

บทที่ 4

วิธีการทดสอบและข้อกำหนด

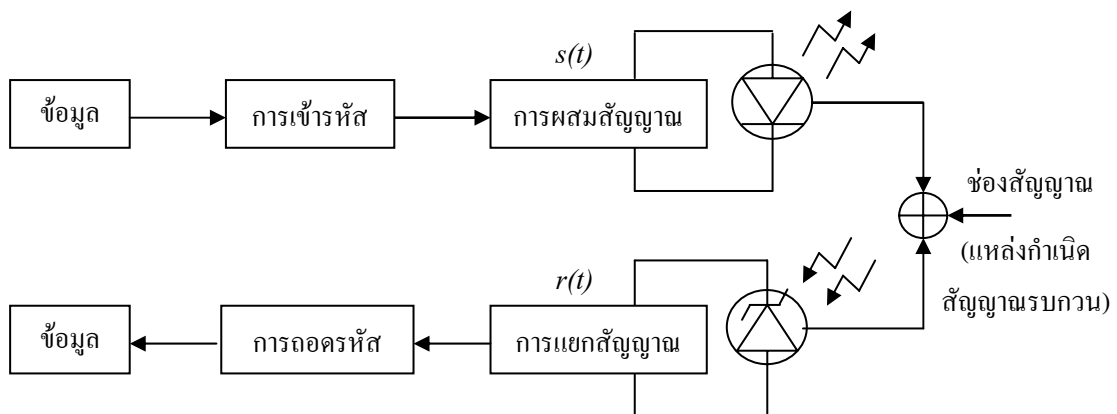
บทนี้กล่าวถึงรูปแบบของการออกแบบการจำลองการทำงานของการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ การสื่อสารแบบโฟตอนระดับเปรียบเทียบกับสมการการคำนวณหาอัตราความผิดพลาดและการนำมาประยุกต์ใช้งานกับรหัสเพื่อแก้ไขข้อผิดพลาดแบบคอนวูลูชัน ซึ่งได้แบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยๆ ดังต่อไปนี้

4.1 การออกแบบระบบสื่อสาร

การทำงานของระบบสื่อสารนั้นสามารถออกแบบจำลองการทำงานของระบบเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบสื่อสารโดยการตรวจสอบหาอัตราความผิดพลาดในการรับส่งข้อมูล ซึ่งในการออกแบบจำลองการทำงานเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานนั้นประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญได้แก่ ภาควิทยุ (Transmitter: Tx) ภาควิทยุ (Receiver: Rx) และช่องสัญญาณสื่อสาร (Channel) ซึ่งในแต่ละส่วนมีส่วนประกอบย่อยๆ ดังรูปที่ 4.1 และมีหลักการออกแบบจำลองการทำงานดังต่อไปนี้

4.1.1 กระบวนการสร้างข้อมูลแบบสุ่ม (Data Random Generator)

กระบวนการสร้างข้อมูลแบบสุ่มเป็นกระบวนการเริ่มต้นของการจำลองการทำงานของระบบสื่อสาร ซึ่งเป็นกระบวนการสุ่มข้อมูลดิจิทัลที่จะใช้ในการตรวจสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบสื่อสาร โดยจำนวนของข้อมูลที่เกิดขึ้นในการสุ่มนี้ต้องมีสัดส่วนที่เท่ากัน ตัวอย่างเช่น เมื่อต้องการส่งข้อมูลครั้งละ 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 ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเข้ารหัสแบบคอนวอลูชันซึ่งเป็นรหัสชนิดหนึ่งที่มีประสิทธิภาพในการแก้ไขข้อผิดพลาดที่เป็นที่ยอมรับและรู้จักกันโดยทั่วไป

4.1.3 การผสมสัญญาณ (Modulation)

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

4.1.4 ช่องสัญญาณ (Channel)

ช่องสัญญาณนั้นถือเป็นตัวกลางในการส่งผ่านสัญญาณจากภาคส่งไปยังภาครับ และเป็นส่วนที่มีความสำคัญสำหรับระบบสื่อสาร สำหรับการจำลองการทำงานของช่องสัญญาณในที่นี้นั้นเป็นการออกแบบสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ ซึ่งช่องสัญญาณแต่ละรูปแบบนั้นมีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาสัญญาณรบกวนจำนวน 2 รูปแบบคือสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจริงในระบบสื่อสารและสัญญาณรบกวนแบบปัวซองซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นในระบบสื่อสารเชิงแสง

4.1.5 การแยกสัญญาณ (Demodulation)

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

4.1.6 การถอดรหัสข้อมูล (Decoding)

การถอดรหัสข้อมูลเป็นกระบวนการที่ต้องมีความสอดคล้องกับกระบวนการเข้ารหัสว่ามีการเข้ารหัสแบบใด กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีรูปแบบที่สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดที่

เกิดขึ้นจากการตัดสินใจผิดพลาดในส่วนของการแยกสัญญาณให้มีค่าใกล้เคียงกับข้อมูลที่เกิดจากกระบวนการสุ่มมากที่สุด ซึ่งในการท้าวิจัยนี้ได้เลือกการเข้ารหัสแบบคอนวอลูชันมาใช้งานและได้เลือกศึกษากระบวนการถอดรหัสแบบวิธีไวเทอร์บี

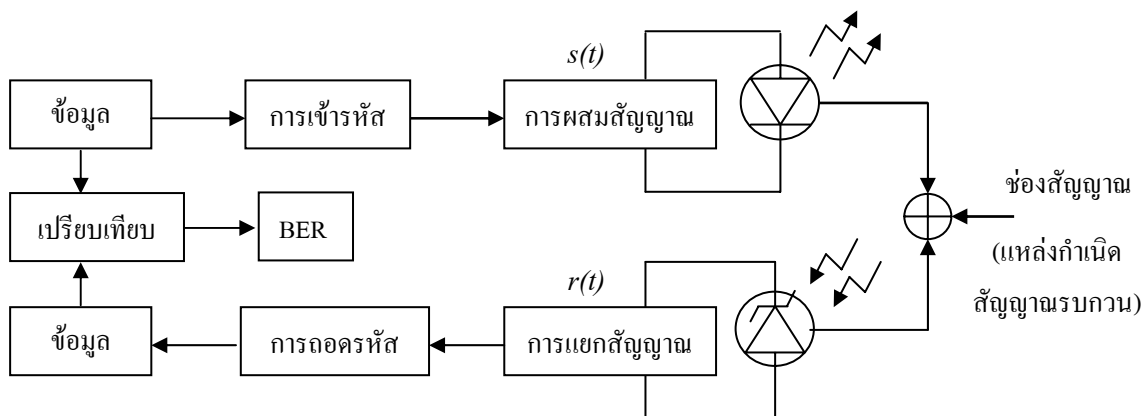
4.1.7 การหาอัตราความผิดพลาดของข้อมูล

กระบวนการนี้เป็นการนำข้อมูลที่ได้จากภาคถอดรหัสหรือจากการแยกสัญญาณมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่สร้างขึ้นแบบสุ่ม 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

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



รูปที่ 4.2 รูปแบบของการจำลองการทำงานของระบบสื่อสารเชิงแสง

4.2.1 ช่องสัญญาณแบบเกาส์

ช่องสัญญาณแบบเกาส์เป็นช่องสัญญาณที่เป็นพื้นฐานในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของระบบการสื่อสารต่างๆ เป็นช่องสัญญาณที่เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปและมีการทดสอบประสิทธิภาพอยู่มาหลายรูปแบบ ซึ่งมีผู้นำเสนอวิธีการสร้างสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ไว้หลายวิธีด้วย แต่วิธีที่เหมาะสมกับการทดสอบทางด้านซอฟต์แวร์คือวิธีการของ Box-muller ซึ่งในการทดสอบการทำงานของช่องสัญญาณแบบเกาส์จะเป็นการทดสอบเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ σ^2 เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายของสัญญาณรบกวนเมื่อค่า σ^2 สูงขึ้น

4.2.2 ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซอง

ช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองเป็นช่องสัญญาณสื่อสารที่ใช้ทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารทางแสงซึ่งเป็นผลมาจากสัญญาณที่เกิดขึ้นจากตัวจับสัญญาณที่ภากรับ วิธีการสร้างช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองมีอยู่ 2 รูปแบบ ดังที่นำเสนอในหัวข้อ 2.4.2.4 ซึ่งในการทดสอบการทำงานของช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองจะเป็นการทดสอบเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ λ เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายของสัญญาณรบกวนเมื่อค่า λ สูงขึ้น

จากการทดสอบการทำงานของช่องสัญญาณทั้งสองแบบที่กล่าวมาแล้วนั้นสามารถนำโปรแกรมที่ได้มาใช้งานกับการจำลองการทำงานของระบบสื่อสารที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1 ซึ่งจะนำมาใช้งานร่วมกับกระบวนการผสมสัญญาณแบบต่างๆ ที่ได้นำเสนอในหัวข้อ 2.7 เพื่อเปรียบเทียบอัตราความผิดพลาดของข้อมูลที่เกิดขึ้นในช่องสัญญาณ

4.3 การออกแบบการผสมสัญญาณเชิงแสง

การออกแบบการผสมสัญญาณเป็นการจำลองการทำงานของระบบสื่อสารเพื่อคำนวณค่าอัตราความผิดพลาดบิต (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 หรือไม่ วิธีการออกแบบการทำงานของกระบวนการผสมสัญญาณสามารถทำได้โดยแทนค่าข้อมูล “1” ด้วยค่า 1 และแทนค่าข้อมูล “0” ด้วยค่า 0 ส่วนการแยกสัญญาณสามารถทำได้โดยทำการตัดสินใจโดยการคำนวณหาค่า Threshold แล้วเปรียบเทียบสัญญาณที่รับได้กับค่า Threshold ที่คำนวณได้ ถ้าสัญญาณที่ได้รับมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่า Threshold จะตัดสินใจให้เป็นค่าดิจิทัล “1” และถ้าค่าที่ได้รับมีค่าน้อยกว่าค่า Threshold จะตัดสินใจให้เป็นค่าดิจิทัล “0”

สมการหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาด (PE) ในช่องสัญญาณแบบบีวส์ซิงคือ

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

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 ซึ่งวิธีการออกแบบการทำงานของระบบสัญญาณสามารถทำได้โดยการแทนค่าข้อมูล “1” ด้วยสัญญาณในช่วงคาบเวลาดังแต่ 0 ถึง $T_b/2$ ด้วยค่า 1 โดยให้เป็นสัญญาณที่ 1 และค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงคาบเวลาดังแต่ $T_b/2$ ถึง T_b ด้วยค่า 0 โดยให้เป็นสัญญาณที่ 2 ส่วนการแทนค่าข้อมูล “0” นั้นจะแทนค่าสัญญาณด้วยค่า 0 ในช่วงคาบเวลาดังแต่ 0 ถึง $T_b/2$ โดยให้เป็นสัญญาณที่ 1 และแทนค่าของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงคาบเวลาดังแต่ $T_b/2$ ถึง T_b ด้วยค่า 1 โดยให้เป็นสัญญาณที่ 2 ส่วนการแยกสัญญาณสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบสัญญาณที่รับได้ในแต่ละครั้งคาบเวลา ถ้าสัญญาณที่ 1 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงคาบเวลาดังแต่ 0 ถึง $T_b/2$ มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสัญญาณที่ 2 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงคาบเวลาดังแต่ $T_b/2$ ถึง T_b จะตัดสินใจให้เป็นค่าดิจิทัล “1” และถ้าสัญญาณที่ 1 หรือสัญญาณ

ที่ได้รับในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ 0 ถึง $T_b/2$ มีค่าน้อยกว่าสัญญาณที่ 2 หรือสัญญาณที่ได้รับในช่วงในช่วงคาบเวลาตั้งแต่ $T_b/2$ ถึง T_b จะตัดสินใจให้เป็นค่าดิจิทัล “0”

สมการคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาด ในช่องสัญญาณแบบปัวส์ซองคือ

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

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

การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันเป็นวิธีการผสมสัญญาณสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้แบนด์วิดท์มากขึ้นเมื่อแทนจำนวนบิตข้อมูลในการส่งสัญญาณเพิ่มขึ้น กระบวนการตรวจจับสัญญาณเป็นการตรวจสอบว่ามีสัญญาณพัลส์ที่ตำแหน่งใดของคาบเวลา ซึ่งวิธีการออกแบบการทำงานของระบบผสมสัญญาณสามารถทำได้โดยการแทนค่าข้อมูลจะทำการแทนค่าสัญลักษณ์ในตำแหน่งต่างๆ ของสล็อตโดยแทนค่าของสัญลักษณ์ที่มีค่า 0 ถึง $M-1$ ในตำแหน่งสล็อตที่ 1 ไปจนถึงสล็อตที่ M ตามลำดับ ซึ่งในตำแหน่งสล็อตที่แทนนั้นจะแทนด้วยค่า 1 ส่วนในสล็อตอื่นๆ จะมีค่าเป็น 0 ดังนี้

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

ส่วนในกระบวนการแยกสัญญาณนั้นสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบสัญญาณที่รับเข้ามาในแต่ละคาบเวลา โดยเลือกสัญญาณในสล็อตที่มีค่าสูงที่สุดแปลงออกมาเป็นค่าแบบสัญลักษณ์ ซึ่งในการทดสอบการจำลองการทำงานเพื่อเปรียบเทียบกับอัตราความผิดพลาดทางทฤษฎีนั้นจะใช้

การผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีจำนวนบิตเท่ากับ 2 ซึ่งจะได้สัญลักษณ์จำนวน 4 ค่า

สมการหาความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดทางสัญลักษณ์ (PWE) ในช่องสัญญาณแบบบีบอัดคือ

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

สมการหาความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดทางสัญลักษณ์ในช่องสัญญาณแบบเกาส์คือ

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

4.3.4 การออกแบบสัญญาณแบบ Multi-pulse Pulse Position Modulation

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

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

สมการคำนวณหาความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดทางสัญลักษณ์ในช่องสัญญาณแบบบีบอัดคือ

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

4.3.5 การออกแบบสัญญาณแบบ Overlapping Pulse Position Modulation

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

ส่วนกระบวนการแยกสัญญาณนั้นสามารถทำได้โดยการเปรียบเทียบสัญญาณที่รับได้ในแต่ละคาบเวลา โดยเลือกสัญญาณในกลุ่มสล็อตที่มีค่าสูงที่สุด แปลงออกมาเป็นค่าแบบสัญลักษณ์ ซึ่งในการทดสอบการจำลองการทำงานของระบบผสมสัญญาณแบบ 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 โดยสล็อตหลังพัลส์แสงในบล็อกสัญญาณจะถูกทำการตรวจจับสัญญาณด้วยเทคนิค Differential ทำให้จำนวนสล็อตที่ใช้ในการส่งมีจำนวนลดลง กระบวนการตรวจจับสัญญาณเป็นการตรวจสอบว่ามีสัญญาณพัลส์เกิดขึ้นที่ตำแหน่งใดของคาบเวลาเช่นเดียวกับการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน แต่เนื่องจากกระบวนการ Differential ที่เกิดขึ้นในตำแหน่งหลังพัลส์จึงทำให้ความผิดพลาดจากสัญญาณรบกวนน้อยกว่าการผสมสัญญาณแบบพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน สำหรับวิธีการออกแบบการทำงานของระบบผสมสัญญาณสามารถทำได้โดยการแทนค่าข้อมูลจะทำการแทนค่าสัญลักษณ์ในตำแหน่งต่างๆ ของสล็อต โดยแทนค่าของสัญลักษณ์ที่มีค่า 0 ถึง $M-1$ ในตำแหน่งสล็อตที่ 1 ไปจนถึงสล็อตที่ M ตามลำดับ ซึ่งในตำแหน่งสล็อตที่แทนนั้นจะแทนด้วยค่า 1 ส่วนในสล็อตอื่นๆ ก่อนหน้าตำแหน่งพัลส์จะมีค่าเป็น 0 ดังนี้

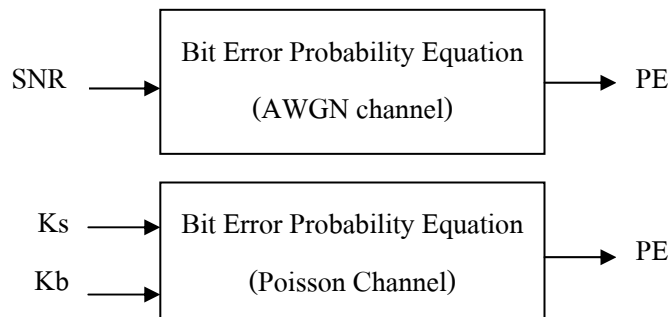
$$\begin{aligned}
s_0 &= (1) \\
s_1 &= (0, 1) \\
&\vdots \\
&\vdots \\
s_{M-2} &= (0, \dots, \dots, 1) \\
s_{M-1} &= (0, \dots, \dots, 0, 1)
\end{aligned} \tag{4.9}$$

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 แล้วนำการผสมสัญญาณแต่ละแบบนั้นมาเปรียบเทียบกับกันดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.3 การคำนวณค่าความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาด ของช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์ และแบบปัวส์ซอง

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณโดยพิจารณาจากค่าอัตราการส่งผ่านข้อมูล (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 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณโดยพิจารณาจากจำนวนสล็อตที่เท่ากัน

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

ออกแบบการทำงานและนำเสนอหลักการคำนวณหาอัตราความผิดพลาดทางทฤษฎีที่ใช้งานกับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ และการนำไปประยุกต์ใช้งานกับการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

4.4.1 การออกแบบการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ

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

ก. วิธีการตัดสินใจโดยการใช้ค่าประมาณจำนวนเท่าของจำนวนโฟตอนที่ส่งสัญญาณ

สำหรับวิธีการตัดสินใจโดยการใช้ค่าประมาณจำนวนเท่าของจำนวนโฟตอนที่ส่งสัญญาณนั้นอาศัยการประมาณจำนวนเท่าจากค่าของ 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

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

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

สำหรับสมการหาความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาดนั้นมีลักษณะเช่นเดียวกับวิธีการตัดสินใจแบบประมาณค่า โดยนำค่าการตัดสินใจแบบการคำนวณทางทฤษฎีไปแทนที่ในสมการเท่านั้น

4.4.2 การออกแบบการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน

การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน (Binary Pulse Position Modulation: BPPM) โดยนำมาประยุกต์ใช้งานกับการสื่อสารแบบโฟตอนสามระดับซึ่งสามารถแทนด้วยสัญญาณแบบไบนารีขนาด 3 บิต ซึ่งจะสามารถแทนด้วยสัญญาณพัลส์จำนวน 6 รูปแบบ ซึ่งมีขนาดความกว้างพัลส์เท่ากับ $T/2$ วินาที และมีความถี่ของโฟตอนคือ $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 4$ และ $\alpha_3 = 9$ ซึ่งกระบวนการจับสัญญาณนั้นอาศัยการเปรียบเทียบตำแหน่งการเกิดของพัลส์แสงว่าเกิดในคาบเวลาใด และจากนั้นก็ทำการตัดสินใจโดยอาศัยค่าตำแหน่งการตัดสินใจ ซึ่งมีการนำตำแหน่งการตัดสินใจของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับมาใช้งานดังนี้

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

สมการหาความน่าจะเป็นในการเกิดความผิดพลาด (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 และนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของการทำงานการตัดสินใจทั้งสองรูปแบบ

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 ค่าเพื่อหาค่าจำนวนโฟตอนเฉลี่ยในระดับที่สูงขึ้นถัดไป 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

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

ซึ่งตำแหน่งการตัดสินใจตำแหน่งที่ 3 ของวิธีการประมาณค่าจะมีค่าเท่ากับ $16m_T$ และจากวิธีการคำนวณหาได้จากสมการทั่วไปของการตัดสินใจในภาคผนวก ก คือ

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

$$m_{T3} = \frac{16Ks - 9Ks}{\log(16Ks + Kb) - \log(9Ks + Kb)} = \frac{7Ks}{\log(16Ks + Kb) - \log(9Ks + Kb)} \quad (4.18)$$

4.4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับแต่ละรูปแบบ

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับแต่ละรูปแบบ เป็นการรวบรวมวิธีการต่างๆ ในการประยุกต์ใช้งานการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานรูปแบบต่างๆ ดังนี้

- การเปรียบเทียบผลของการใช้ตำแหน่งการตัดสินใจแบบประมาณค่าและการตัดสินใจแบบการคำนวณ
- การเปรียบเทียบผลของการนำการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันมาใช้งานร่วมกับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับกับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ
- การเปรียบเทียบผลของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันที่มีการเพิ่มระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยกับแบบการใช้งานของโฟตอนเพียงสามระดับ

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 $[1\ 0\ 0]$ ในการทดสอบนี้ได้นำค่า g_1 มีค่าเท่ากับ $[1\ 1\ 1]$ เนื่องจากต้องการให้ค่าเอาต์พุตที่ได้จากการเข้ารหัสอย่างน้อย 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

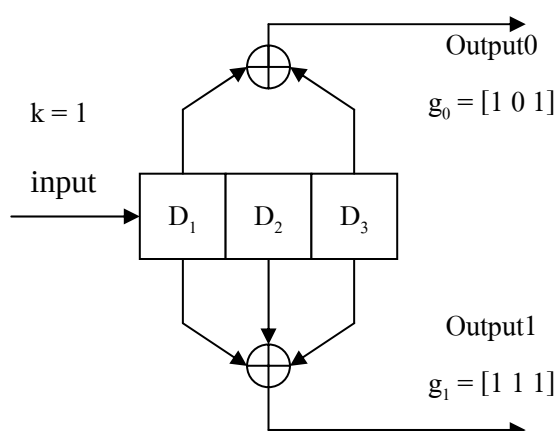
การทดสอบประสิทธิภาพของการผสมสัญญาณเชิงแสงแบบต่างๆ ตามหัวข้อที่ 4.3 กับรหัสแบบคอนโวลูชันนั้นจะทำการทดสอบทั้งในช่องสัญญาณรบกวนแบบเกาส์และสัญญาณรบกวนแบบปัวส์ซอง โดยใช้ค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดเท่ากับ $[1 \ 0 \ 1]$ และ $[1 \ 1 \ 1]$ ซึ่งจะมีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $1/2$ และ Constraint Length เท่ากับ 3 ดังแสดงในรูปที่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

4.5.5 การเข้ารหัสแบบคอนโวลูชันและการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับ

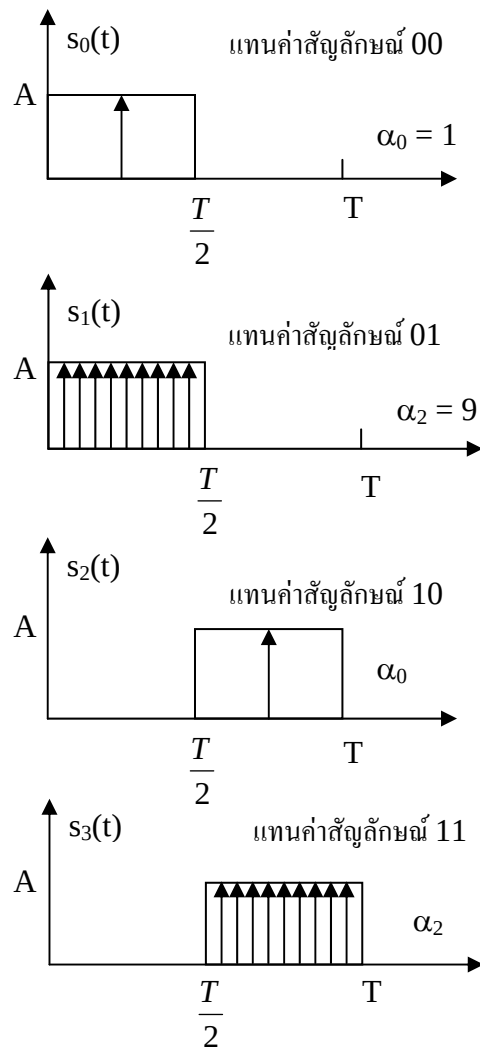
การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับกับรหัสแบบคอนโวลูชันนั้นมีการทำการออกแบบการทดสอบไว้หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อยได้ดังต่อไปนี้

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

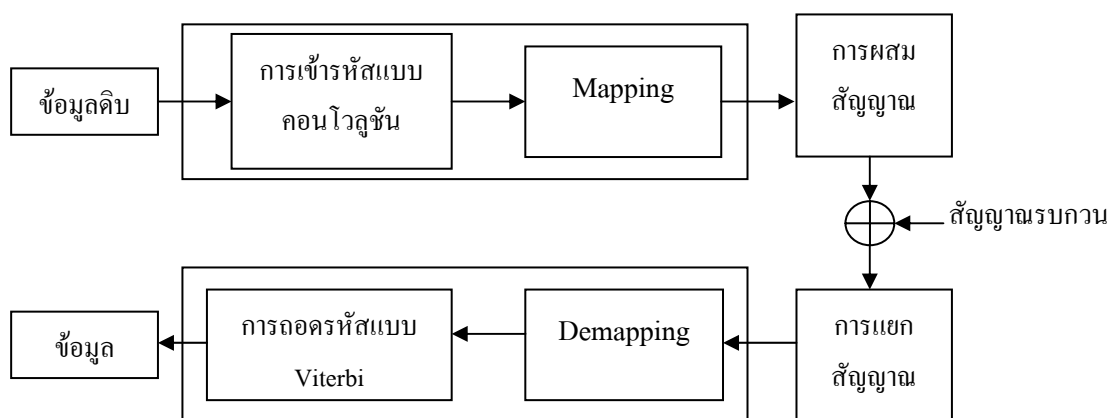
ข. การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันกับรหัสแบบคอนโวลูชัน จะมีค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดเท่ากับ $[1 \ 0 \ 1]$ และ $[1 \ 1 \ 1]$ ซึ่งจะมีอัตราการเข้ารหัสเท่ากับ $1/2$ และ Constraint Length เท่ากับ 3 ซึ่งจะต้องทำการเลือกรูปแบบของสัญญาณให้สอดคล้องกับผลจากการเข้ารหัสแบบคอนโวลูชัน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



รูปที่ 4.4 รูปแบบของรหัสแบบคอนโวลูชันที่ใช้สำหรับทดสอบกับการผสมสัญญาณเชิงแสง



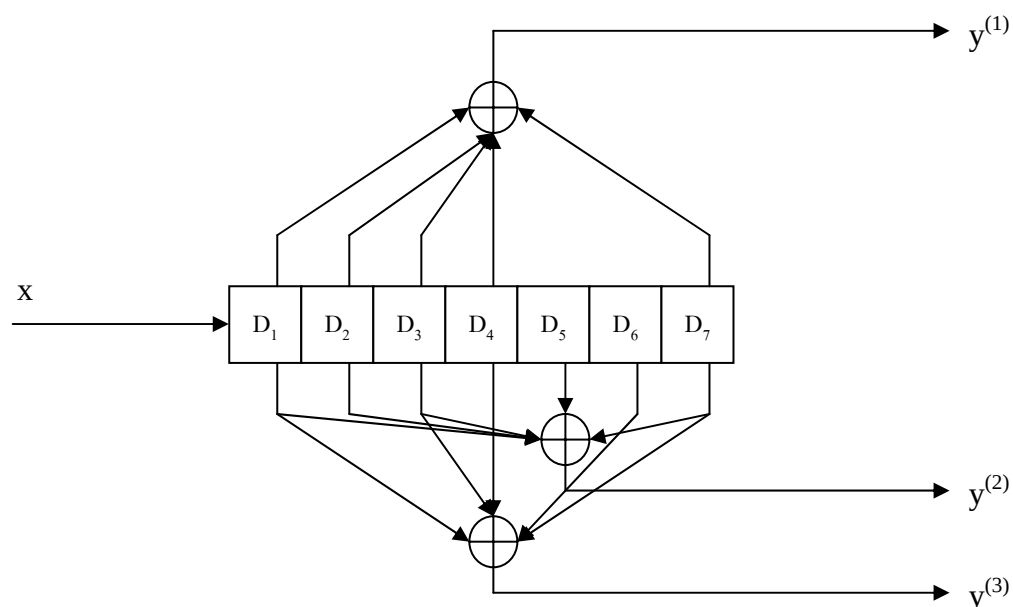
รูปที่ 4.5 รูปแบบการทำงานของ การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันและรหัสแบบคอนไวลูชันที่มีการลดระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ย



รูปที่ 4.6 รูปแบบการทำงานของ การสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันและรหัสแบบคอนไวลูชันที่มีการลดจำนวนบิต

ค. การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันกับรหัสแบบคอนวอลูชัน สำหรับวิธีการนี้มีการนำเสนอรูปแบบการเปลี่ยนข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสแบบคอนวอลูชันให้เหมาะสมกับรูปแบบการส่งสัญญาณของสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน ซึ่งเป็นการนำกระบวนการลดจำนวนบิตข้อมูล (Puncture) มาใช้งานร่วมกับการเพิ่มบิตตรวจสอบรูปแบบของข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสแบบคอนวอลูชันซึ่งเรียกรวมกันว่ากระบวนการแมปปิง (Mapping) ซึ่งกระบวนการทำงานทั้งหมดแสดงดังรูปที่ 4.6 และมีการอธิบายวิธีการทำงานของกระบวนการทั้งหมดในภาคผนวก ข สำหรับเมตริกซ์ตัวกำเนิดที่ใช้มีค่าเท่ากับ $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ และมีอัตราการใช้รหัสเท่ากับ $1/3$ และค่า Constraint length เท่ากับ 7 ซึ่งโครงสร้างของรหัสแบบคอนวอลูชันแสดงดังรูปที่ 4.7

ง. การทดสอบประสิทธิภาพของการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชันกับรหัสแบบคอนวอลูชัน ซึ่งจะใช้รูปแบบของการส่งสัญญาณเป็นรูปแบบที่มีการเพิ่มระดับของจำนวนโฟตอนเฉลี่ยดังแสดงวิธีการคำนวณไว้ในสมการ 4.15 เพื่อให้รองรับกับรูปแบบของข้อมูลที่ได้จากการเข้ารหัสแบบคอนวอลูชัน ซึ่งค่าเมตริกซ์ตัวกำเนิดที่ใช้มีค่าเท่ากับ $\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ และมีอัตราการใช้รหัสเท่ากับ $1/3$ และค่า Constraint length เท่ากับ 7 สำหรับโครงสร้างของรหัสแบบคอนวอลูชันแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 รูปแบบการเข้ารหัสแบบคอนวอลูชันสำหรับการสื่อสารแบบโฟตอนสี่ระดับที่ใช้งานร่วมกับการผสมสัญญาณแบบไบนารีพัลส์โพสิชันมอดูเลชัน