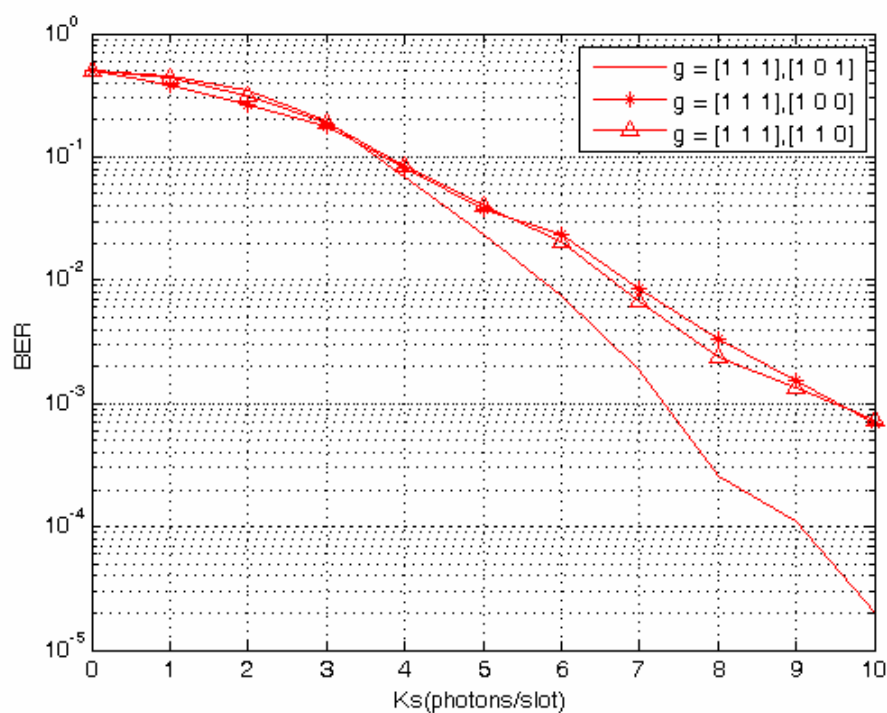
ค. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีระดับของโฟตอนเฉลี่ยสามระดับและสามระดับแสดงดังรูปที่ 5.20 พบว่าเมื่อเพิ่มระดับจำนวนโฟตอนเฉลี่ยขึ้นเป็นสี่ระดับนั้นผลของการจำลองการทำงานมีค่าใกล้เคียงกัน โดยแบบสี่ระดับมีผลของอัตราความผิดพลาดลดลงเล็กน้อยเมื่อมีการตัดสินใจแบบคำนวณ ส่วนการตัดสินใจแบบประมาณค่านั้นแบบสี่ระดับจะให้อัตราความผิดพลาดเพิ่มขึ้นมากกว่าแบบสามระดับหลังจากจุด Return point จึงสรุปได้ว่าสามารถเพิ่มระดับจำนวนโฟตอนเฉลี่ยเพื่อให้การทำงานของระบบสัญญาณมีความสมบูรณ์ได้

5.5 ผลการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนวอลูชัน

ผลของการทดสอบคุณสมบัติของค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเข้ารหัสแบบคอนวอลูชันโดยใช้รูปแบบของการผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying ในช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง และการนำรหัสแบบคอนวอลูชันมาใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณเป็นดังนี้

5.5.1 ผลการเปรียบเทียบการใช้ค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิด

สำหรับผลการทดสอบการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงเมตริกซ์ตัวกำเนิดให้มีรูปแบบที่แตกต่างกัน แสดงได้ดังรูปที่ 5.21

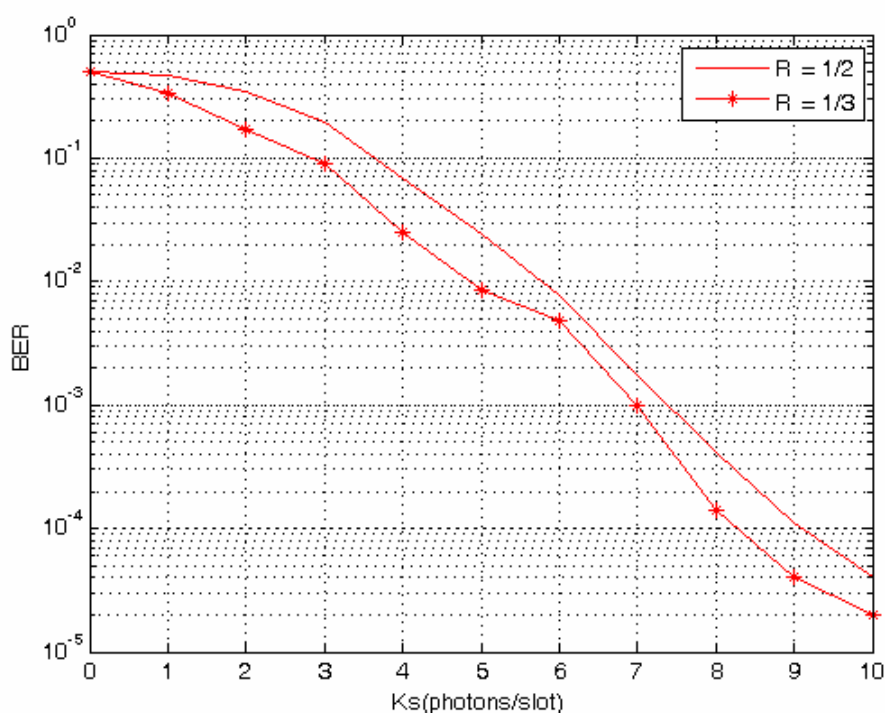


รูปที่ 5.21 ผลของการเปรียบเทียบการใช้เมตริกซ์ตัวกำเนิด

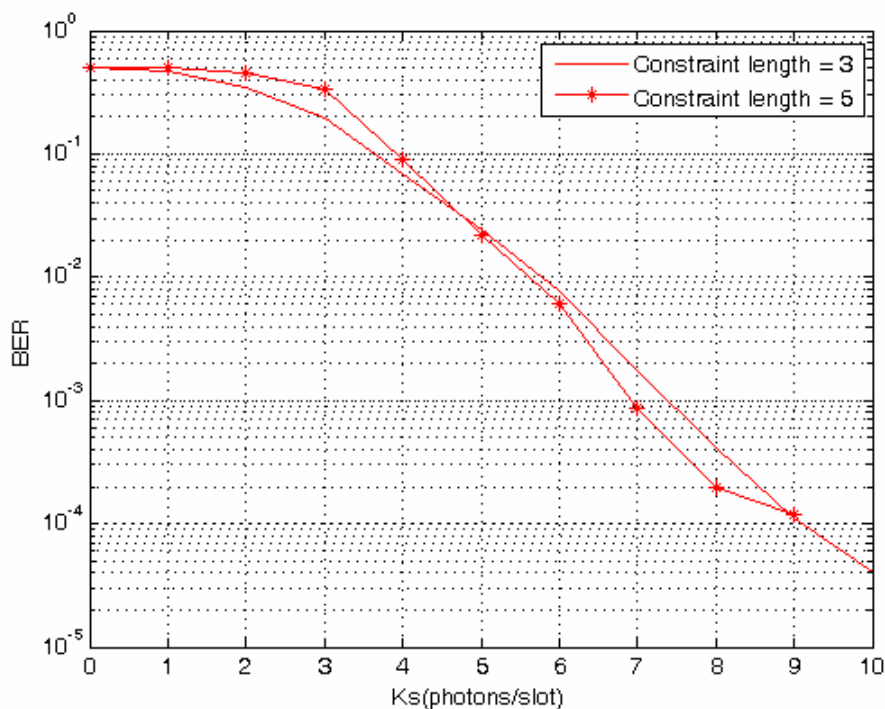
จากกราฟพบว่าค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดที่นำมาเปรียบเทียบมีความแตกต่างเพียง 1 ตำแหน่ง พบว่าค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดที่มีค่าเท่ากับ $[1 \ 1 \ 1]$, $[1 \ 0 \ 0]$ มีความสามารถในการแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการส่งสัญญาณได้มากกว่าค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดที่มีค่าเท่ากับ $[1 \ 1 \ 1]$, $[1 \ 0 \ 1]$ และ $[1 \ 1 \ 1]$,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

5.5.2 ผลการเปรียบเทียบอัตราการเข้ารหัส

ผลของการเปรียบเทียบอัตราการเข้ารหัสแสดงดังรูปที่ 5.22 พบว่าอัตราการเข้ารหัสของรหัสแบบคอนโวลูชันมีผลต่อประสิทธิภาพในการแก้ไขข้อผิดพลาด อัตราของการเข้ารหัส $1/3$ สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดได้มากกว่าอัตราการเข้ารหัสแบบ $1/2$ เนื่องจากข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันที่อัตราการเข้ารหัส $1/3$ นั้นจะมีความยาวของบิตข้อมูลมากกว่าอัตราของการเข้ารหัส $1/2$ เมื่อทำการถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บีที่อาศัยแผนภาพแบบทริลิสหาเส้นทางที่เป็นไปได้ที่มีระยะทางสั้นที่สุดนั้นมีข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลในช่วงเวลาก่อนหน้านี้และข้อมูลที่เข้ารหัสในขณะนั้นต่อเนื่องกันไปได้มากที่สุด ซึ่งจะทำให้พบเส้นทางที่มีลักษณะของข้อมูลที่มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่จะใช้ในการเข้ารหัสมากที่สุด



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

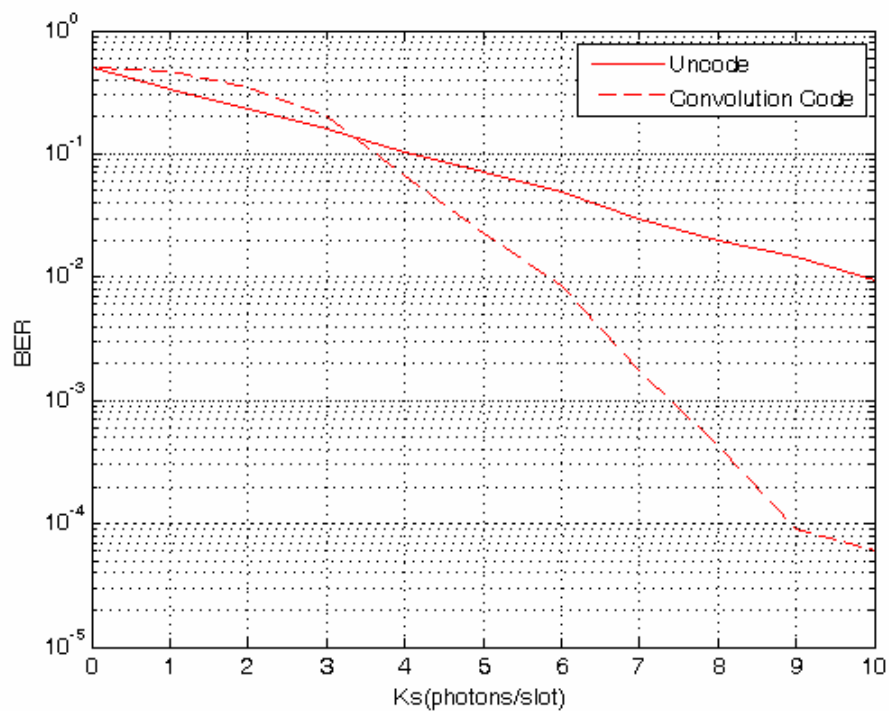
5.5.4 ผลการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ

การนำรหัสแบบคอนโวลูชันมาใช้งานร่วมกับกระบวนการผสมสัญญาณเชิงแสงรูปแบบต่างๆ ที่ทำการศึกษามาแล้วนั้น ได้ทำการทดสอบทั้งในช่องสัญญาณแบบเกาส์และช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง ซึ่งได้แบ่งผลออกตามกระบวนการผสมสัญญาณเชิงแสงซึ่งมีทั้งหมด 6 รูปแบบดังต่อไปนี้

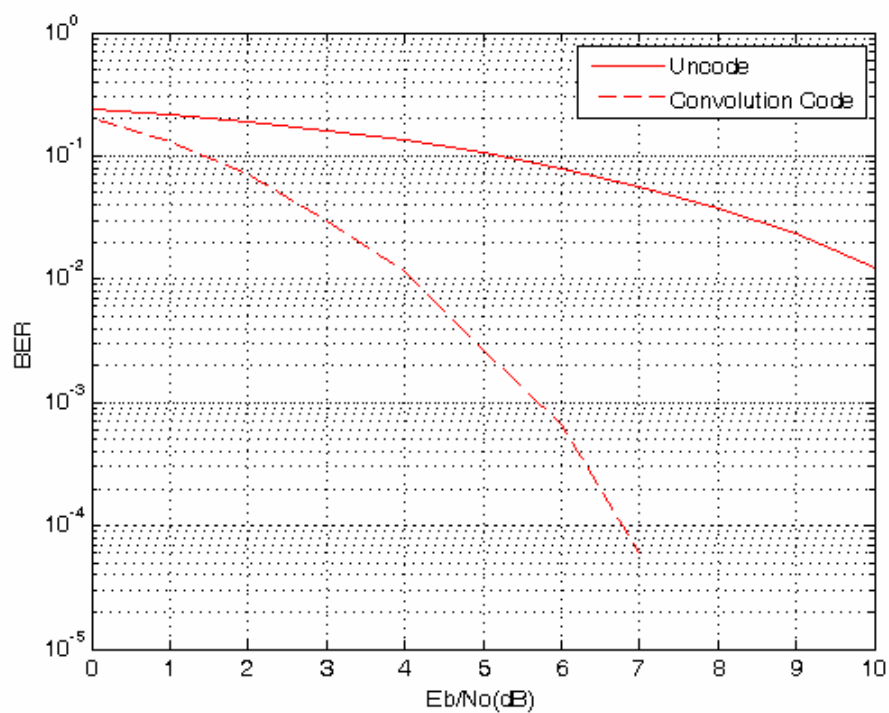
ก. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการไม่เข้ารหัส ในการผสมสัญญาณแบบ On-Off Keying แสดงดังรูปที่ 5.24 จากกราฟพบว่าในช่องสัญญาณแบบบีทซ์ของนั้นการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันจะทำให้อัตราความผิดพลาดบิตเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยน้อยกว่า 3 โฟตอนต่อสล็อต เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 โฟตอนต่อสล็อต ทำให้เกิดความผิดพลาดในกระบวนการตัดสินใจที่อาศัยค่า Threshold สูงขึ้นเพราะค่าของสัญญาณรบกวนเฉลี่ยและจำนวนโฟตอนเฉลี่ยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์นั้รหัสแบบคอนโวลูชันสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตได้ทุกค่า อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่าสัญญาณที่ส่งเข้าไปในช่องสัญญาณ ทำให้กระบวนการตัดสินใจที่อาศัยค่า Threshold มีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นน้อย จึงสามารถสรุปได้ว่ารหัสแบบคอนโวลูชันสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ดี

ข. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการไม่เข้ารหัส ในการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน แสดงดังรูปที่ 5.25 จากกราฟพบว่าในช่องสัญญาณแบบบีทซ์ของนั้นการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันจะทำให้อัตราความผิดพลาดบิตเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยน้อยกว่า 2 โฟตอนต่อสล็อต ซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 โฟตอนต่อสล็อต ทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจมีค่าสูงขึ้นเพราะค่าของสัญญาณรบกวนเฉลี่ยและจำนวนโฟตอนเฉลี่ยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์นั้รหัสแบบคอนโวลูชันสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตได้ทุกค่า อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยทำให้กระบวนการตัดสินใจมีความคลาดเคลื่อนน้อย จึงสรุปได้ว่ารหัสแบบคอนโวลูชันจึงสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ดี

ค. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการไม่เข้ารหัส ในการผสมสัญญาณแบบ 4-พัลส์โพสิชันมอดูเลชัน แสดงดังรูปที่ 5.26 จากกราฟพบว่าในช่องสัญญาณแบบบีทซ์ของนั้นการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันจะสามารถลดอัตราความผิดพลาดของบิตลงได้ก็ต่อเมื่อเมื่อมีค่าของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยมากกว่า 2 โฟตอนต่อสล็อต อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 โฟตอนต่อสล็อต ทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจเพราะค่าของสัญญาณรบกวนเฉลี่ยและจำนวนโฟตอนเฉลี่ยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์นั้รหัสแบบคอนโวลูชันสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตได้ทุกค่า อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยทำให้กระบวนการตัดสินใจมีความคลาดเคลื่อนน้อย สามารถสรุปได้ว่ารหัสแบบคอนโวลูชันจึงสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ดี

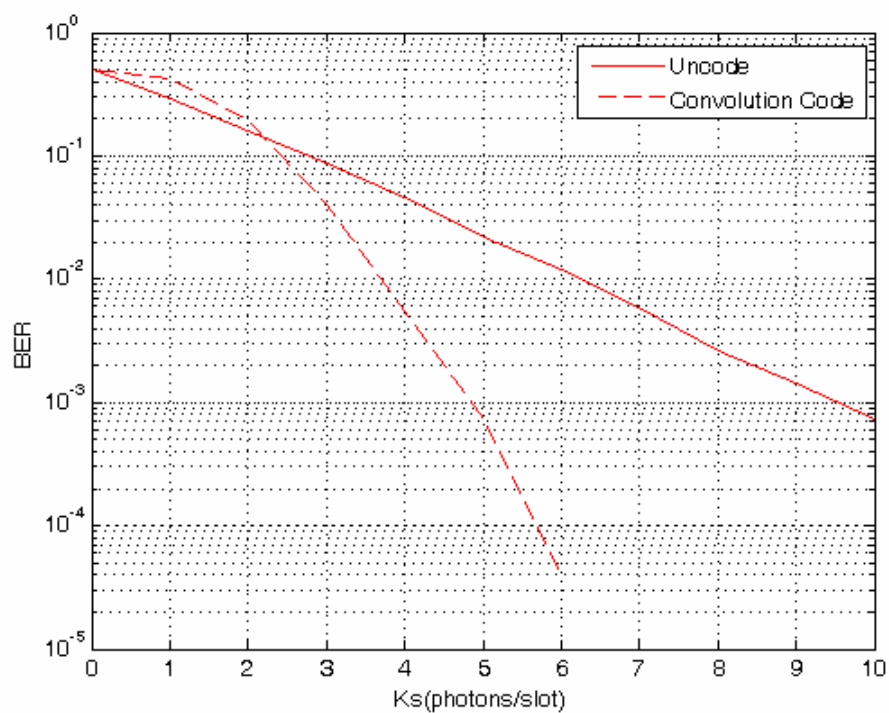


(a)

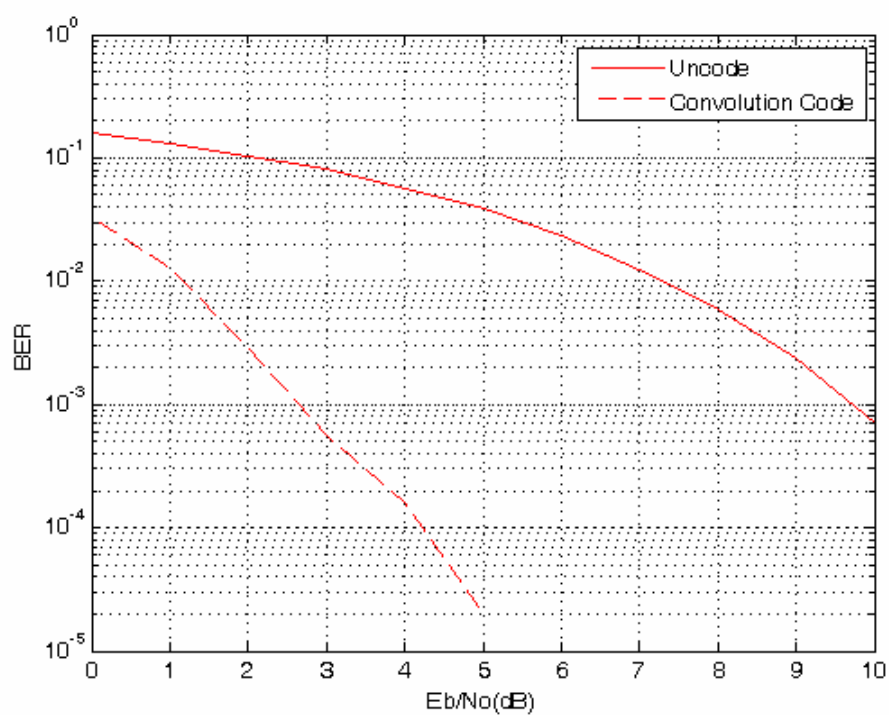


(b)

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



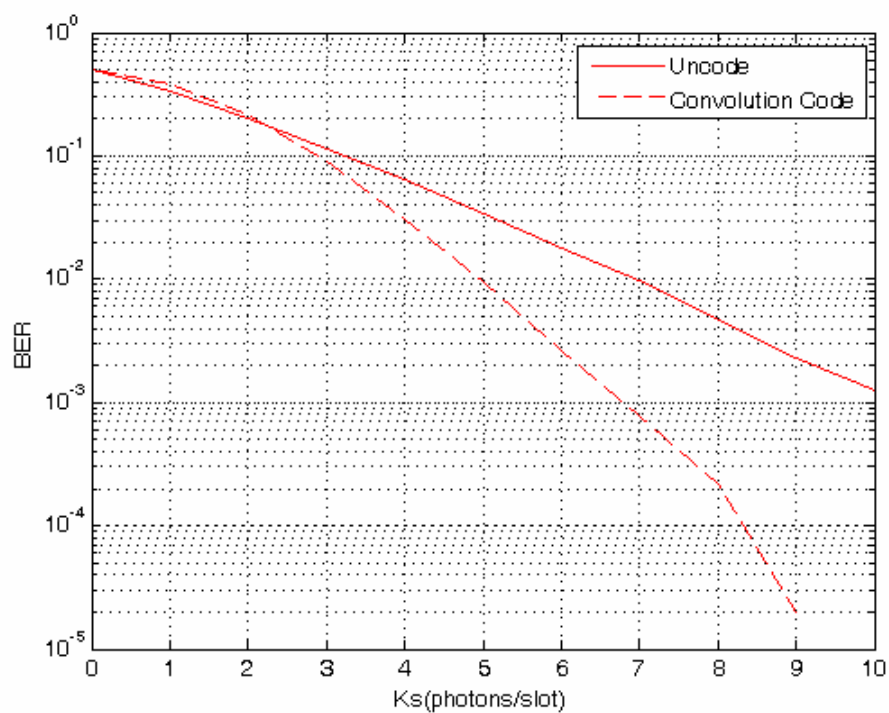
(a)



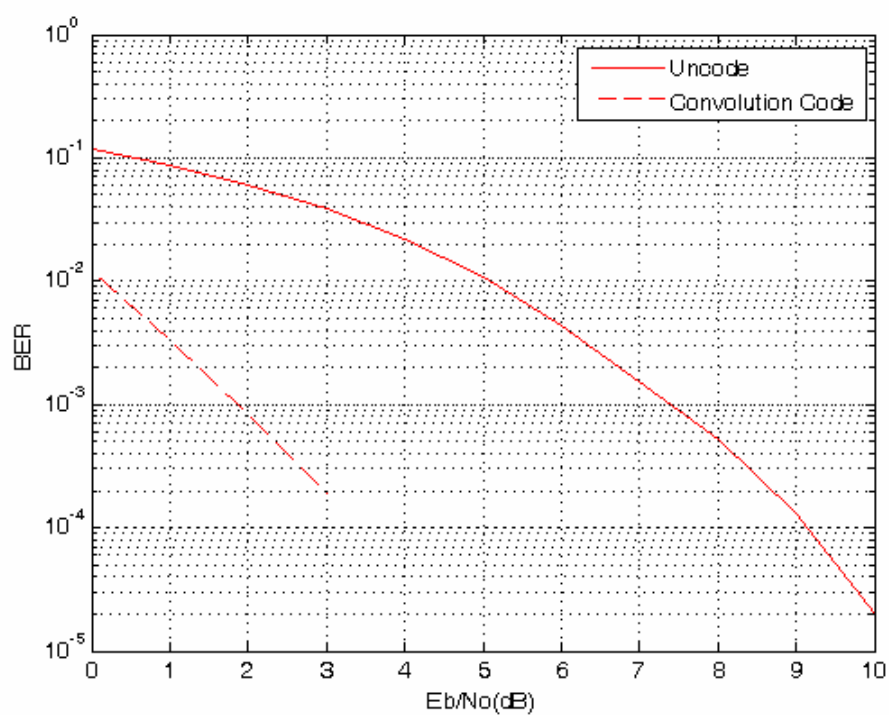
(b)

รูปที่ 5.25 การผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส

(a) ช่องสัญญาณแบบปีวส์ของ (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์

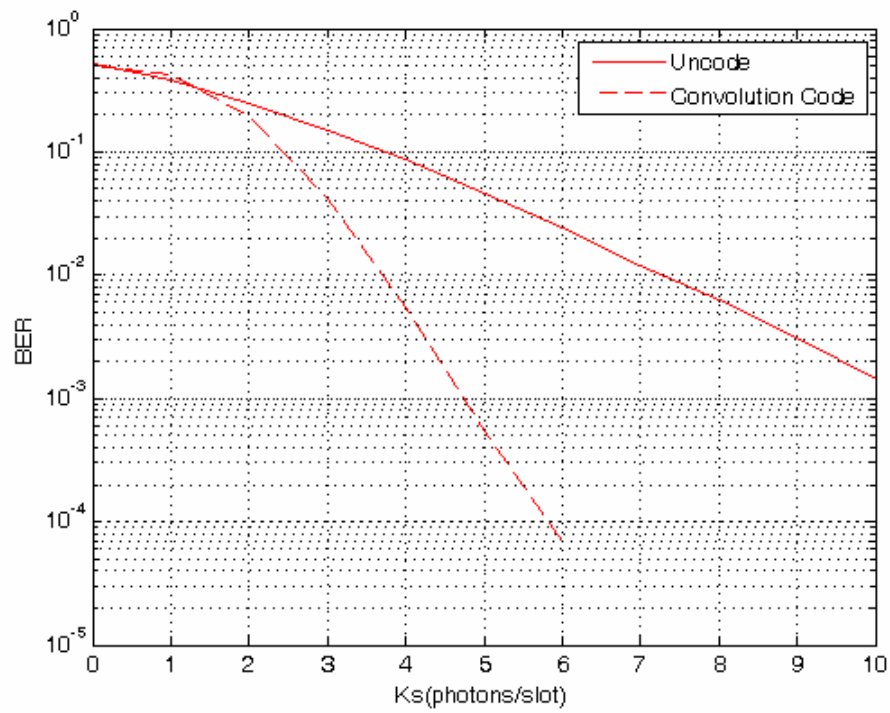


(a)

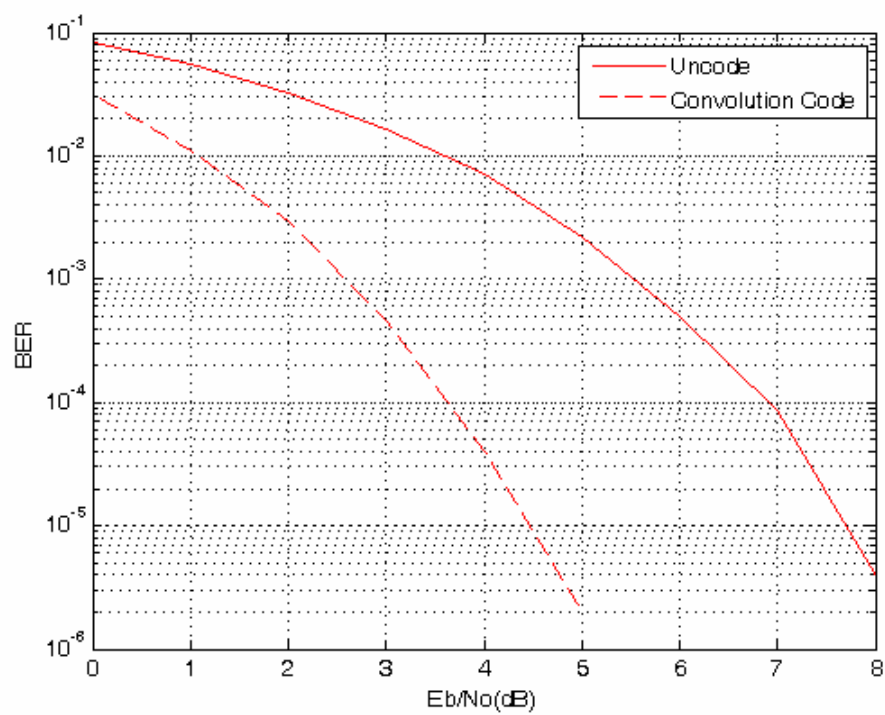


(b)

รูปที่ 5.26 การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส
 (a) ช่องสัญญาณแบบปัสซอง (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์



(a)



(b)

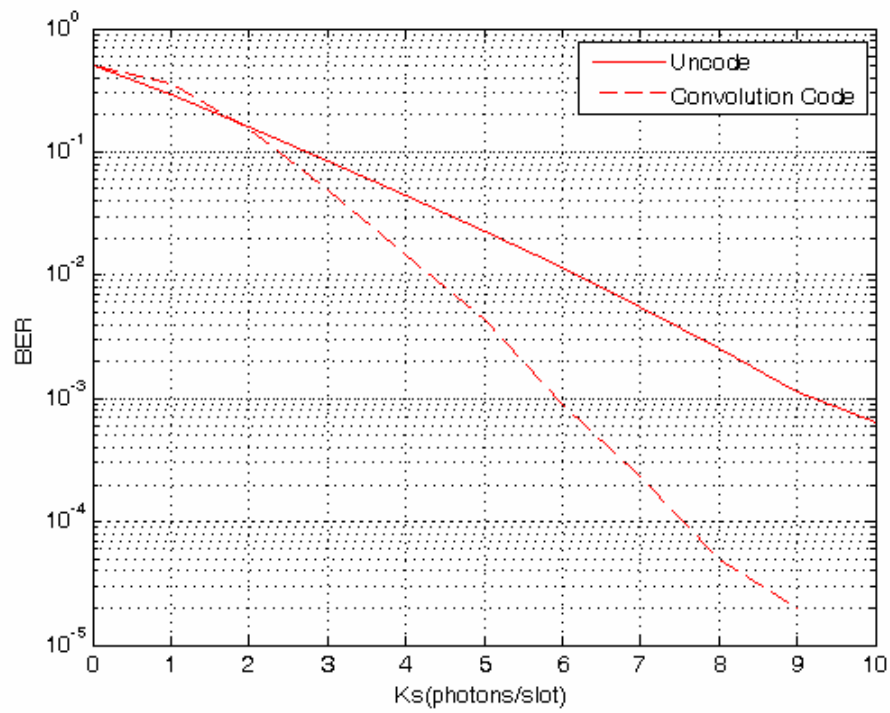
รูปที่ 5.27 การผสมสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation ที่มีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส (a) ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง (b) ช่องสัญญาณแบบเกาส์

ง. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการไม่เข้ารหัส ในการผสมสัญญาณแบบ (4, 2) Multi-pulse Pulse Position Modulation แสดงดังรูปที่ 5.27 จากกราฟพบว่าในช่องสัญญาณแบบปั๊มช่องนั้นการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนั้นจะลดอัตราความผิดพลาดของบิตลงก็ต่อเมื่อเมื่อมีค่าของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยมากกว่าหรือเท่ากับ 2 โฟตอนต่อสล็อต เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 โฟตอนต่อสล็อต ทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจเพราะค่าของสัญญาณรบกวนเฉลี่ยและจำนวนโฟตอนเฉลี่ยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ นั้นรหัสแบบคอนโวลูชันสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตได้ทุกค่า เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยทำให้การตัดสินใจมีความคลาดเคลื่อนน้อย รหัสแบบคอนโวลูชันจึงสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ดีมาก

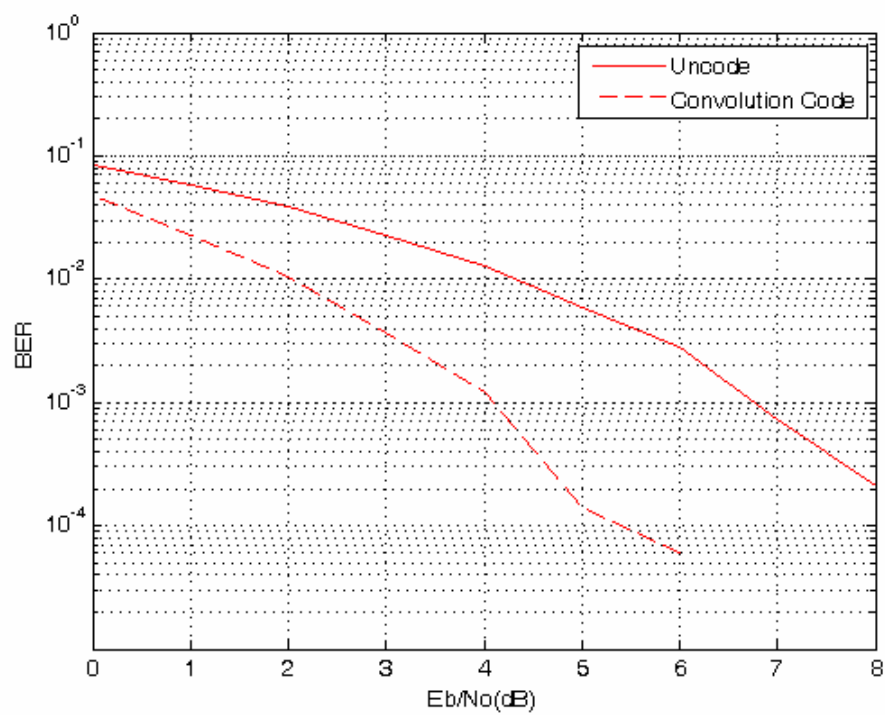
จ. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการไม่เข้ารหัส ในการผสมสัญญาณแบบ (3,2) Overlapping Pulse Position Modulation แสดงดังรูปที่ 5.28 พบว่าในช่องสัญญาณแบบปั๊มช่องนั้นการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนั้นจะลดอัตราความผิดพลาดของบิตลงก็ต่อเมื่อเมื่อมีค่าของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยมากกว่า 2 โฟตอนต่อสล็อต อันเนื่องมาจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 โฟตอนต่อสล็อต ทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจเพราะค่าของสัญญาณรบกวนเฉลี่ยและจำนวนโฟตอนเฉลี่ยมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์นั้นรหัสแบบคอนโวลูชันสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตได้ทุกๆ ค่า เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าน้อยทำให้การตัดสินใจมีความคลาดเคลื่อนน้อย ทำให้รหัสแบบคอนโวลูชันสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ดี

ฉ. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการไม่เข้ารหัส ในการผสมสัญญาณแบบ 4-Differential Pulse Position Modulation แสดงดังรูปที่ 5.29 พบว่าในช่องสัญญาณแบบปั๊มช่องนั้นการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนั้นจะลดอัตราความผิดพลาดของบิตลงก็ต่อเมื่อเมื่อมีค่าของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยมากกว่าหรือเท่ากับ 2 โฟตอนต่อสล็อต เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1 โฟตอนต่อสล็อต ทำให้เกิดความผิดพลาดในการตัดสินใจเพราะค่าของสัญญาณรบกวนเฉลี่ยและจำนวนโฟตอนเฉลี่ยใกล้เคียงกัน ส่วนช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ รหัสแบบคอนโวลูชันสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตได้ทุกๆ ค่า เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยทำให้การตัดสินใจมีความคลาดเคลื่อนน้อย ทำให้รหัสแบบคอนโวลูชันแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดจากสัญญาณรบกวนได้ดี

จากทั้งหมดสรุปได้ว่าการเข้ารหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนโวลูชันนั้นสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดของข้อมูลได้มากโดยเฉพาะในช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ที่สามารถลดอัตราความผิดพลาดของข้อมูลได้ทุกๆ ค่า ส่วนช่องสัญญาณรบกวนแบบปั๊มช่องนั้นจะสามารถลดอัตราความผิดพลาดลงได้เป็นอย่างมากเมื่อมีค่าของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้น

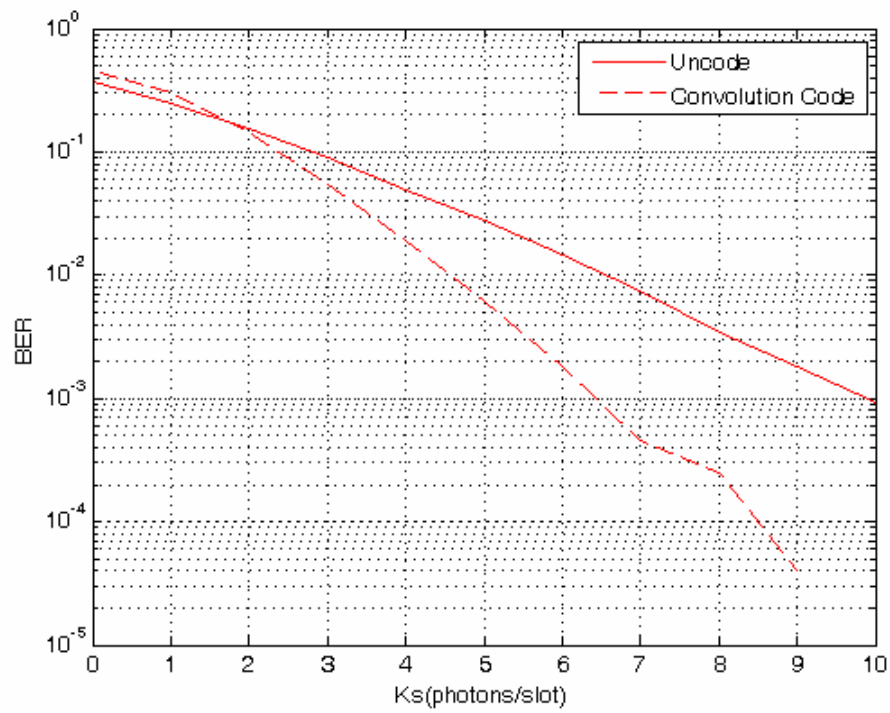


(a)

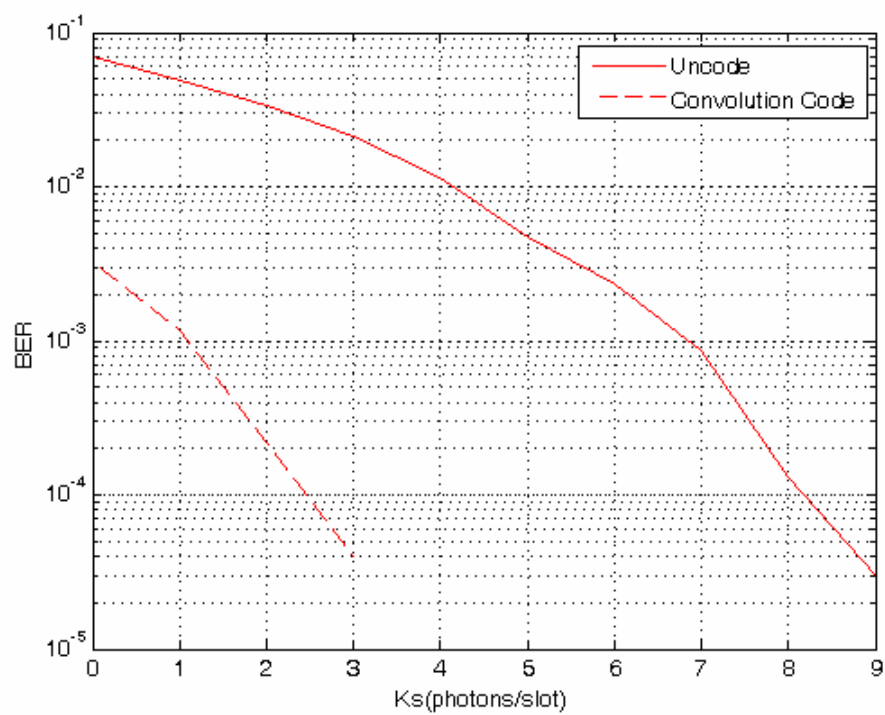


(b)

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



(a)



(b)

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

5.5.5 ผลการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ

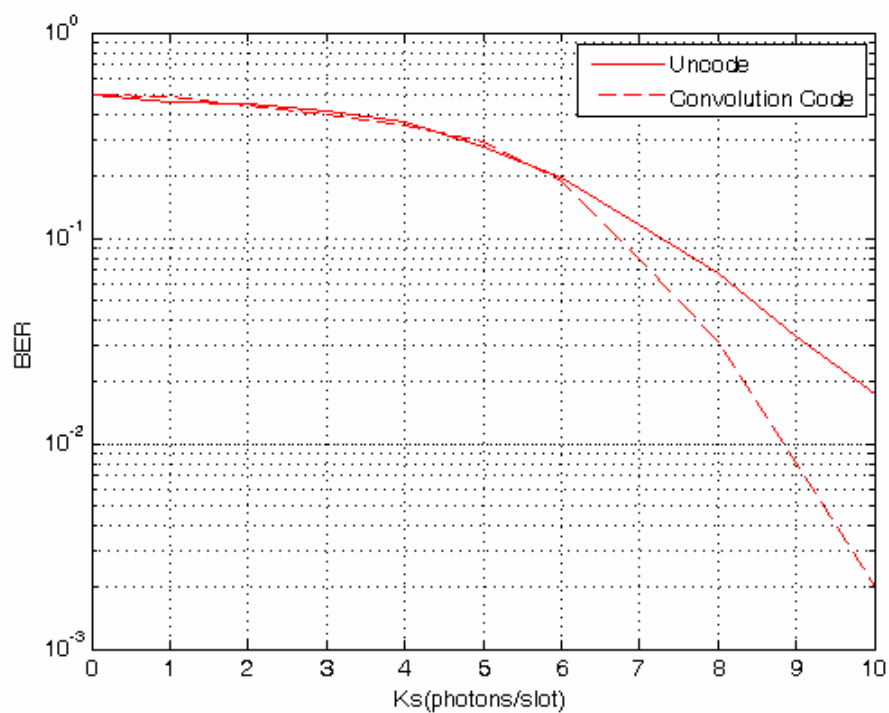
ผลการทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับและรหัสแบบคอนโวลูชันเป็นดังต่อไปนี้

ก. การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับกับรหัสแบบคอนโวลูชันแสดงดังรูปที่ 5.30 ซึ่งเป็นการทดสอบการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ค่าของสัญญาณรบกวนเฉลี่ยเท่ากับ 4 โฟตอนต่อสล็อต พบว่ารหัสแบบคอนโวลูชันสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้เมื่อค่าของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยเพิ่มมากขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพในการแก้ไขข้อผิดพลาดนั้นขึ้นอยู่กับค่าของสัญญาณรบกวนที่ใช้ด้วย

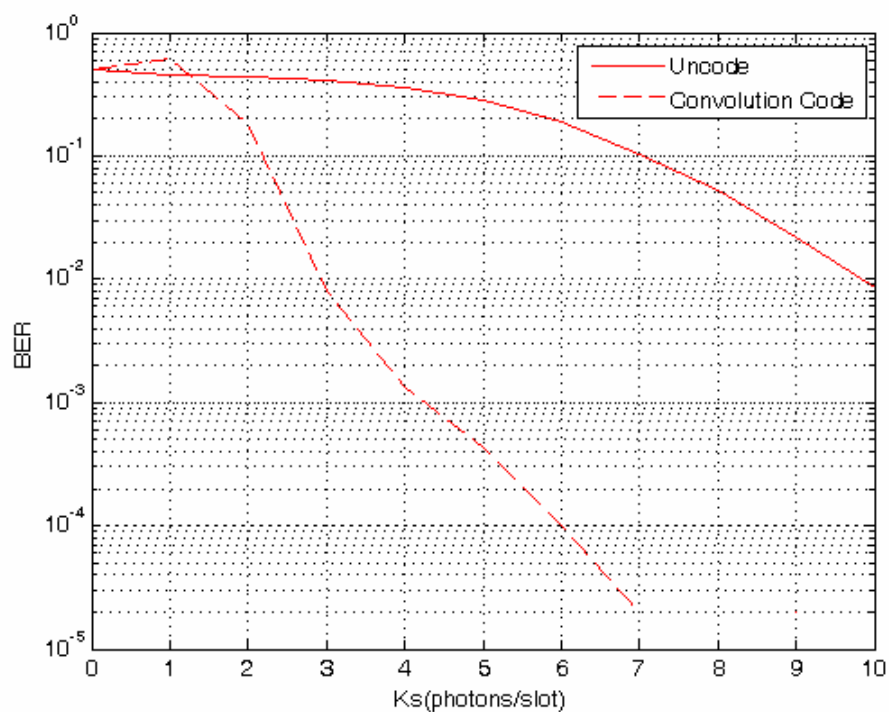
ข. การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันกับรหัสแบบคอนโวลูชันแสดงดังรูปที่ 5.31 ซึ่งเป็นการทดสอบการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันที่ค่าของสัญญาณรบกวนเท่ากับ 4 พบว่ารหัสแบบคอนโวลูชันสามารถแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้เป็นอย่างดี ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากการเลือกค่าของสัญญาณที่ใช้ส่งมีความเหมาะสม รวมถึงการใช้ตำแหน่งการตัดสินใจที่เหมาะสมก่อนที่จะทำการถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บีรายละเอียดของการคิดคำนวณหาค่าตำแหน่งการตัดสินใจและการเลือกค่าของสัญญาณสำหรับการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันนั้นแสดงไว้ในภาคผนวก ก

ค. การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันกับรหัสแบบคอนโวลูชัน ที่มีการสร้างรูปแบบของข้อมูลให้เหมาะสมก่อนทำการส่งสัญญาณ แสดงดังรูปที่ 5.32 พบว่ากระบวนการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันที่มีการลดจำนวนบิตข้อมูลบางส่วนและเพิ่มบิตเพิ่มเติมซึ่งรายละเอียดได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข นั้น การตัดสินใจแบบประมาณค่านั้นสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิตลงได้มากในช่วงที่อัตราส่วนระหว่างจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อสล็อตตัวแรกกับจำนวนสัญญาณรบกวนเฉลี่ยต่อสล็อตมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานในการส่งเฉลี่ยซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.5 ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถนำมาใช้งานได้ ส่วนในช่วงอื่นนั้นอัตราความผิดพลาดต่อบิตจะเพิ่มขึ้น แต่ยังคงต่ำกว่าค่าที่ไม่มีการเข้ารหัสซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากตำแหน่งการตัดสินใจในกระบวนการแยกสัญญาณมีค่าไม่เหมาะสม ส่วนการตัดสินใจแบบคำนวณนั้นสามารถลดค่าอัตราความผิดพลาดบิตลงได้มากกว่าไม่เข้ารหัส

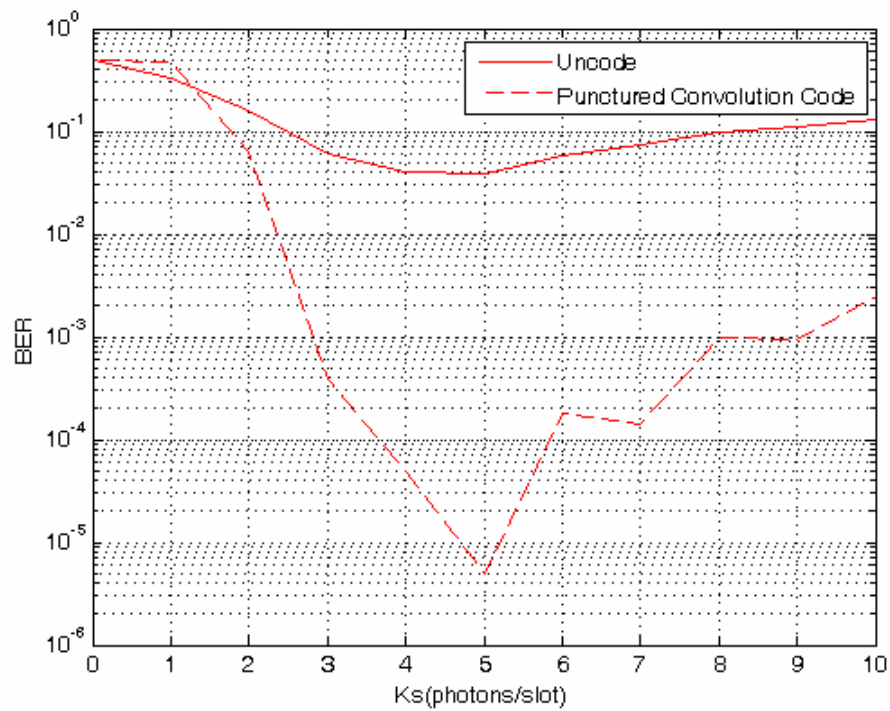
ง. การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันกับรหัสแบบคอนโวลูชัน ซึ่งจะใช้รูปแบบของการส่งสัญญาณเป็นรูปแบบที่มีการเพิ่มระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยเพื่อให้รองรับกับรูปแบบของข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน แสดงดังรูปที่ 5.33



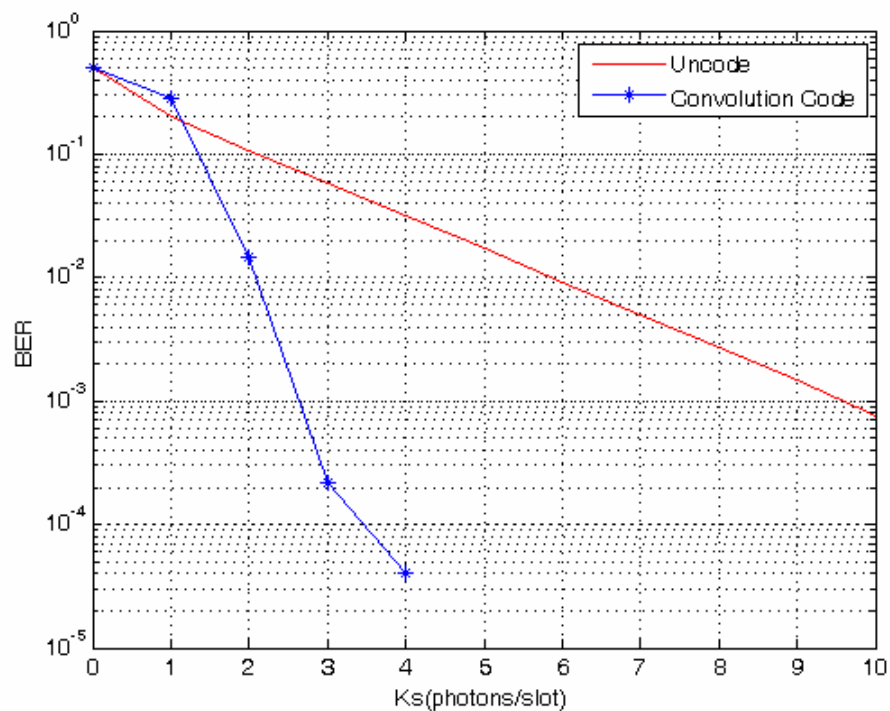
รูปที่ 5.30 การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับเมื่อมีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส



รูปที่ 5.31 การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเมื่อมีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส

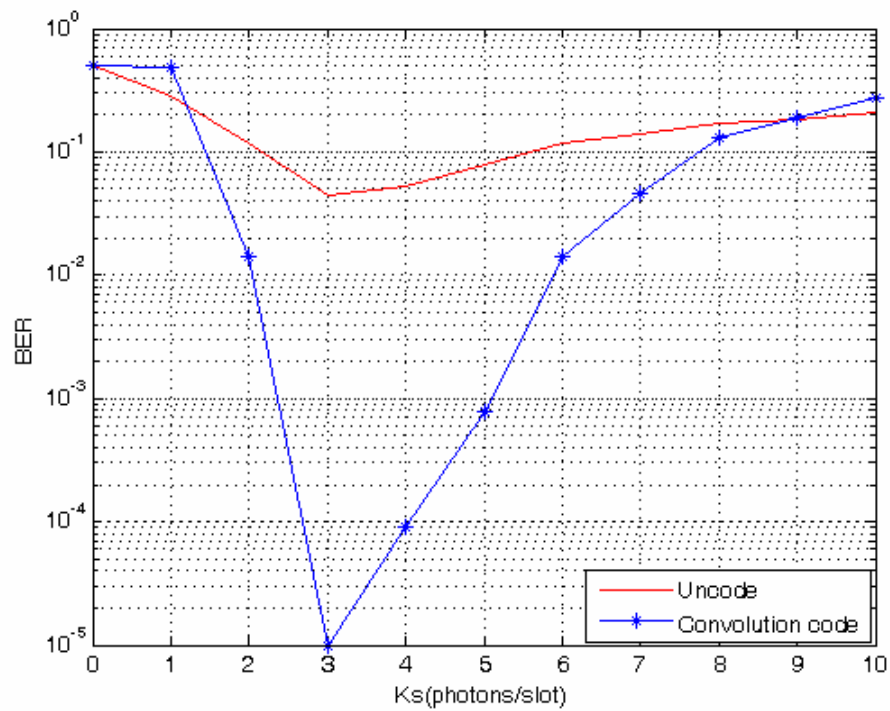


(a)

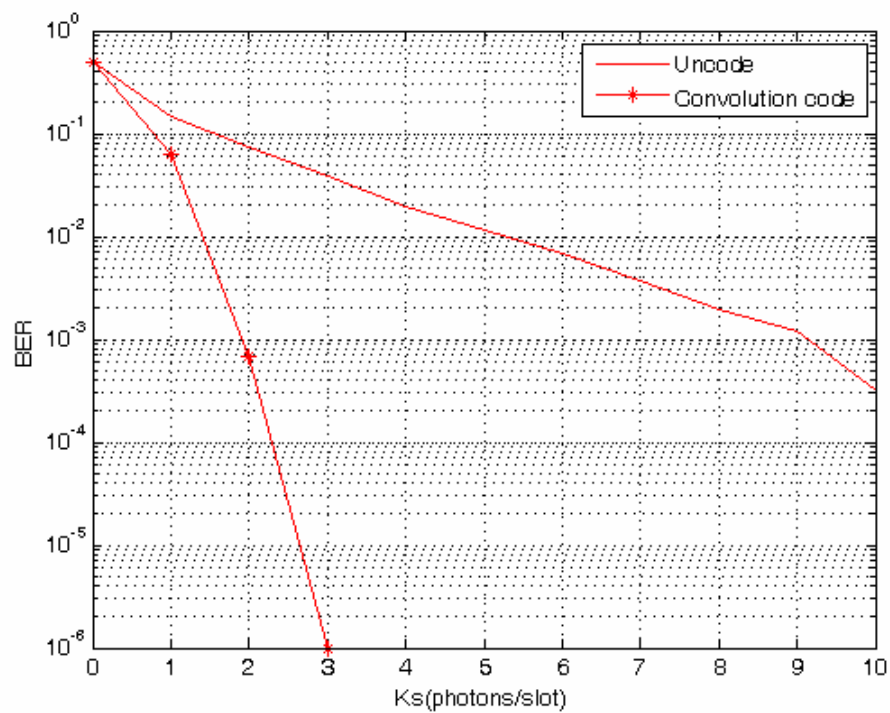


(b)

รูปที่ 5.32 การสื่อสารแบบโฟตอนสีระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิ
 ชั้นมอดูเลชันที่มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบข้อมูลเมื่อมีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส (a) การ
 ตัดสินใจแบบประมาณค่า (b) การตัดสินใจแบบคำนวณ



(a)



(b)

รูปที่ 5.33 การสื่อสารแบบโฟตอนสื่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิ
 ชั้นมอดูเลชันที่มีการเพิ่มระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยเมื่อมีการเข้ารหัสและไม่เข้ารหัส
 (a) การตัดสินใจแบบประมาณค่า (b) การตัดสินใจแบบคำนวณ

จากกราฟพบว่ากระบวนการเพิ่มระดับโฟตอนเฉลี่ยขึ้นอีกหนึ่งระดับซึ่งได้แสดงรายละเอียดการคำนวณระดับค่าโฟตอนเฉลี่ยไว้ในภาคผนวก ก สามารถนำการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมาใช้งานได้อย่างสมบูรณ์กับรหัสแบบคอนวอลูชัน ซึ่งการตัดสินใจแบบประมาณค่าสามารถลดอัตราความผิดพลาดบิดลงได้มากในช่วงที่อัตราส่วนระหว่างจำนวนโฟตอนเฉลี่ยต่อสล็อตตัวแรกกับจำนวนสัญญาณรบกวนเฉลี่ยต่อสล็อตมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าพลังงานในการส่งเฉลี่ยซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.5 ซึ่งเป็นช่วงที่นำมาใช้งานได้ ส่วนในช่วงที่มากกว่า 3.5 นั้นอัตราความผิดพลาดต่อบิตจะเพิ่มขึ้น แต่ยังคงต่ำกว่าค่าที่ไม่มีการเข้ารหัสซึ่งเป็นผลอันเนื่องมาจากตำแหน่งการตัดสินใจในกระบวนการแยกสัญญาณมีค่าไม่เหมาะสม ส่วนการตัดสินใจแบบคำนวณสามารถลดค่าอัตราความผิดพลาดบิดลงได้มากกว่าเมื่อไม่เข้ารหัส

จากผลการทดสอบการทำงานของการทำงานของการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ การสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ และรหัสแบบคอนวอลูชัน ทั้งในช่องสัญญาณแบบปั๊มช่องและช่องสัญญาณแบบเกาส์ที่ได้กล่าวมาทั้งหมด สามารถสรุปได้ดังนี้

- การเปรียบเทียบผลของการจำลองการทำงานของระบบสื่อสารโดยใช้การผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ เปรียบเทียบค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตที่คำนวณได้จากสมการ สามารถนำมาสรุปเป็นตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 การเปรียบเทียบการจำลองการทำงานของการทำงานของการผสมสัญญาณแบบต่างๆ กับความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตที่คำนวณได้จากสมการ

การผสมสัญญาณ	ค่าทางทฤษฎีของช่องสัญญาณแบบปั๊มช่อง	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

- ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณโดยพิจารณาจากค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูล(Throughput) สรุปได้ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณโดยพิจารณาจากค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูล (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

- ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณโดยพิจารณาจากค่าจำนวนสล็อตที่เท่ากันสรุปได้ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณโดยพิจารณาจากค่าจำนวนสล็อตที่เท่ากัน

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 การสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตที่คำนวณจากสมการสามารถสรุปเป็นตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 การเปรียบเทียบการจำลองการทำงานของ การสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดบิตที่คำนวณได้จากสมการ

การผสมสัญญาณ	การตัดสินใจแบบประมาณค่า	การตัดสินใจแบบคำนวณ
การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ	มีความใกล้เคียงกันมากมีการเกิดจุด Return point	มีค่าใกล้เคียงกัน
การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับ BPPM	มีความใกล้เคียงกันมาก เกิดจุด Return point	มีค่าใกล้เคียงกันจนกราฟเกือบซ้อนทับกัน
การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับ BPPM ที่มีการเพิ่มระดับของโฟตอน	การจำลองการทำงานให้ผลที่ต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีเล็กน้อยเกิดจุด Return point	การจำลองการทำงานให้ผลที่ต่ำกว่าค่าทางทฤษฎีเล็กน้อย

- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับซึ่งมีการนำเสนอการประยุกต์ใช้งานกระบวนการผสมสัญญาณออกมาในหลายรูปแบบ สามารถนำผลการเปรียบเทียบมาสรุปได้เป็นตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนหลายระดับ

การผสมสัญญาณ	การตัดสินใจแบบประมาณค่า	การตัดสินใจแบบคำนวณ
การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับกับ การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้ งานร่วมกับ BPPM	การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ ระดับที่ใช้งานร่วมกับ BPPM ดีกว่า	การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ ระดับที่ใช้งานร่วมกับ BPPM ดีกว่า
การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้ งานร่วมกับ BPPM และการสื่อสาร แบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับ BPPM ที่มีการเพิ่มระดับของโฟตอน	แบบที่มีการเพิ่มระดับจะมี ประสิทธิภาพลดลงเมื่อ มากกว่าจุด Return point	มีค่าใกล้เคียงกัน

- การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณแบบต่างๆ เมื่อมีการนำรหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดข้อมูลแบบคอนวูลูชันมาใช้งานกับการไม่เข้ารหัส สามารถนำมาสรุปได้เป็นตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณแบบต่างๆ เมื่อมีการเข้ารหัสแบบคอนวูลูชันกับไม่เข้ารหัสที่มีค่าของสัญญาณรบกวนเท่ากับ 1

การผสมสัญญาณ	ช่องสัญญาณแบบบิวส์ซิง	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 ที่นำมาประยุกต์ใช้งานกับการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันนั้นจะลดค่าอัตราความผิดพลาดได้ดีมากกว่าการผสมสัญญาณต้นแบบทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่จะนำมาใช้ในการทดสอบเช่นอัตราการส่งผ่านข้อมูลหรือจำนวนสล็อตที่เท่ากันส่วนการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับนั้นเมื่อมีการนำมาใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันจะให้ประสิทธิภาพในการส่งสัญญาณดีกว่าแบบไม่ใช้งานร่วมกัน และรหัสแบบคอนโวลูชันเป็นรหัสที่สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดเป็นอย่างดีโดยขึ้นอยู่กับค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการเข้ารหัสและอัตราส่วนระหว่างโฟตอนเฉลี่ยต่อสัญญาณรบกวนเฉลี่ยในช่องสัญญาณแบบบีบอัดของ