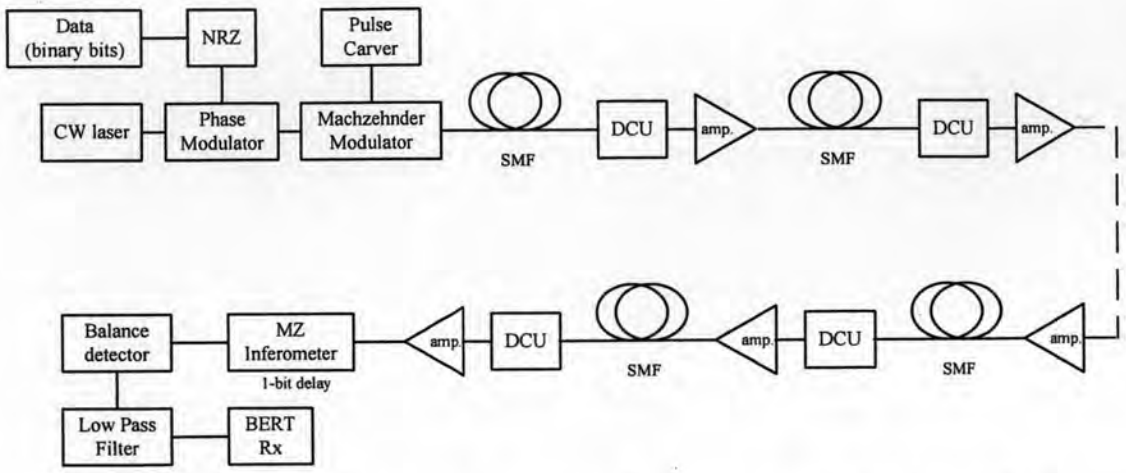
บทที่ 4

แบบจำลองการเดินทางของสัญญาณในเส้นใยแสง ที่มีการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค

จากบทที่ 3 ได้ทำการเปรียบเทียบความเหมาะสม ถูกต้อง และแม่นยำของค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางแบบใหม่ที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นในการคำนวณ กับค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยตามระยะทางแบบเดิมที่คิดเพียงผลของการลดทอนกำลังสัญญาณเท่านั้น ด้วยการนำไปวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟส แต่ผลที่ได้รับจากการคำนวณด้วยค่ากำลังสัญญาณทั้งสองแตกต่างกัน โดยเมื่อใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบเดิมในการคำนวณสามารถสรุปได้ว่าระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบให้สมรรถนะของระบบที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบในบางอัตราข้อมูลของสัญญาณ แต่เมื่อใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบใหม่ที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นด้วยในการคำนวณ สามารถสรุปได้ว่าระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบให้สมรรถนะของระบบที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบทุกๆ อัตราข้อมูลของสัญญาณ ซึ่งการวิเคราะห์เพียงเท่านี้ยังไม่สามารถสรุปได้ว่าค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบใหม่ที่นำเสนอให้การวิเคราะห์ที่แม่นยำและเหมาะสมกว่าการวิเคราะห์ด้วยค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบเดิมหรือไม่ อย่างไร เนื่องเพราะยังไม่รู้ว่าระบบใดที่ให้สมรรถนะของสัญญาณที่ดีกว่ากันแน่ ดังนั้นในบทนี้จึงทำการจำลองระบบเพื่อเปรียบเทียบว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบและระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ ระบบใดให้สมรรถนะของสัญญาณที่ดีกว่า สอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ของความผิดพลาดทางเฟสที่ใช้ค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบใดในการคำนวณ

4.1 คุณสมบัติของแบบจำลองการสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบดีพีเอสเคในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ



รูปที่ 4.1 แผนภาพบล็อกของแบบจำลองระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะไกล ด้วยการมอดูเลตแบบดีพีเอสเค Return-to-Zero (RZ-DPSK) ในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ

รูปที่ 4.1 แสดงถึงแบบจำลองระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะไกลด้วยการมอดูเลตแบบดีพีเอสเคในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ จะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดแสงความถี่เดียวด้วยกำลังงานต่างๆ กัน สัญญาณข้อมูล pseudo random จำนวน 1024 บิตที่มีอัตราข้อมูล 5 Gbps และ 40 Gbps อุปกรณ์มอดูเลตเฟส อุปกรณ์เกลาสัญญาณ เพื่อแปลงสัญญาณขาเข้าแบบ Non-Return-to-Zero (NRZ) ให้กลายเป็นสัญญาณ 66%-RZ เส้นใยแสงชนิด SMF ที่มีการลดทอนกำลังงานสัญญาณ (α) 0.2 dB/km ค่าดิสเพอร์ชั่นที่เกิดจากความเร็วกลุ่ม (β_2) = -20.78 ps^2/km และสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของแต่ละเส้นใยแสง γ_{SMF} = 1.06 $w^{-1}km^{-1}$ [23] ระยะทางในการสื่อสัญญาณคือ 5,000 km โดยในทุกๆ 50 km จะมีการวางอุปกรณ์ขยายสัญญาณทางแสงที่มีตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise figure) 5 เพื่อขยายสัญญาณและวาง DCU เพื่อทำการชดเชยดิสเพอร์ชั่นอย่างสมบูรณ์ (100% compensation) โดยมิได้คำนึงถึงผลจากปรากฏการณ์เคอร์ และการลดทอนกำลังงานที่เกิดขึ้นใน DCU ที่ภาครับจะมีวงจรกรองความถี่ต่ำ เพื่อที่จะเลือกเอาแต่สัญญาณข้อมูลที่ต้องการ และอุปกรณ์ดีมอดูเลตสัญญาณ RZ-DPSK ที่มีวงจรประวิงเวลา 1 บิตของ 40 Gbps รวมอยู่ด้วย ส่วนการวัดคุณภาพสัญญาณ เราจะใช้ปริมาณ Q-factor เป็นตัววัดคุณภาพของสัญญาณ ซึ่งสามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

$$Q = \frac{\left|\bar{\phi}_{change} - \bar{\phi}_{unchange}\right|}{\sigma_{change} + \sigma_{unchange}} \tag{4.1}$$

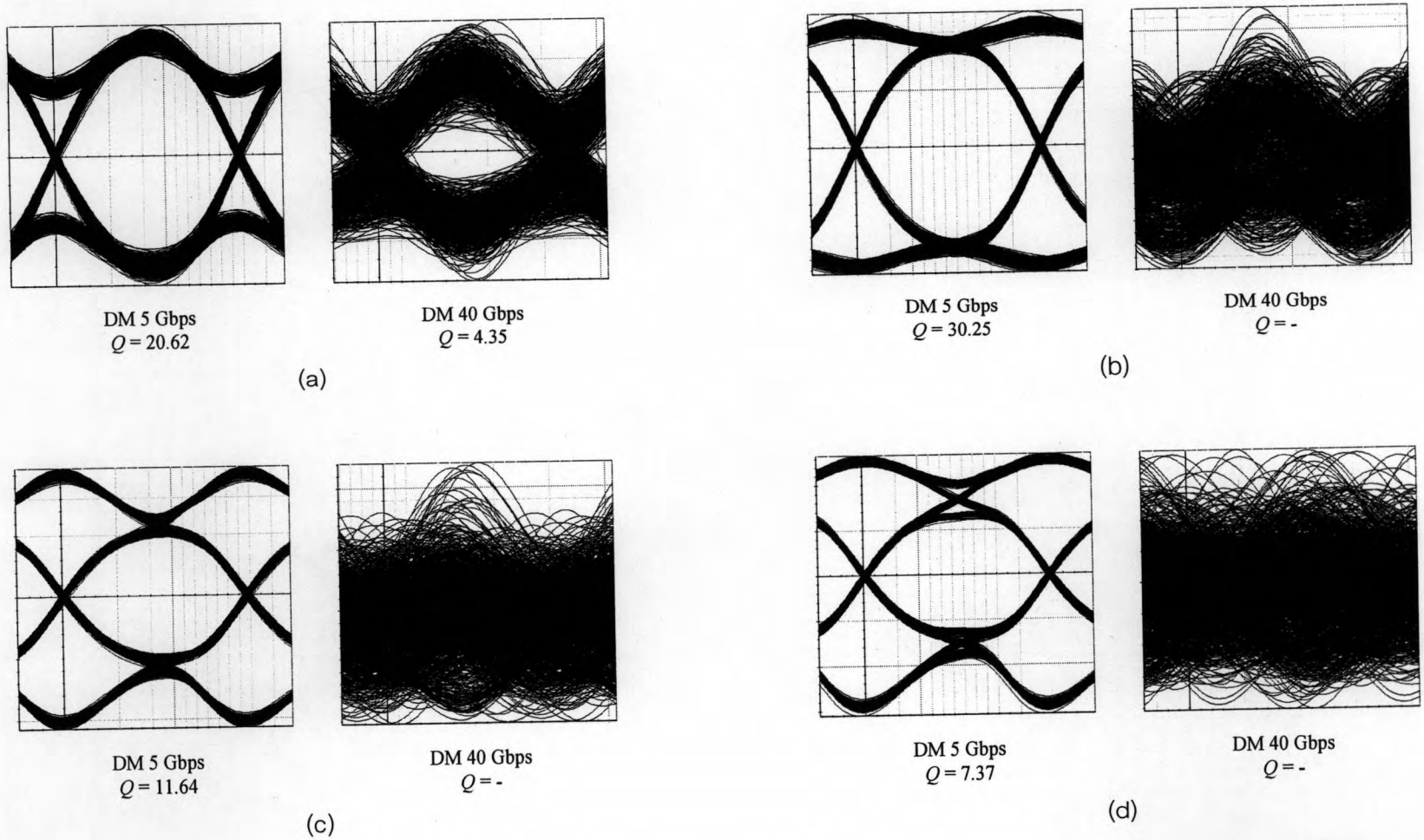
โดยที่ $\bar{\phi}_{change}$ และ σ_{change} เป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางเฟสของสัญญาณซึ่งทำการวัดที่ตรงกลางบิตเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะบิตระหว่างบิต '0' และ '1' ขณะที่ $\bar{\phi}_{unchange}$ และ $\sigma_{unchange}$ เป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานทางเฟสของสัญญาณซึ่งทำการวัดที่ตรงกลางบิตเมื่อไม่มีการเปลี่ยนสถานะบิต ณ มาตรฐานที่ Q = 6.9 dB จะได้อัตราผิดพลาดบิต (Bit-error rate) ประมาณ 10^{-12} การจำลองระบบทางคณิตศาสตร์นั้นใช้ซอฟท์แวร์ OptiSys 5.0

4.2 ผลลัพธ์ของแบบจำลองการสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบดีพีเอสเคในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบและการวิเคราะห์ผลลัพธ์

เมื่อทำการจำลองระบบตามแบบจำลองในหัวข้อ 4.1 แล้ว ทำให้ได้ค่า Q-Factor และ Eye diagram ของระบบการสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตดีพีเอสเคในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบดังนี้

ตารางที่ 4.1 Q-factor ที่ P_0 = 1 mW, 3 mW, 5 mW และ 7 mW ของระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ

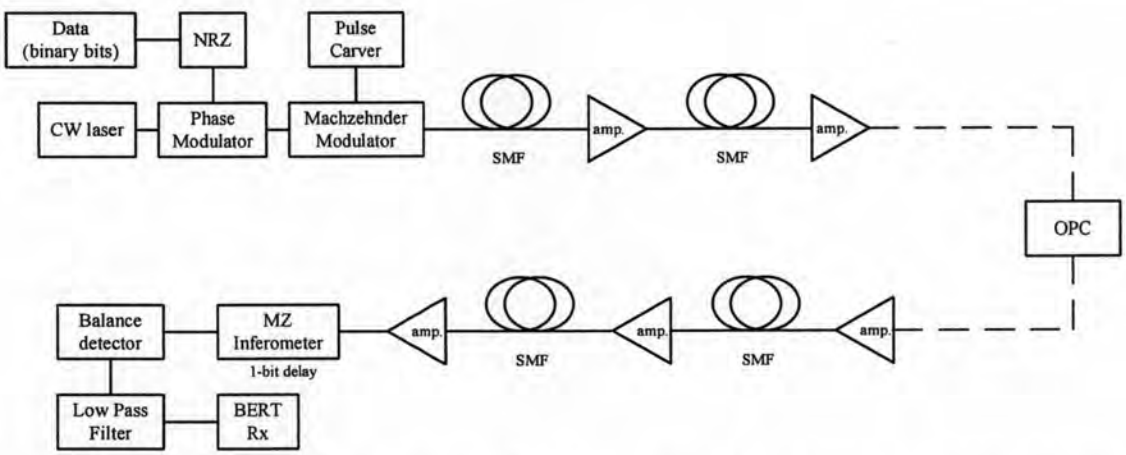
Power (mW)	Q factor	
	5 Gbps	40 Gbps
1	20.62	4.35
3	30.25	-
5	11.64	-
7	7.37	-



รูปที่ 4.2 Eye diagram ของสัญญาณ RZ-DPSK อัตราข้อมูล 5 Gbps และ 40 Gbps ที่ 5,000 km ของระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ (a) P_0 = 1 mW, (b) P_0 = 3 mW, (c) P_0 = 5 mW และ (d) P_0 = 7 mW

จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าที่อัตราข้อมูล 5 Gbps จะสามารถวัดค่า Q-Factor ได้ทุกๆ กำลังสัญญาณขาเข้าที่สนใจ แต่ที่อัตราข้อมูลที่สูงขึ้นเป็น 40 Gbps เมื่อกำลังสัญญาณขาเข้าเท่ากับ 1 mW จะสามารถวัดค่า Q-Factor ออกมาได้ แต่ที่กำลังสัญญาณขาเข้าเป็น 3 mW , 5 mW และ 7 mW นั้น ไม่สามารถหาค่า Q-Factor ของระบบได้ เนื่องจากสัญญาณเกิดความผิดเพี้ยนอย่างรุนแรง เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบนั้น ไม่ได้ทำการชดเชยความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวสัญญาณที่ส่ง เมื่อเพิ่มกำลังส่งเข้าไปในระบบจะทำให้กำลังสัญญาณเฉลี่ยในระบบมีค่ามากขึ้น ทำให้เกิดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นมากขึ้นแปรผันโดยตรงกับกำลังที่ส่ง

4.3 คุณสมบัติของแบบจำลองการสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบดีพีเอสเคในระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ



รูปที่ 4.3 แผนภาพบล็อกแบบจำลองระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะไกลด้วยการมอดูเลตดีพีเอสเค Return-to-Zero (RZ-DPSK) ในระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ

รูปที่ 4.3 แสดงถึงแบบจำลองระบบสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงระยะไกลด้วยการมอดูเลตดีพีเอสเคในระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ จะประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดแสงความถี่เดียวด้วยกำลังงานต่างๆ กัน สัญญาณข้อมูล pseudo random จำนวน 1024 บิตที่มีอัตราข้อมูล 5 Gbps และ 40 Gbps อุปกรณ์มอดูเลตเฟส อุปกรณ์เกลาสัญญาณ เพื่อแปลงสัญญาณขาเข้าแบบ Non-Return-to-Zero (NRZ) ให้กลายเป็นสัญญาณ 66%-RZ เส้นใยแสงชนิด SMF ที่มีการลดทอนกำลังงานสัญญาณ (α) 0.2 dB/km ค่าดิสเพอร์ชั่นที่เกิดจากความเร็วกลุ่ม (β_2) = -20.78 ps^2/km และสัมประสิทธิ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของแต่ละเส้นใยแสง γ_{SMF} = 1.06 $w^{-1}km^{-1}$ ระยะทางในการสื่อสัญญาณคือ 5,000 km โดยในทุกๆ 50 km จะมีการวางอุปกรณ์

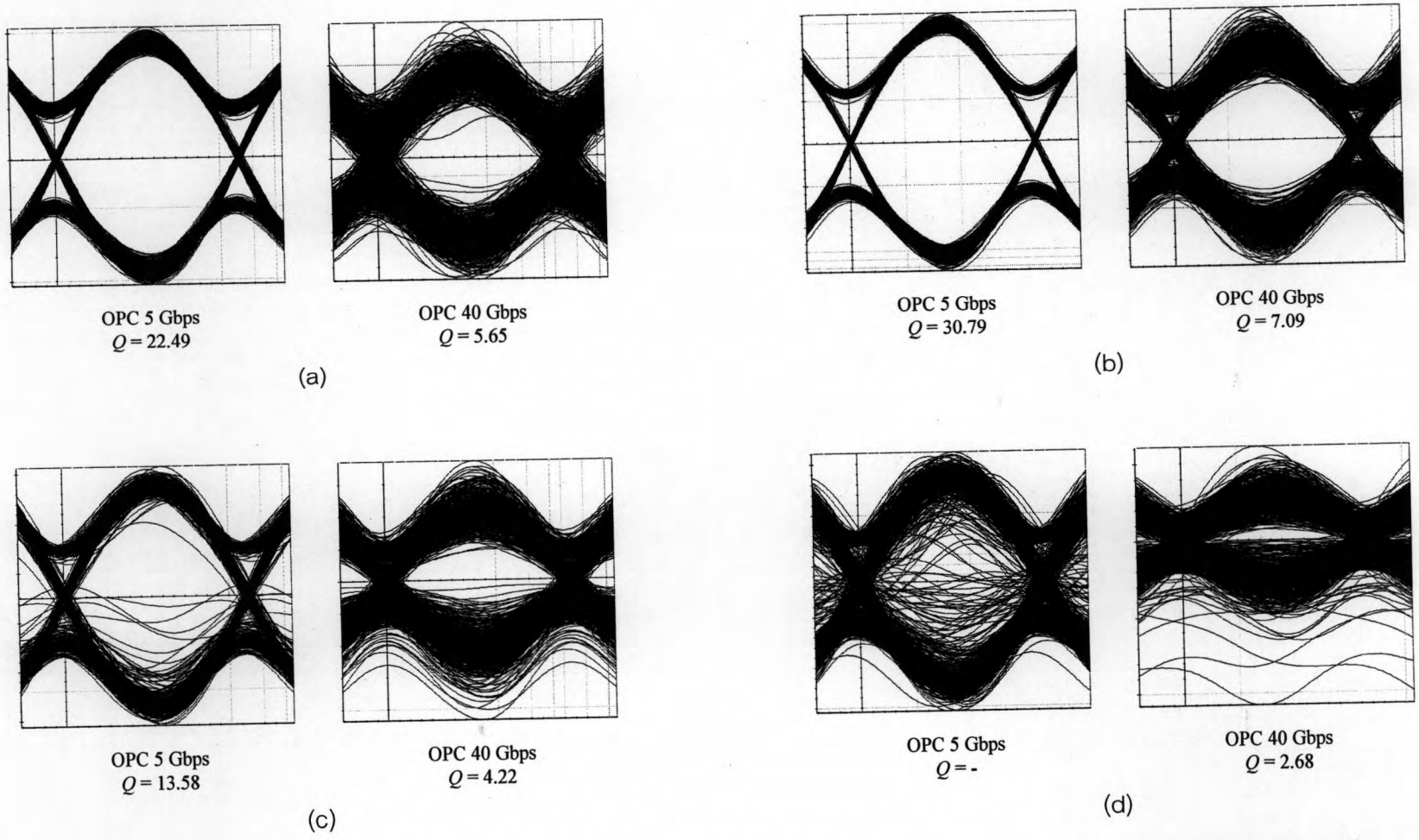
ขยายสัญญาณทางแสงที่มีตัวเลขสัญญาณรบกวน (Noise figure) 5 เพื่อขยายสัญญาณ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระบบจะมีการวางอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณ ซึ่งอุปกรณ์คอนจูเกตสัญญาณที่ใช้ สมมติให้เป็นแบบอุดมคติ คือ มีประสิทธิผลการแปลงสัญญาณเป็นสัญญาณคอนจูเกต 100% และไม่ทำให้ความความถี่ของสัญญาณที่เปลี่ยนเป็นสัญญาณคอนจูเกตแล้วเปลี่ยนไป ที่ภาครับจะมีวงจรกรองความถี่ต่ำ เพื่อที่จะเลือกเอาแต่สัญญาณข้อมูลที่ต้องการ และอุปกรณ์ดีมอดูเลตสัญญาณ RZ-DPSK ที่มีวงจรประวิงเวลา 1 บิตของ 40 Gbps รวมอยู่ด้วย ส่วนการวัดคุณภาพสัญญาณ เราจะใช้ปริมาณ Q-factor เป็นตัววัดคุณภาพของสัญญาณเช่นเดียวกันกับหัวข้อที่ 4.3 การจำลองระบบทางคณิตศาสตร์นั้นใช้ซอฟท์แวร์ OptiSys 5.0

4.4 ผลลัพธ์ของแบบจำลองการสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตแบบดีพีเอสเคในระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบและการวิเคราะห์ผลลัพธ์

เมื่อทำการจำลองระบบตามแบบจำลองในหัวข้อ 4.3 แล้ว ทำให้ได้ค่า Q-Factor และ Eye diagram ของระบบการสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงด้วยการมอดูเลตดีพีเอสเคในระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบดังนี้

ตารางที่ 4.2 Q-factor ที่ P_0 = 1 mW, 3 mW, 5 mW และ 7 mW ของระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ

Power (mW)	Q factor	
	5 Gbps	40 Gbps
1	22.49	5.65
3	30.79	7.09
5	13.58	4.22
7	-	2.68

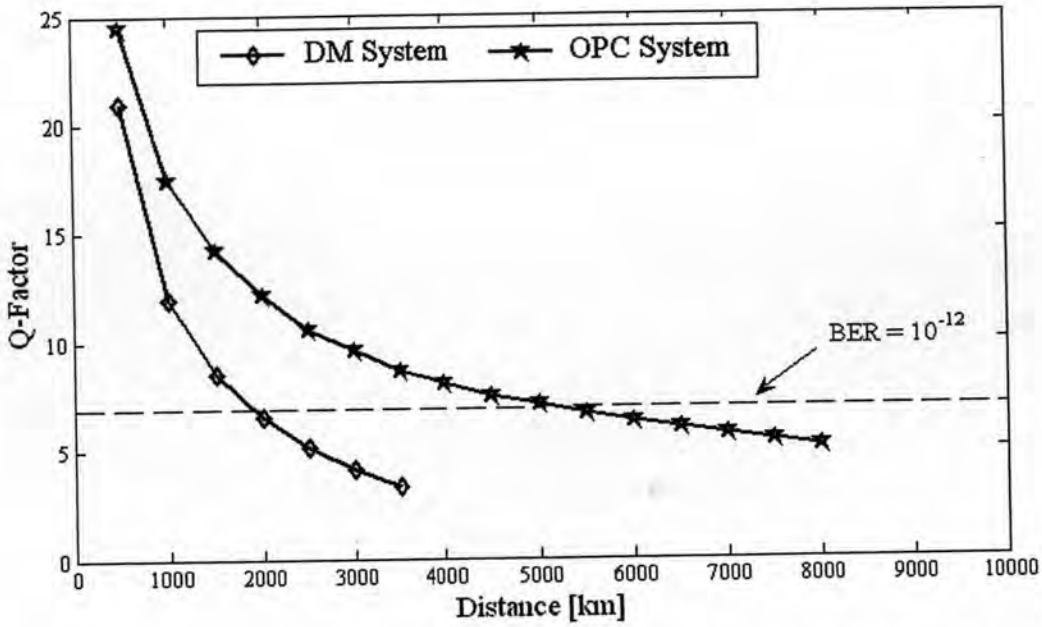


รูปที่ 4.4 Eye diagram ของสัญญาณ RZ-DPSK อัตราข้อมูล 5 Gbps และ 40 Gbps ที่ 5,000 km ของระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ (a) P_0 = 1 mW, (b) P_0 = 3 mW, (c) P_0 = 5 mW และ (d) P_0 = 7 mW

จากตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าทั้งสองค่าของอัตราข้อมูลที่สนใจ คือ 5 Gbps และ 40 Gbps จะสามารถวัดค่า Q-Factor ได้ทุกๆ กำลังสัญญาณขาเข้าที่สนใจ ยกเว้นที่อัตราข้อมูล 5 Gbps กำลังสัญญาณขาเข้า 7 mW และจะมีค่า Q-Factor ที่ดีที่สุดที่กำลังสัญญาณขาเข้าเป็น 3 mW อัตราข้อมูล 40 Gbps

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 4.2 ตารางที่ 4.1 ในหัวข้อที่ 4.2 และ รูปที่ 4.4 ตารางที่ 4.2 ในหัวข้อที่ 4.4 จะเห็นว่าที่อัตราข้อมูล 5 Gbps ระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ มีค่า Q-Factor ที่สูงกว่าของระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ ทุกๆ ค่าของกำลังสัญญาณขาเข้า ส่วนที่อัตราข้อมูล 40 Gbps นั้น ที่กำลังสัญญาณขาเข้าเป็น 1 mW ระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ มีค่า Q-Factor ที่สูงกว่าของระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ แต่ที่กำลังสัญญาณขาเข้าเป็น 3 mW, 5 mW และ 7 mW นั้น ไม่สามารถหาค่า Q-Factor ของระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบได้ เนื่องจากสัญญาณเกิดความผิดเพี้ยนอย่างรุนแรง แต่สำหรับระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบนั้น ยังสามารถหาค่า Q-Factor ได้อยู่

จากค่า Q-Factor ที่ได้ จะเห็นว่าระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ ให้คุณภาพสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ ทั้งที่อัตราข้อมูล 5 Gbps และ 40 Gbps เมื่อใช้กำลังสัญญาณขาเข้าทั้ง 4 ค่า (1 mW, 3 mW, 5 mW และ 7 mW) แต่อย่างไรก็ตามระยะทางที่ใช้ในการสื่อสัญญาณ คือ 5,000 km ซึ่งอาจจะทำให้เกิดข้อสงสัยได้ว่าถ้าระยะทางที่ใช้ในการสื่อสัญญาณเปลี่ยนแปลงไป ระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ ยังจะให้คุณภาพของสัญญาณที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบอยู่หรือไม่ เราจึงทำการเปรียบเทียบค่า Q-Factor ของระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบและระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ โดยเลือกพิจารณาที่ค่ากำลังสัญญาณขาเข้าเป็น 3 mW อัตราข้อมูล 40 Gbps ในระยะการสื่อสัญญาณตั้งแต่ 500 km – 8,000 km จากนั้นจึงนำค่า Q-Factor ที่ได้มาวาดกราฟได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Q-Factor กับระยะทางของระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบกับระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ ที่อัตราข้อมูล 40 Gbps กำลังสัญญาณขาเข้าเท่ากับ 3 mW

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบให้สมรรถนะของสัญญาณที่ภาครับที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ ทุกๆ ระยะในการสื่อสัญญาณ เช่น ที่ระยะทาง 500 km ให้ผลแตกต่างค่า Q-Factor ประมาณ 3.5150 และผลต่างจะยิ่งมากขึ้น เมื่อระยะในการสื่อสัญญาณเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของสัญญาณที่เกิดการสะสมมากขึ้นเรื่อยๆ ในระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ ทำให้ระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ ส่งสัญญาณได้ในระยะทางที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบ ที่ให้ค่า Q-Factor ที่เท่ากัน

ดังนั้นจากผลการพิจารณาสมรรถนะของระบบที่ได้จากค่า Q-Factor และจากรูปที่ 4.5 ที่สามารถสรุปได้ว่าระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบให้สมรรถนะที่ภาครับที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์ผลตอบสนองทางความถี่ที่ใช้ $\overline{P}_L$ ซึ่งไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่าระบบที่ใช้วิธีวิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ หรือระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบให้คุณภาพสัญญาณที่ดีกว่ากัน ในขณะที่ผลตอบสนองทางความถี่เมื่อใช้ $\overline{P}_{LD_N}$ แสดงว่าระบบที่ใช้วิธีการคอนจูเกตสัญญาณที่กึ่งกลางระบบจะให้สมรรถนะที่ดีกว่าระบบที่ใช้วิธีการชดเชยดิสเพอร์ชั่นเป็นรายคาบ จะเห็นได้ว่าผลการจำลองระบบสอดคล้องกันกับระบบที่ใช้ $\overline{P}_{LD_N}$ อย่างชัดเจน

นั่นคือค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบใหม่ที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นที่ได้นำเสนอ ให้ผลในการวิเคราะห์ระบบในการสื่อสัญญาณผ่านเส้นใยแสงที่ถูกต้อง เหมาะสม และแม่นยำมากกว่าค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบเดิมที่คิดเพียงผลของการลดทอนของสัญญาณเพียงอย่างเดียว

เมื่อสามารถพิสูจน์ได้แล้วว่าค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบใหม่ที่นำเสนอเหมาะสมสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ระบบมากกว่าแล้ว ในบทต่อไปจะทำการวิเคราะห์หาค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยแบบใหม่ที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นสำหรับระบบที่ทำการส่งสัญญาณหลายบิต และวิเคราะห์ว่าค่ากำลังสัญญาณเฉลี่ยที่คิดรวมผลของดิสเพอร์ชั่นสำหรับระบบที่ทำการส่งสัญญาณแบบหลายบิตที่หาได้นั้นให้ผลที่ถูกต้องกว่าเดิมหรือไม่ อย่างไร