

บทที่ 4

ตัวอย่างการใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอกรณีศึกษาโครงข่ายทำงานปกติ

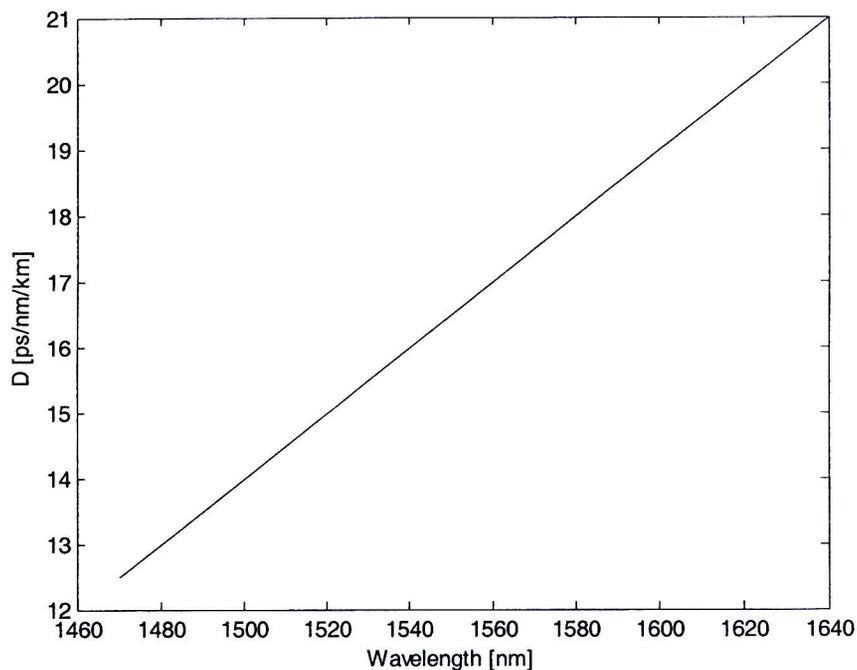
ในบทนี้นำเสนออัลกอริทึมและผลเฉลยของการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันกรณีศึกษาโครงข่ายทำงานปกติตามอัลกอริทึมที่ได้เสนอในบทที่ 3 ในส่วนแรกจะเป็นการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนโครงข่ายตัวอย่าง พร้อมทั้งยกตัวอย่างตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย ในส่วนที่สองเป็นการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ Optical Pan-European Network (OPEN) และส่วนสุดท้ายเป็นการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ North-American Reference Network (NARNET)

4.1 สมมติฐานและข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับการจำลองโครงข่าย

- 1) การสร้างอัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยเงื่อนไขที่ไม่มีผลจากปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง
- 2) กำหนดให้โครงข่ายตัวอย่าง โครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN และโครงข่ายส่วนหนึ่งของ NARNET เป็นโครงข่ายลักษณะเมชสามารถส่งผ่านข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทางบนเส้นใยแสงทำงาน
- 3) หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU มีระยะทางการชดเชยดิสเพอร์ชันที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 100 km

4.2 การจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่าง

ประเภทของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณสำหรับการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน คือ เส้นใยแสงแบบโหมดคลื่นเดี่ยวซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชัน (D) เท่ากับ 16.5 ps/km/nm ที่ความยาวคลื่น 1,550 nm และมีค่าความชันของดิสเพอร์ชัน (D') ที่ 0.05 ps/nm²/km แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงที่ใช้ในการส่งผ่านสัญญาณดังรูปที่ 4.1 [41]

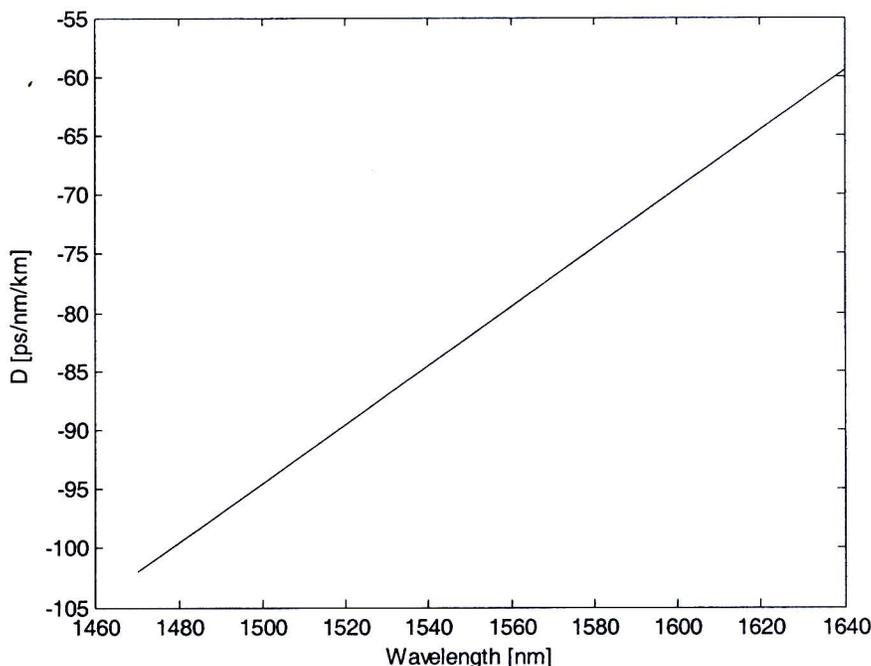


รูปที่ 4.1 ดิสเพอร์ชันของ SMF ITU-T G.652

4.2.1 ประเภทของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ใช้ในการจำลองโครงข่าย

ในการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน 2 ชนิดคือ

1. NS-DCU มีค่าดิสเพอร์ชันเท่ากับ -82 ps/km/nm ที่ 1550 nm และมีค่าความชันของค่าดิสเพอร์ชันที่ $0.25 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$ รูปที่ 4.2 [41] แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับดิสเพอร์ชันของ NS-DCU



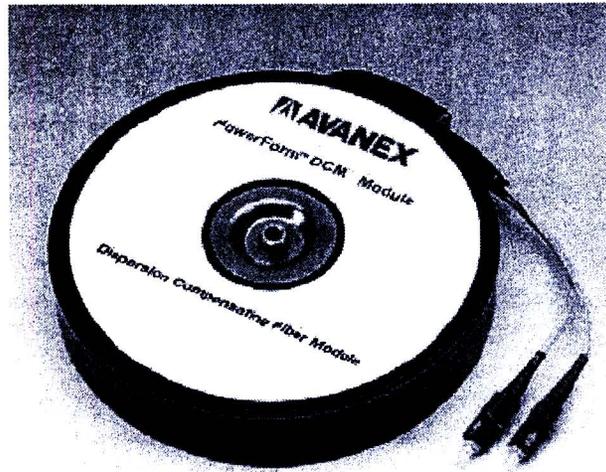
รูปที่ 4.2 ดิสเพอร์ชันของ NS-DCU

การคำนวณหาค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันที่แต่ละความยาวคลื่นของ NS-DCU ในการจำลองโครงข่ายสามารถหาได้จากสมการ (2.12) แต่เนื่องจากลักษณะหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันที่เป็นอุปกรณ์ลักษณะ Black Block ดังนั้นเราจำเป็นต้องหาค่าความยาวของเส้นใยแสงที่ทำหน้าที่เป็นตัวชดเชยซึ่งบรรจุอยู่ใน NS-DCU จากสมการ (2.12) สามารถจัดรูปเพื่อให้สะดวกต่อการคำนวณหาความยาวได้ดังนี้

$$L_{NS-DCU} = \frac{D_{SMF} \times L_{SMF}}{D_{NS-DCU}} \quad (4.1)$$

จากสมการที่ (4.1) ค่า D_{SMF} หาได้จากรูปที่ 4.1 ฉะนั้นค่าดิสเพอร์ชันของ SMF ที่ความยาวคลื่น 1550 nm มีค่าเท่ากับ 16.5 ps/km/nm L_{SMF} มีค่าเท่ากับ 100 km และค่า D_{NS-DCU} หาได้จากรูปที่ 4.2 ซึ่งค่าดิสเพอร์ชันของ NS-DCU ที่ความยาวคลื่น 1550 nm มีค่าเท่ากับ -82 ps/km/nm เมื่อนำค่าไปแทนในสมการที่ (4.1) สามารถหาค่าความยาวของ NS-DCU ได้เท่ากับ 20.122 km หรือประมาณ 20 km

2. SC-DCU มีคุณสมบัติชดเชยความชันของดิสเพอร์ชันได้ 100% เมื่อชดเชยค่าดิสเพอร์ชันสะสมของ G.652 ในระยะทาง 100 km ลักษณะหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเป็นดังรูปที่ 4.3 [41] และมีรายละเอียดสำหรับความยาวในตารางที่ 4.1 เพื่อนำมากำหนดค่าดิสเพอร์ชันที่แต่ละความยาวคลื่นของ SC-DCU

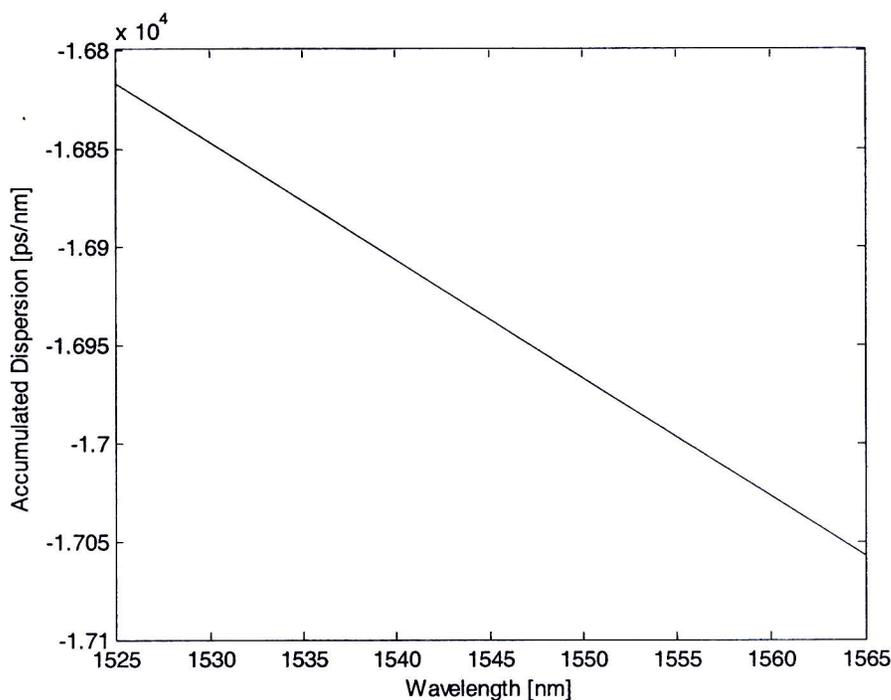


รูปที่ 4.3 Avonex's SC-DCU

ตารางที่ 4.1 ค่าดิสเพอร์ชันสำหรับมอดูลความยาวต่างๆ

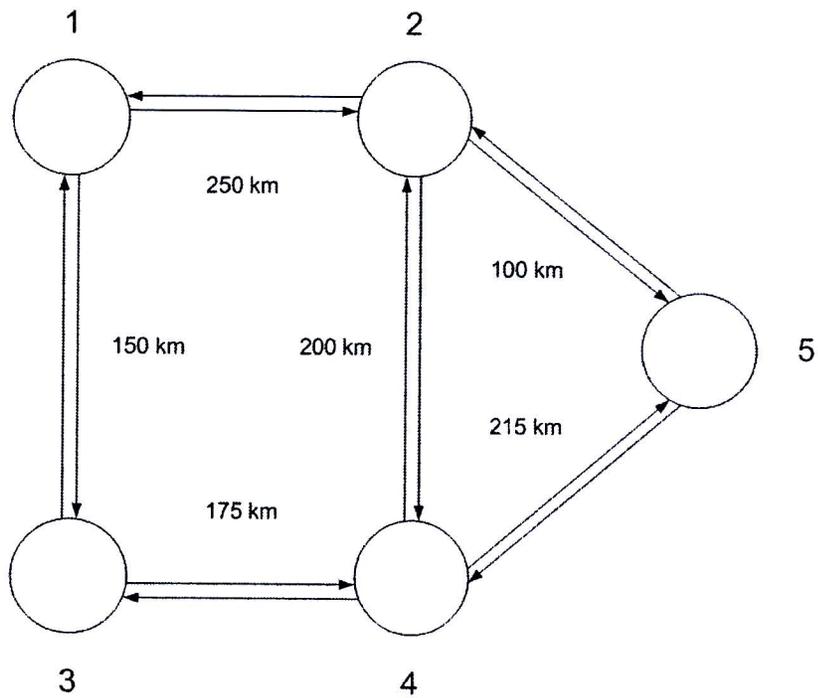
Modul Description	Measured Dispersion [ps / nm]					
	at 1,525 nm		at 1,545 nm		at 1,565 nm	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
DCM - 10 - SMF - C	-159	-145	-170	-158	-184	-168
DCM - 20 - SMF - C	-315	-293	-337	-319	-364	-340
DCM - 30 - SMF - C	-629	-588	-673	-640	-727	-682
DCM - 40 - SMF - C	-942	-883	-1009	-960	-1090	-1024
DCM - 50 - SMF - C	-1251	-1183	-1340	-1286	-1448	-1371
DCM - 60 - SMF - C	-1560	-1482	-1671	-1611	-1805	-1718

การคำนวณค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ SC-DCU สามารถคำนวณได้จาก รายละเอียดของ SC-DCU ตามตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณา DCM - 60 - SMF - C ที่ความยาวคลื่น 1525 nm มีค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยเท่ากับ -1521 ps/nm ที่ความยาวคลื่น 1545 nm มีค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยเท่ากับ -1640.5 ps/nm และที่ความยาวคลื่น 1565 nm มีค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยเท่ากับ -1761.5 ps/nm เมื่อเรานำค่าทั้งหมดนี้ไปสร้างกราฟเส้นตรงระหว่างความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันเฉลี่ยได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างของความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันสะสมของ SC-DCU

4.2.2 โครงข่ายตัวอย่าง



รูปที่ 4.5 โครงข่ายตัวอย่าง

ในการจำลองการใช้หน่วยขดเชยดิสเพอร์ชันกำหนดให้โครงข่ายตัวอย่างเป็นโครงข่ายลักษณะเมฆ ประกอบขึ้นด้วย 4 ข่ายเชื่อมโยง (Link) 4 โหนด (Node) ส่งข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทางบนเส้นใยแสงทำงานมีระยะทางรวม 1090 km วิธีการสร้างอัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยขดเชยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่ายตัวอย่างด้วยจำนวนหน่วยขดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดกรณีนี้ที่โครงข่ายทำงานปกติอธิบายได้ดังนี้

4.2.2.1 ระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทาง

การระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดถูกกำหนดด้วยระยะทางระหว่างโหนดที่มีค่าน้อยที่สุด (Shortest-Path) โดยเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณกรณีนี้ที่โครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติแสดงไว้ในบทที่ 3 ตารางที่ 3.1

4.2.2.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตสำหรับเส้นทางการส่งสัญญาณในตารางที่ 3.1 สำหรับการส่งผ่านสัญญาณกรณีโครงข่ายทำงานปกติประกอบขึ้นด้วย สมการเงื่อนไขขอบเขตขดเชย

ค่าดีสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนดต้นทางและโหนดปลายทางใด ๆ เงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชัน เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม และ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

4.2.2.2.1 สมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนด

สร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตซดเซยค่าดีสเพอร์ชันการส่งผ่านสัญญาณความยาวคลื่นจากทุกโหนดต้นทาง Z ไปยังทุกโหนดปลายทาง Y โดยนำข้อมูลในตารางที่ 3.1 มาสร้างดังนี้

1) กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 1; Z = 1

$$1-2 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) = D_{ac21i}$$

$$1-3 \quad 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{13}) = D_{ac31i}$$

$$1-3-4 \quad 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{13}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) = D_{ac41i}$$

$$1-2-5 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac51i}$$

2) กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 2; Z = 2

$$2-1 \quad 0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac12i}$$

$$2-4-3 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac32i}$$

$$2-4 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) = D_{ac42i}$$

$$2-5 \quad 0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac52i}$$

3) กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 3; Z = 3

$$3-1 \quad 0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac13i}$$

$$3-4-2 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) = D_{ac23i}$$

$$3-4 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) = D_{ac43i}$$

$$3-4-5 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) = D_{ac53i}$$

4) กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 4; Z = 4

$$4-3-1 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac14i}$$

$$4-2 \quad 0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) = D_{ac42i}$$

$$4-3 \quad 0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac34i}$$

$$4-5 \quad 0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) = D_{ac54i}$$

5) กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 5; $Z = 5$

$$\begin{aligned} 5-2-1 & \quad 0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac15i} \\ 5-2 & \quad 0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) = D_{ac25i} \\ 5-4-3 & \quad 0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac35i} \\ 5-4 & \quad 0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) = D_{ac45i} \end{aligned}$$

ในการจำลองการส่งผ่านสัญญาณในโครงข่ายใช้สัญญาณ WDM 72 ความยาวคลื่น ตั้งแต่ความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึงความยาวคลื่น 1577.03 nm ที่ความยาวคลื่นกลาง (Center Wavelength) เท่ากับ 1550.12 nm ด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.8 nm ดังตารางที่ 4.2 [42] แต่เมื่อทุกความยาวคลื่นหรือทุกช่องสัญญาณใน C Band ถูกใช้ในการจำลองการส่งผ่านสัญญาณนี้จะใช้เวลามากจำนวนมหาศาล ฉะนั้นเราจึงพิจารณาแค่ความยาวคลื่นที่ส่งผลหลักต่อการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันซึ่งความยาวคลื่นนั้นคือ ความยาวคลื่นขอบทั้งสอง (1520.25 nm และ 1577.03 nm) เนื่องจากความดิสเพอร์ชันสะสมของความยาวคลื่นอื่นๆ จะอยู่ในช่วงไม่เกินค่าดิสเพอร์ชันสะสมของความยาวคลื่นขอบทั้งสองหรืออาจจะกล่าวได้ว่าเมื่อสัญญาณของความยาวคลื่นขอบทั้งสองถูกใช้ในการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน เมื่อสัญญาณเดินทางไปถึงที่ปลายโดยที่ค่าดิสเพอร์ชันสะสมของความยาวคลื่นขอบทั้งสองมีค่าอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้สามารถรับรองได้ว่าสัญญาณของความยาวคลื่นที่เหลือมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมอยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดด้วย

เราสามารถคำนวณค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ SMF ได้จากรายละเอียดของ SMF ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ดิสเพอร์ชันของ SMF ITU-T G.652 เช่น ค่าดิสเพอร์ชันของความยาวคลื่น 1520.25 nm คำนวณได้ดังนี้

$$D_{1520.25} = 16.5 + 0.05 \times (1520.25 - 1550) = 15.0125 \text{ ps/km/nm}$$

ส่วนการคำนวณค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ NS-DCU สามารถคำนวณได้จากรายละเอียดของ NS-DCU ตามรูปที่ 4.2 ดิสเพอร์ชันของ NS-DCU เช่น ค่าดิสเพอร์ชันของความยาวคลื่น 1520.25 nm คำนวณได้ดังนี้

$$D_{comp_{1520.25[NS-DCU]}} = (-82) + 0.25 \times (1520.25 - 1550) = -89.4375 \text{ ps/km/nm}$$

นำค่านี้มาคูณกับความยาว NS-DCU ที่คำนวณได้จากสมการที่ (4.1) ที่ความยาวคลื่น 1550.25 nm เราจะได้ค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของ NS-DCU ดังนี้

$$D_{comp_{1520.25[NS-DCU]}} = [(-82) + 0.25 \times (1520.25 - 1550)] \times 20 = -1788.75 \text{ ps/km/nm}$$

และการคำนวณค่าชดเชยดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่นต่างๆ ของ SC-DCU สามารถคำนวณได้จากฟังก์ชันของสมการเส้นตรงของรูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันสะสมของ SC-DCU เช่น ค่าเฉลี่ยดิสเพอร์ชันของความยาวคลื่น 1520.25 nm คำนวณได้ดังนี้

$$D_{comp_{1520.25[SC-DCU]}} = (-6.0125) * 1520.25 + 7648.1 = -1489.5 \text{ ps/nm}$$

ตารางที่ 4.2 ช่องสัญญาณใน Wave Division Multiplexing (WDM) ITU Grid C-Band

Channel #	Wavelength (nm)						
1	1520.25	19	1534.25	37	1548.52	55	1563.05
2	1521.02	20	1535.04	38	1549.32	56	1563.86
3	1521.79	21	1535.82	39	1550.12	57	1564.68
4	1522.56	22	1536.61	40	1550.92	58	1565.50
5	1523.34	23	1537.40	41	1551.72	59	1566.31
6	1524.11	24	1538.19	42	1552.52	60	1567.13
7	1524.89	25	1538.98	43	1553.33	61	1567.95
8	1525.66	26	1539.77	44	1554.13	62	1568.11
9	1526.44	27	1540.56	45	1554.94	63	1569.59
10	1527.22	28	1541.35	46	1555.75	64	1570.42
11	1527.99	29	1542.14	47	1556.56	65	1571.24
12	1528.77	30	1542.94	48	1557.36	66	1572.06
13	1529.55	31	1543.73	49	1558.17	67	1572.89
14	1530.33	32	1544.53	50	1558.98	68	1573.71

15	1531.12	33	1545.32	51	1559.79	69	1574.54
16	1531.90	34	1546.12	52	1560.61	70	1575.37
17	1532.68	35	1546.92	53	1561.42	71	1576.20
18	1533.47	36	1547.72	54	1562.23	72	1577.03

ตารางที่ 4.3 ค่าดิสเพอร์ชันของ SMF, NS-DCU และ SC-DCU

λ_i (nm)	D_i (ps/nm/km)	D_{comp_i} (ps/nm)	
		NS-DCU	SC-DCU
1520.25	15.0125	-1788.75	-1491.74
1577.03	17.8515	-1504.85	-1830.10

จากนั้นสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตชดเชยค่าดิสเพอร์ชันการส่งผ่านสัญญาณ 2 ความยาวคลื่นโดยใช้ข้อมูลใน

ตารางที่ 4.3 ค่าดิสเพอร์ชันของ SMF, NS-DCU และ SC-DCU จากทุกโนดต้นทาง Z ไปยังทุกโนดปลายทาง Y ภายในโครงข่ายตัวอย่าง เพื่อหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยง ข้อมูลในตารางที่ 4.4 แสดงรูปแบบสมการบนข่ายเชื่อมโยงต่าง ๆ ดังนี้

ตารางที่ 4.4 สมการเงื่อนไขขอบเขตชดเชยค่าดิสเพอร์ชันการส่งผ่านสัญญาณ

2 ความยาวคลื่นกรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

การส่งสัญญาณ	รูปแบบสมการ
1 – 2	$0 + (D_i \times 250) + (D_{comp_i} \times N_{12}) = D_{ac211}$ $0 + (D_i \times 250) + (D_{comp_i} \times N_{12}) = D_{ac212}$
1 – 3	$0 + (D_i \times 150) + (D_{comp_i} \times N_{13}) = D_{ac311}$ $0 + (D_i \times 150) + (D_{comp_i} \times N_{13}) = D_{ac312}$
1 – 3 – 4	$0 + (D_i \times 150) + (D_{comp_i} \times N_{13}) + (D_i \times 175) + (D_{comp_i} \times N_{34}) = D_{ac411}$ $0 + (D_i \times 150) + (D_{comp_i} \times N_{13}) + (D_i \times 175) + (D_{comp_i} \times N_{34}) = D_{ac412}$

1 - 2 - 5	$0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac511}$ $0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac512}$
2 - 1	$0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac121}$ $0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac122}$
2 - 4 - 3	$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac321}$ $0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac322}$
2 - 4	$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) = D_{ac421}$ $0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) = D_{ac422}$
2 - 5	$0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac521}$ $0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac522}$
3 - 1	$0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac131}$ $0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac132}$
3 - 4 - 2	$0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) = D_{ac231}$ $0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) = D_{ac232}$
3 - 4	$0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) = D_{ac431}$ $0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) = D_{ac432}$
3 - 4 - 5	$0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) = D_{ac531}$ $0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) = D_{ac532}$
4 - 3 - 1	$0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac141}$ $0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac142}$
4 - 2	$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) = D_{ac421}$ $0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) = D_{ac422}$
4 - 3	$0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac341}$ $0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac342}$
4 - 5	$0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) = D_{ac541}$ $0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) = D_{ac542}$
5 - 2 - 1	$0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac151}$ $0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac152}$

5 - 2	$0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) = D_{ac251}$ $0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) = D_{ac252}$
5 - 4 - 3	$0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac351}$ $0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac352}$
5 - 4	$0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) = D_{ac451}$ $0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) = D_{ac452}$

4.2.2.2.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน

เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันเป็นการกำหนดค่าดิสเพอร์ชันสะสมของทุกสัญญาณ ความยาวคลื่นที่ทุกโนดปลายทาง Y ต้องมีค่าไม่เกิน $\pm D_{max}$ เนื่องจาก D_{max} คือ ค่าดิสเพอร์ชันมากที่สุดที่ไม่ทำให้พัลส์สัญญาณผิดเพี้ยนจนไม่สามารถชดเชยความผิดเพี้ยนให้กลับมาสู่สัญญาณเดิมได้ ในวิทยานิพนธ์เลือกค่า $D_{max} = 1600$ ps/nm (ส่งสัญญาณที่ความเร็ว 10Gb/s) [41] โดยชุดรูปแบบบอสมการเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันแสดงไว้ในตารางที่ 4.5 ดังนี้

ตารางที่ 4.5 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณ 2 ความยาวคลื่น

กรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

รูปแบบการส่งสัญญาณ	รูปแบบบอสมการ
λ_1 ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 2	$-1600 \leq D_{ac211} \leq 1600$
λ_2 ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 2	$-1600 \leq D_{ac212} \leq 1600$
λ_1 ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac311} \leq 1600$
λ_2 ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac312} \leq 1600$
λ_1 ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac411} \leq 1600$
λ_2 ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac412} \leq 1600$
λ_1 ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 5	$-1600 \leq D_{ac511} \leq 1600$
λ_2 ส่งจาก โหนด 1 ไป โหนด 5	$-1600 \leq D_{ac512} \leq 1600$
λ_1 ส่งจาก โหนด 2 ไป โหนด 1	$-1600 \leq D_{ac121} \leq 1600$

λ_2 ส่งจาก โหนด 5 ไป โหนด 2	$-1600 \leq D_{ac252} \leq 1600$
λ_1 ส่งจาก โหนด 5 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac151} \leq 1600$
λ_2 ส่งจาก โหนด 5 ไป โหนด 3	$-1600 \leq D_{ac152} \leq 1600$
λ_1 ส่งจาก โหนด 5 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac451} \leq 1600$
λ_2 ส่งจาก โหนด 5 ไป โหนด 4	$-1600 \leq D_{ac452} \leq 1600$

4.2.2.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม

เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม คือ จำนวนหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันที่วางลงในแต่ละขายเชื่อมโยงต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์เท่านั้น

4.2.2.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นการกำหนดจำนวนหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันที่น้อยสุดในโครงข่ายในขณะเดียวกันจำนวนหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันน้อยสุดนี้ยังคงรักษาไว้ซึ่งประสิทธิภาพการส่งสัญญาณภายในโครงข่ายได้

4.2.2.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

สำหรับการทำ Optimization ปัญหาแบบ MILP เราเลือกใช้โปรแกรม X-press.MP ในการแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต ผลเฉลยที่ได้จากการจำลองโครงข่ายโดยการส่งผ่านสัญญาณ 2 ความยาวคลื่นขอบในโครงข่ายตัวอย่าง คือจำนวนหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงทำงานในแต่ละขายเชื่อมโยงของโครงข่ายและค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ทุกโหนดปลายทาง Y

ในกรณีของการใช้ NS-DCU บนโครงข่ายตัวอย่างไม่สามารถทำได้เพราะมีข้อจำกัดของดิสเพอร์ชันสะสมของบางเส้นทางเกินค่า $-D_{max}$ ซึ่งเป็นผลมาจาก over - under compensation พิจารณาได้จากการส่งสัญญาณจากโหนด 1 ไปยังโหนด 5 มีระยะทางยาว 350 km เราจะพิจารณาค่าดิสเพอร์ชันสะสมของความยาวคลื่นที่เป็นหลักในการพิจารณาคือ 1520.25 nm และ 1577.03 nm จาก

ตารางที่ 4.3 ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm จะเป็นค่าแรกที่ทำให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมถึงค่า D_{max} จากสมการที่ (3.1) และสมการที่ (3.2) เราต้องการให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าไม่เกิน 1600 ps/nm เราสามารถหาจำนวน NS-DCU ที่ต้องการในขายเชื่อมโยงได้ดังนี้

(เพื่อความสะดวกในการอธิบาย เราจะพิจารณาเส้นทางจากโนด 1 ไปยังโนด 5 เป็นชายเชื่อมโยงเดียวกัน)

$$(D_2 + L_{15}) + (D_{comp2} \times N_{15}) = D_{ac512} \leq D_{max} \quad (4.2)$$

เนื่องจากค่า D_{comp1} มีค่าเป็นลบ เราสามารถจัดสมการเพื่อหาจำนวนหน่วย NS-DCU ได้

$$\frac{(D_2 + L_{15}) - D_{max}}{D_{comp2}} \leq N_{15}$$

เมื่อแทนค่าจากตารางที่ 4.3

$$\frac{(17.8515 \times 350) - 1600}{1504.85} = 3.0887 \leq N_{15}$$

ฉะนั้นเราต้องการ NS-DCU อย่างน้อยที่สุดจำนวน 4 ตัว เพื่อไม่ให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm มีค่าเกิน 1600 ps/nm แต่ในขณะเดียวกันเมื่อสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1520.25 nm เดินทางไปถึงที่ปลายทางมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเท่ากับ $(15.0125 \times 350) + (-1788.75 \times 4) = -1900.63$ ps/nm ด้วยเหตุนี้ทำให้เราไม่สามารถใช้ NS-DCU บนโครงข่ายตัวอย่างที่มีการส่งสัญญาณตั้งแต่ 1520.25 nm ถึง 1577.03 nm ได้ และกรณีของ SC-DCU ผลเฉลยได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และ ตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ผลเฉลยจำนวน SC-DCU จากการทำ MILP optimization

กรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน	จำนวน
N_{12}	2
N_{13}	1
N_{21}	2
N_{24}	2
N_{25}	1
N_{31}	1
N_{34}	2

N_{42}	2
N_{43}	2
N_{45}	2
N_{52}	1
N_{54}	2
N_{min}	20

ตารางที่ 4.7 ผลเฉลยค่าดิสเพอร์ชันสะสม จากการทำ MILP Optimization

กรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

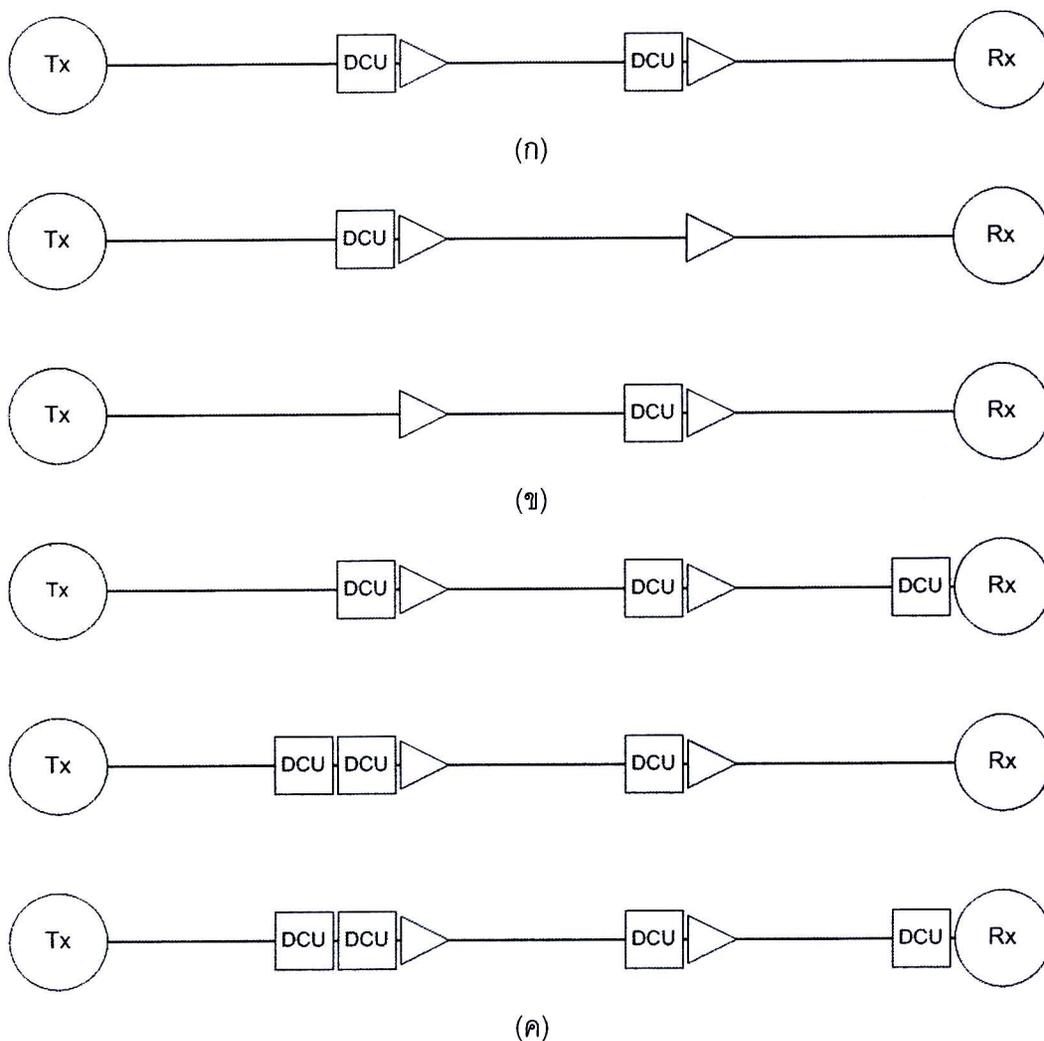
	ดิสเพอร์ชันสะสม (ps/nm)			ดิสเพอร์ชันสะสม (ps/nm)	
	1520.25 nm	1577.03 nm		1520.25 nm	1577.03 nm
D_{ac21i}	769.65	769.68	D_{ac43i}	-356.29	-542.19
D_{ac31i}	760.14	844.63	D_{ac53i}	-112.09	-370.32
D_{ac41i}	403.84	302.44	D_{ac14i}	403.84	302.44
D_{ac51i}	779.16	748.73	D_{ac24i}	19.02	-95.90
D_{ac12i}	769.65	796.68	D_{ac34i}	-356.29	-542.19
D_{ac32i}	-337.27	-638.09	D_{ac54i}	244.21	171.87
D_{ac42i}	19.02	-95.90	D_{ac15i}	779.16	748.73
D_{ac52i}	9.51	-47.95	D_{ac25i}	9.51	-47.95
D'_{ac13i}	760.14	844.63	D_{ac35i}	-112.09	-370.32
D_{ac23i}	-337.27	-638.09	D_{ac45i}	244.21	171.87

อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ได้กำหนดขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงกับหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU และ NS-DCU ที่มีจำนวนช่องสัญญาณที่น้อยลงทำให้ประสิทธิภาพในการใช้ช่องสัญญาณลดน้อยลง จากผลเฉลยในตารางที่ 4.8 และ ตารางที่ 4.9 แสดงจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงและจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

น้อยสุดทั่วทั้งโครงข่าย นอกจากนี้พบว่าทุกค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทาง Y ใด ๆ ของโครงข่ายมีค่าอยู่ในช่วงที่ได้กำหนดเอาไว้ตามเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน

4.2.2.4 การวางตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันลงในโครงข่าย จะนำผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ได้จากขั้นตอนที่ 4.2.2.3 ไปใช้ต่อไป ในความเป็นจริงแล้วเมื่อเราพิจารณาเฉพาะผลของดิสเพอร์ชัน เราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตำแหน่งใดๆ บนข่ายเชื่อมโยงเนื่องจากตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันไม่ส่งผลถึงค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทาง แต่เราเลือกให้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันวางในตำแหน่งที่สัญญาณมีกำลังต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น โดยเราจะวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเข้าเครื่องขยายสัญญาณตัวอย่างการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในกรณีที่จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีจำนวนเท่ากับจำนวนเครื่องขยายสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงหนึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 (ก) ตัวอย่างการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในกรณีที่จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนเครื่องขยายสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง เราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเข้าเครื่องขยายสัญญาณใดๆ แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 (ข) และตัวอย่างการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในกรณีที่จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีจำนวนมากกว่าจำนวนเครื่องขยายสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง เราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันต่อกันแสดงได้ดังรูปที่ 4.6 (ค)

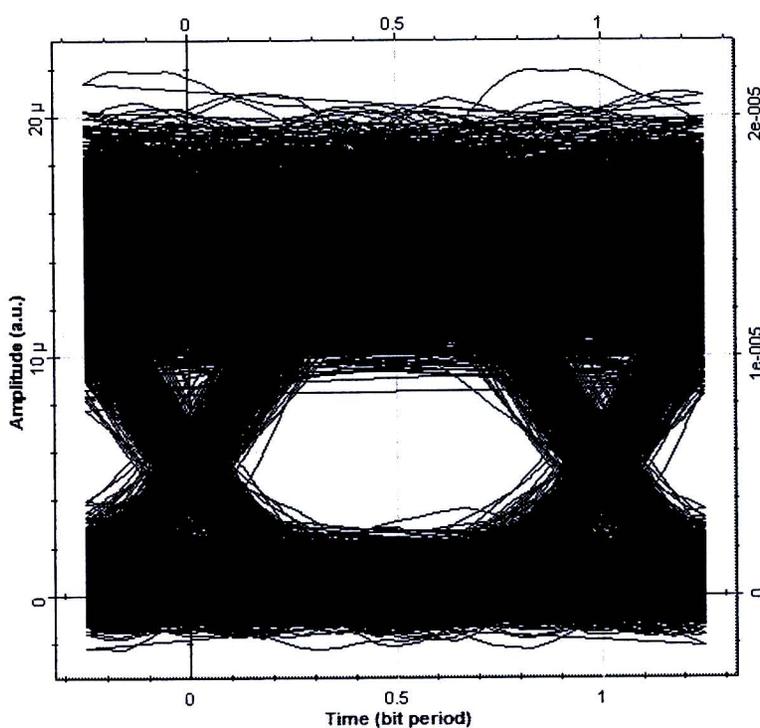


รูปที่ 4.6 ตำแหน่ง SC-DCU บนข่ายเชื่อมโยง

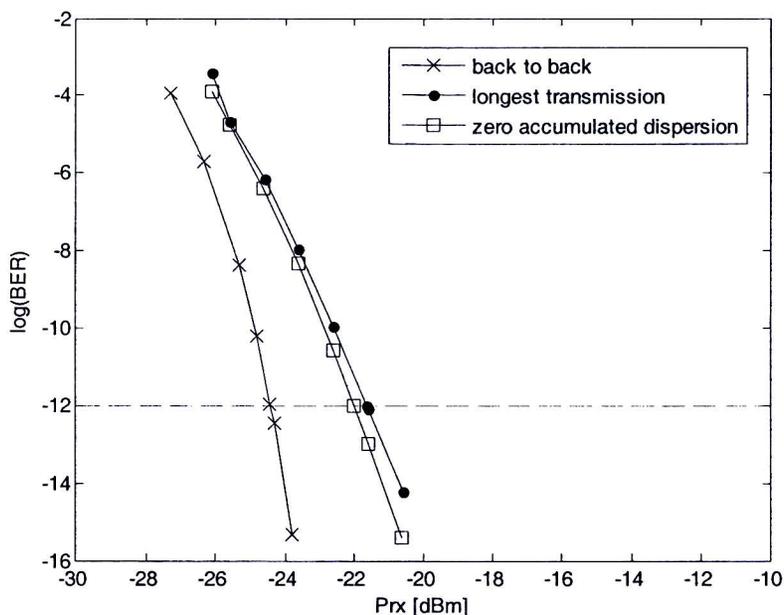
(ก) กรณีจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีจำนวนเท่ากับจำนวนเครื่องขยายสัญญาณ (ข) กรณีที่จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนเครื่องขยายสัญญาณ (ค) กรณีที่จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีจำนวนมากกว่าจำนวนเครื่องขยายสัญญาณ

ขั้นตอนต่อไปเป็นนำมาผลเฉลยจากหัวข้อที่ 4.2.2.3 จำลองเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดคือเส้นทางการส่งสัญญาณจากโนด 3 ไปโนด 5 เป็นระยะทาง 390 km หลังจากวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันแล้วด้วยโปรแกรม OptiSys 8.0 (ไม่คิดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง) โดยจะส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่น 1577.03 nm ได้ Eye Diagram ของสัญญาณความยาวคลื่น 1577.03 nm โดยมีอัตราบิตเท่ากับ 10 Gb/s Sequence Length เท่ากับ 2048 บิต และจำนวน Sample Per Bit เท่ากับ 1024 ได้สัญญาณที่ปลายทางซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเท่ากับ -370.315 ps/nm มีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) เท่ากับ 7.02899 และ ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER)

เท่ากับ 9.45266×10^{-13} แสดงดังรูปที่ 4.7 ทั้งนี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณไม่ผ่านเส้นใยแสง (Back to Back) และกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแสดงได้ดังรูปที่ 4.8 ซึ่งมีค่าระดับกำลังแสงที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้อัตราความผิดพลาดบิตคงเดิม (Power Penalty) ณ ค่า BER ที่ยอมรับได้เท่ากับ 10^{-12} [43] เท่ากับ 2.788 dB อีกทั้งยังพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมปลายทางอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแทนด้วยจุดสีดำและกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อชดเชยให้ดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าเท่ากับศูนย์แทนด้วยสี่เหลี่ยมมีค่าไม่ต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.7 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด
กรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ



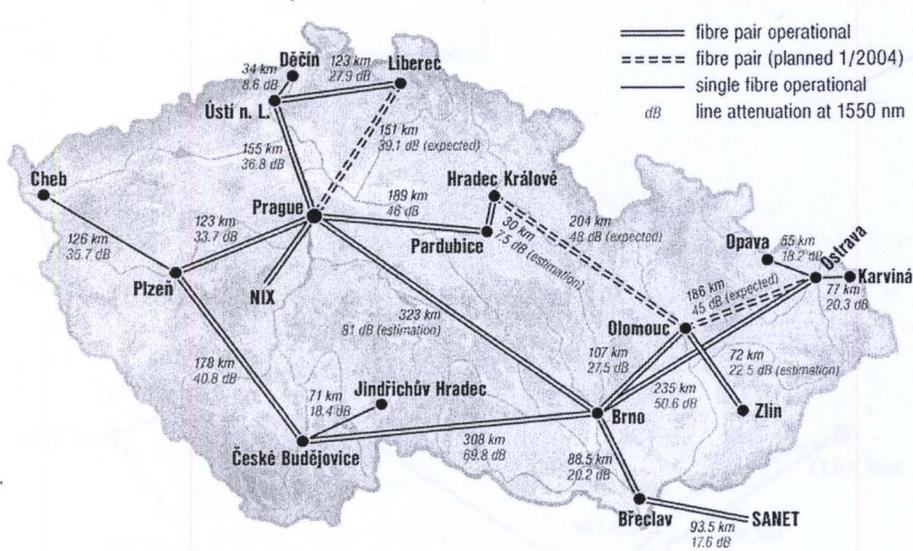
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดกรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

วิธีการคำนวณหาจำนวนหน่วยชดเชยอีกวิธีหนึ่งที่สามารถทำได้ คือ การคำนวณจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันแต่ละข่ายเชื่อมโยงแยกออกจากกัน (Link-by-Link Calculation) โดยมีแนวคิดคือให้ค่าดิสเพอร์ชันเริ่มต้นที่ต้นทางมีค่าเท่ากับศูนย์และต้องจัดการให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทางมีค่าเท่ากับศูนย์เช่นกันเพื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมเริ่มต้นที่ออกจากโนดต้นทางใหม่มีค่าเท่ากับศูนย์เช่นเดิม แต่ในทางปฏิบัติแล้วไม่สามารถใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพียงอย่างเดียวชดเชยดิสเพอร์ชันให้เป็นศูนย์พร้อมกันทุกความยาวคลื่นได้ดังตารางที่ 4.8 แสดงจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันจากการคำนวณแบบ Link-by-Link และค่าดิสเพอร์ชันสะสมก่อนและหลังจากชดเชยแล้ว ดังนั้นสัญญาณจึงต้องถูกสร้างขึ้นใหม่ทุกๆ Intermediate Node ซึ่งกระบวนการแบบนี้เป็นลักษณะโครงข่ายแบบ Opaque มีค่าใช้จ่ายสำหรับระบบจุดต่อจุดอาจสูงมากเนื่องด้วยจำนวนอุปกรณ์ Regenerator ที่ทุกๆ โหนด เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ได้จากผลเฉลยในตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ได้ต่างกันไม่มาก แต่อัลกอริทึมที่สร้างขึ้นมามีข้อดีคือสามารถใช้งานได้กับโครงข่ายทางแสงแบบ Transparency ซึ่งตัดปัญหาเรื่องอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการส่งสัญญาณที่ความเร็วสูง

ตารางที่ 4.8 จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน ค่าดิสเพอร์ชันสะสมก่อนและหลังจากชดเชยแล้ว
จากการคำนวณแบบ Link-by-Link

ข่ายเชื่อมโยง	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมก่อนชดเชย		จำนวน DCU	ค่าดิสเพอร์ชันสะสมหลังชดเชย	
	1520.25 nm	1577.03 nm		1520.25 nm	1577.03 nm
L_{12}	3753.13	4462.88	2	769.65	796.68
L_{13}	2251.88	2677.73	1	760.14	844.63
L_{21}	3753.13	4462.88	2	769.65	796.68
L_{24}	3002.50	3570.30	2	19.02	-95.90
L_{25}	1501.25	1785.15	1	9.51	-47.95
L_{31}	2251.88	2677.73	1	760.14	844.63
L_{34}	2627.19	3124.01	1	1135.45	1290.91
L_{42}	3002.50	3570.30	2	19.02	-95.90
L_{43}	2627.19	3124.01	1	1135.45	1290.91
L_{45}	3227.69	3838.07	2	244.21	171.87
L_{52}	1501.25	1785.15	1	9.51	-47.95
L_{54}	3227.69	3838.07	2	244.21	171.87

4.2.3 โครงข่ายส่วนหนึ่งของ Optical Pan European Network (OPEN)

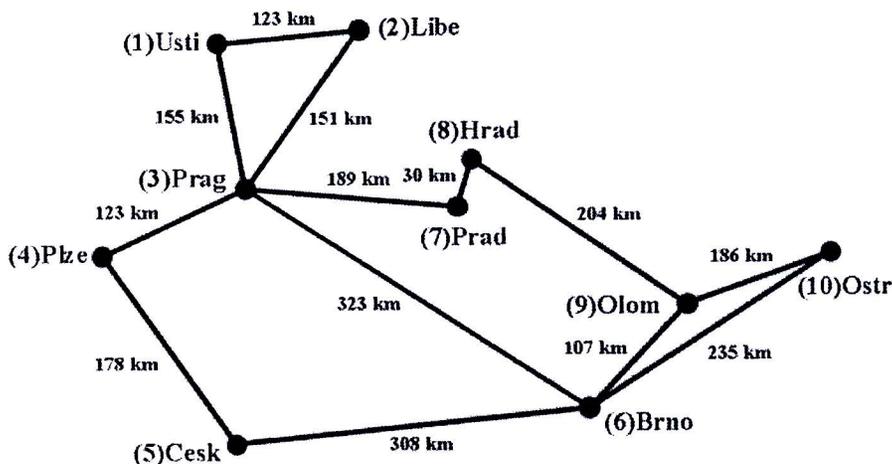


รูปที่ 4.9 โครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN

โครงข่ายที่จะนำมาใช้ในการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน คือ โครงข่ายส่วนหนึ่งของ Optical Pan European Network (OPEN) ประกอบด้วย 13 ข่ายเชื่อมโยง 10 โหนด โดยแต่ละข่ายเชื่อมโยงมีระยะทางตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.9 [44] รวมระยะทางทั้งหมด 1882 km อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่าย OPEN ด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดอธิบายจะดำเนินการตามอัลกอริทึมที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2 กรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

ในการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันใช้สัญญาณ WDM 72 ความยาวคลื่นตั้งแต่ความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึงความยาวคลื่น 1577.03 nm ที่ความยาวคลื่นกลาง (center wavelength) เท่ากับ 1550.12 nm ด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.8 nm แต่เพื่อความรวดเร็วในการหาผลเฉลยเราใช้สัญญาณ 2 ความยาวคลื่น คือ 1520.25 nm และ 1577.03 nm ส่งผ่านไปในส่วนหนึ่งของโครงข่าย OPEN ซึ่งแทนด้วยตัวเลขแทนโหนด 1-10 ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 [44] การกำหนดความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU ในแต่ละความยาวคลื่นจะคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 จากนั้นแก้สมการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเพื่อหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดเพื่อรองรับการส่ง 2

ความยาวคลื่นบนโครงข่าย OPEN กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติเราจะดำเนินการตามอัลกอริทึมที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2.1 - 4.2.2.3 ได้ผลเฉลยดังนี้



รูปที่ 4.10 โครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN

ในกรณีการใช้ NS-DCU บนโครงข่าย OPEN ไม่สามารถทำได้ เพราะมีข้อจำกัดของดิสเพอร์ชันสะสมบางเส้นทางเกินค่า $-D_{max}$ พิจารณาได้จากการส่งสัญญาณจากโหนด 1 ไปยังโหนด 10 ซึ่งเป็นกรณีที่มีระยะทางยาวที่สุด 713 km เราจะทำการหาค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ความยาวคลื่นที่เป็นหลักในการพิจารณาคือ 1520.25 nm และ 1577.03 nm จาก

ตารางที่ 4.3 ค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm จะเป็นค่าแรกที่ทำให้ถึงค่า D_{max} เราสามารถหาระยะทางในการวาง NS-DCU ตัวแรกได้ ดังนี้

$$L = \frac{1600}{17.8515} = 89.62 \text{ km}$$

ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm หลังจากวาง NS-DCU ตัวที่หนึ่งมีค่าเท่ากับ

$$D_{ac} = 1600 - 1504.85 = 95.15 \text{ ps/nm}$$

ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ความยาวคลื่น 1520.25 nm หลังจากวาง NS-DCU ตัวที่หนึ่งมีค่าเท่ากับ

$$D_{ac} = (89.62 \times 15.0125) - 1788.75 = -443.32 \text{ ps/nm}$$

หลังจากที่วาง NS-DCU ไปแล้วสัญญาณที่ถูกส่งจะเดินทางต่อไปด้วยค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่มากขึ้น โดยค่าดิสเพอร์ชันที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm จะเป็นค่าแรกที่ทำให้ถึงค่า D_{max} เช่นเคย เราสามารถหาระยะทางการวาง DCU ตัวที่สองได้ดังนี้

$$L = \frac{1600 - 95.15}{17.8515} = 84.29 \text{ km}$$

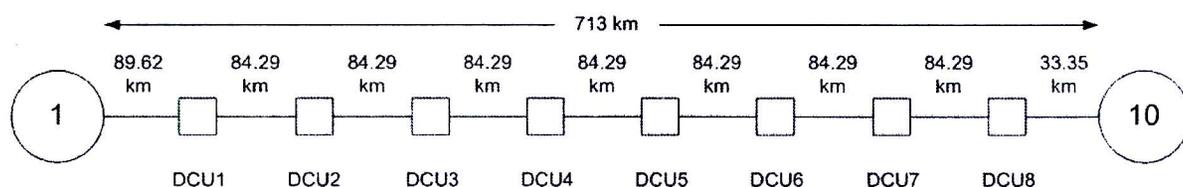
ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm หลังจากวาง NS-DCU ตัวที่สองมีค่าเท่ากับ

$$D_{ac} = (173.91 \times 17.8515) - (2 \times 1504.85) = 94.85 \text{ ps/nm}$$

ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ความยาวคลื่น 1520.25 nm หลังจากวาง NS-DCU ตัวที่สองมีค่าเท่ากับ

$$D_{ac} = (173.91 \times 15.0125) - (2 \times 1788.75) = -966.73 \text{ ps/nm}$$

การวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันจะเป็นเช่นนี้เรื่อยไป โดยที่จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันจากโนด 1 ไปยังโนด 10 มีทั้งหมด 8 ตัว ซึ่งตำแหน่งในการวางและค่าดิสเพอร์ชันที่ระยะทางต่างๆ แสดงได้ในรูปที่ 4.11



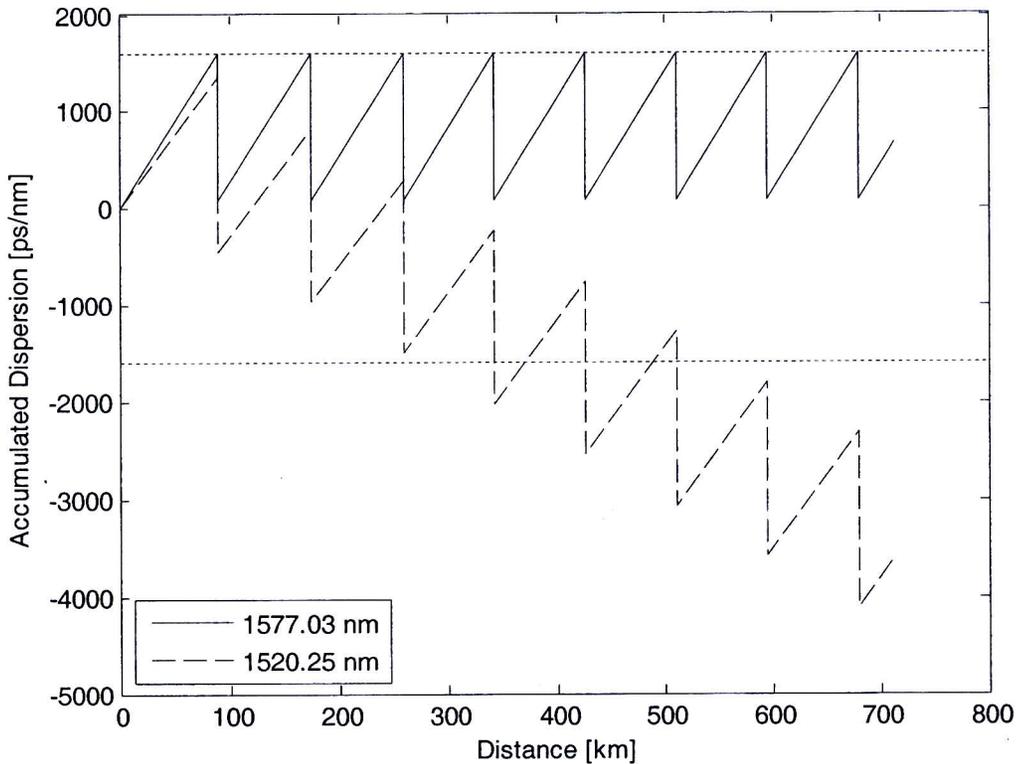
รูปที่ 4.11 ตำแหน่ง NS-DCU บนเส้นทางจากโนดต้นทาง 1 ไปยังโนดปลายทาง 10

ค่าดิสเพอร์ชันสะสมปลายทางโนด 10 ที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm มีค่าเท่ากับ

$$D_{ac1012} = (713 \times 17.8515) - (8 \times 1504.85) = 689.3195 \text{ ps/nm}$$

ค่าดิสเพอร์ชันสะสมปลายทางโนด 10 ที่ความยาวคลื่น 1520.25 nm มีค่าเท่ากับ

$$D_{ac1011} = (713 \times 15.0125) - (8 \times 1788.75) = -3606.0875 \text{ ps/nm}$$



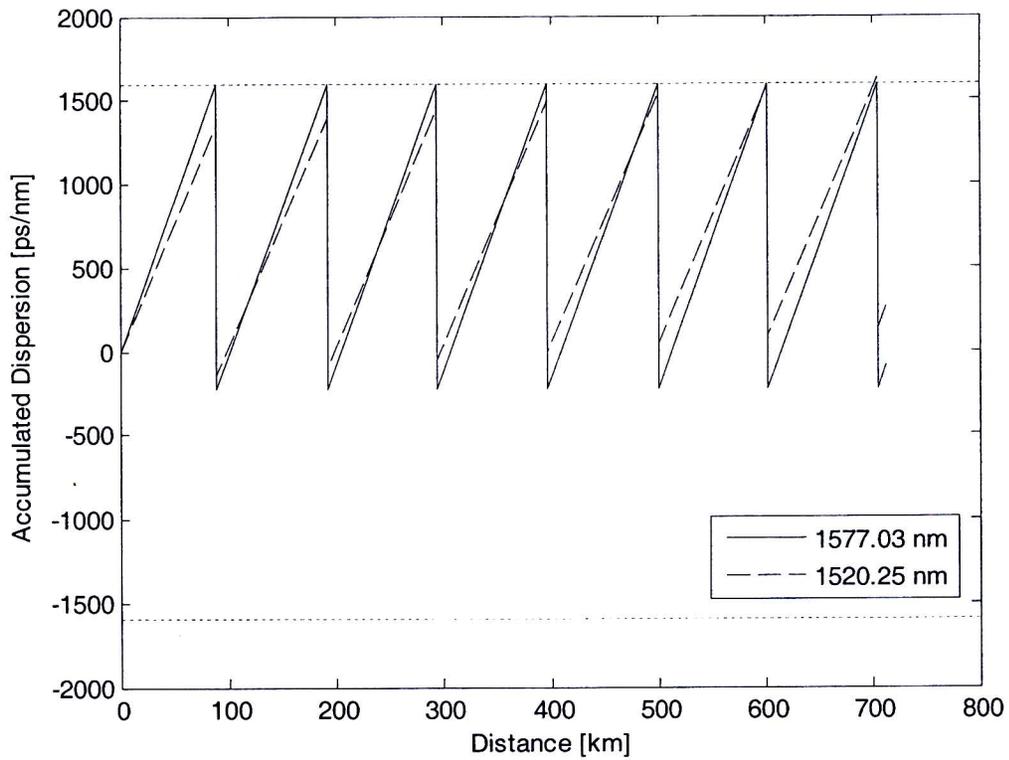
รูปที่ 4.12 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมระหว่างโนด 1 ถึงโนด 10 เมื่อใช้ NS-DCU โดยกำหนดระยะทางการวางเครื่องขยายสัญญาณเท่ากับระยะทางในการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

ค่าดิสเพอร์ชันสะสมระหว่างโนด 1 ถึงโนด 10 เมื่อใช้ NS-DCU แสดงได้ดังรูปที่ 4.12 เห็นได้ว่าเมื่อสัญญาณเดินทางไปถึงปลายทางค่า D_{ac1011} เกินค่า $-D_{max}$ ในขณะที่ค่า D_{ac1012} ยังไม่เกินค่า D_{max} ด้วยเหตุนี้ทำให้เราไม่สามารถใช้ NS-DCU บนโครงข่าย OPEN ที่มีการส่งสัญญาณตั้งแต่ 1520.25 nm ถึง 1577.03 nm ได้ แต่สามารถวาง NS-DCU บนโครงข่าย OPEN ที่มีการส่งสัญญาณประมาณ 1544.53 nm ถึง 1556.56 nm ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการใช้ช่องสัญญาณลดน้อยลง และกรณีของ SC-DCU ผลเฉลยได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.9 และ

ตารางที่ 4.10

จากรูปที่ 4.12 ทำให้ทราบว่าไม่สามารถใช้ NS-DCU ชดเชยดิสเพอร์ชันในโครงข่ายที่มีระยะทางมากกว่า 500 km เมื่อใช้สัญญาณ WDM 72 ความยาวคลื่นตั้งแต่ความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึงความยาวคลื่น 1577.03 nm ซึ่งแตกต่างกับรูปที่ 4.13 กรณีเมื่อวาง SC-DCU ค่าดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณที่ความยาวคลื่นทั้งสองอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้





รูปที่ 4.13 ค่าดิสเพอร์ชันสะสมระหว่างโนด 1 ถึงโนด 10 เมื่อใช้ SC-DCU โดยกำหนดระยะทางในการวางเครื่องขยายสัญญาณเท่ากับระยะทางในการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

ตารางที่ 4.9 ผลเฉลยจำนวน SC-DCU จากการทำ MILP Optimization

กรณีโครงข่าย OPEN ทำงานปกติ

หน่วยชดเชย ดิสเพอร์ชัน	จำนวน	หน่วยชดเชย ดิสเพอร์ชัน	จำนวน	หน่วยชดเชย ดิสเพอร์ชัน	จำนวน
N_{12}	1	N_{43}	1	N_{78}	0
N_{13}	1	N_{45}	1	N_{87}	1
N_{21}	1	N_{54}	2	N_{89}	2
N_{23}	1	N_{56}	3	N_{96}	1
N_{31}	2	N_{63}	3	N_{98}	2
N_{32}	2	N_{65}	3	N_{910}	2
N_{34}	2	N_{69}	1	N_{106}	2
N_{36}	4	N_{610}	2	N_{109}	1

N_{37}	2	N_7	1	N_{\min}	44
----------	---	-------	---	------------	----

ตารางที่ 4.10 ผลเฉลยค่าดิสเพอร์ชันสะสม จากการทำ MILP Optimization

กรณีโครงข่าย OPEN ทำงานปกติ

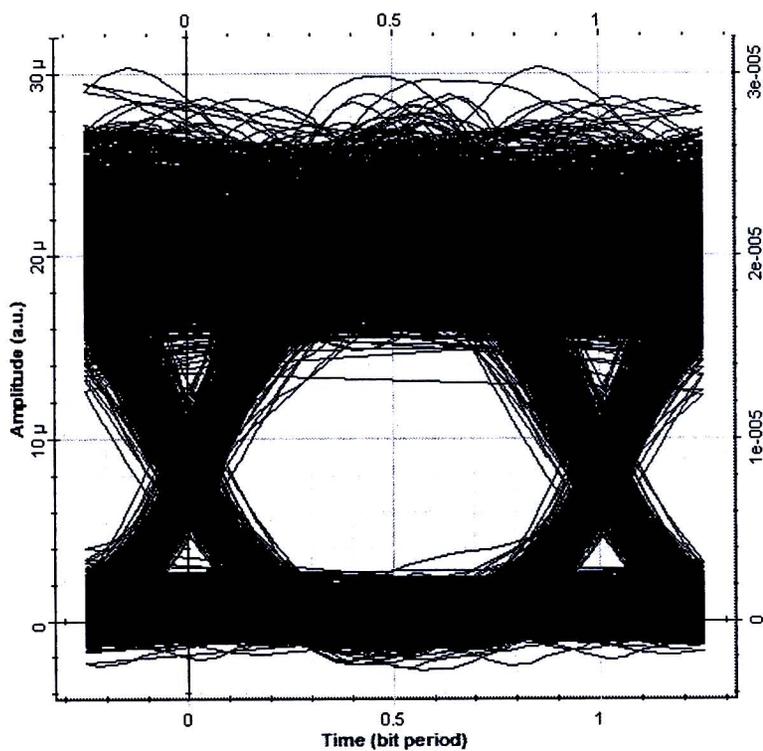
	ดิสเพอร์ชันสะสม (ps/nm)			ดิสเพอร์ชันสะสม (ps/nm)	
	1520.25 nm	1577.03 nm		1520.25 nm	1577.03 nm
D_{ac21i}	357.04	365.56	D_{ac12i}	357.04	365.56
D_{ac31i}	837.44	936.80	D_{ac32i}	777.39	865.40
D_{ac41i}	-295.03	-527.82	D_{ac42i}	-355.08	-599.23
D_{ac51i}	887.70	819.56	D_{ac52i}	827.65	748.16
D_{ac61i}	-271.53	-617.87	D_{ac62i}	-331.58	-689.29
D_{ac71i}	695.80	650.38	D_{ac72i}	635.75	578.97
D_{ac81i}	1146.18	1185.92	D_{ac82i}	1086.13	1114.52
D_{ac91i}	1229.73	1167.27	D_{ac92i}	1169.68	1095.86
D_{ac101i}	277.41	-83.14	D_{ac102i}	217.36	-154.55
D_{ac13i}	-652.06	-893.38	D_{ac14i}	-295.03	-527.82
D_{ac23i}	-712.11	-964.78	D_{ac24i}	-355.08	-599.23
D_{ac43i}	-1132.46	-1464.63	D_{ac34i}	357.04	365.56
D_{ac53i}	50.26	-117.24	D_{ac54i}	1182.73	1347.39
D_{ac63i}	-1108.96	-1554.69	D_{ac64i}	-751.93	-1189.13
D_{ac73i}	-141.64	-286.43	D_{ac74i}	215.40	79.13
D_{ac83i}	308.74	249.12	D_{ac84i}	665.78	614.67
D_{ac93i}	392.29	230.47	D_{ac94i}	749.33	596.02
D_{ac103i}	-560.03	-1019.94	D_{ac104i}	-202.99	-654.39
D_{ac15i}	-601.80	-1010.62	D_{ac16i}	-271.53	-617.88

D_{ac25i}	-661.85	-1082.02	D_{ac26i}	-331.58	-689.29
D_{ac35i}	50.26	-117.24	D_{ac36i}	380.54	275.50
D_{ac45i}	-306.78	-482.79	D_{ac46i}	-751.93	-1189.13
D_{ac65i}	155.35	7.72	D_{ac56i}	155.35	7.72
D_{ac75i}	-91.38	-403.67	D_{ac76i}	-838.74	-1233.36
D_{ac85i}	359.00	131.88	D_{ac86i}	200.39	61.28
D_{ac95i}	272.19	87.65	D_{ac96i}	116.84	79.93
D_{ac105i}	704.29	542.47	D_{ac106i}	548.94	534.74
D_{ac17i}	695.80	650.38	D_{ac18i}	-343.33	-644.26
D_{ac27i}	635.75	578.97	D_{ac28i}	-403.38	-715.67
D_{ac37i}	1347.86	1543.75	D_{ac38i}	308.74	249.12
D_{ac47i}	215.40	79.13	D_{ac48i}	-823.73	-1251.41
D_{ac57i}	1398.13	1426.52	D_{ac58i}	359.00	131.88
D_{ac67i}	650.71	596.82	D_{ac68i}	200.39	61.28
D_{ac87i}	450.38	535.55	D_{ac78i}	-1039.12	-1294.63
D_{ac97i}	533.93	516.89	D_{ac98i}	83.55	-18.65
D_{ac107i}	347.25	176.91	D_{ac108i}	-103.13	-358.64
D_{ac19i}	-259.78	-662.91	D_{ac110i}	277.41	-83.14
D_{ac29i}	-319.83	-734.32	D_{ac210i}	217.36	-154.55
D_{ac39i}	392.29	230.47	D_{ac310i}	929.48	810.24
D_{ac49i}	-740.18	-1234.16	D_{ac410i}	-202.99	-654.39
D_{ac59i}	272.19	87.65	D_{ac510i}	704.29	542.47
D_{ac69i}	116.84	79.93	D_{ac610i}	548.94	534.74
D_{ac79i}	-955.58	-1313.29	D_{ac710i}	347.25	176.91
D_{ac89i}	83.55	-18.65	D_{ac810i}	1386.38	1471.55
D_{ac109i}	-186.68	-339.98	D_{ac910i}	1302.83	1490.20

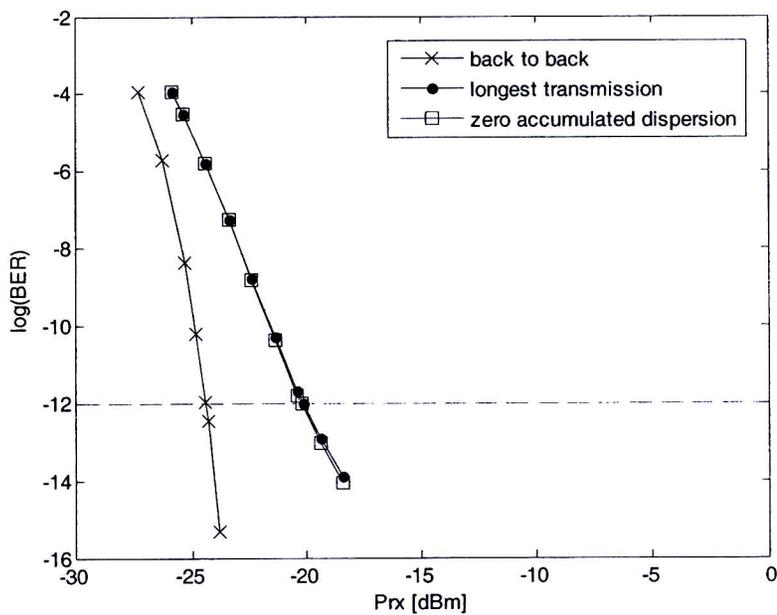
อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างเหมาะสมที่สุดที่ได้กำหนดขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงกับหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU และ NS-DCU ที่มีจำนวนช่องสัญญาณที่น้อยลงทำให้ประสิทธิภาพในการใช้ช่องสัญญาณลดน้อยลง จากผลเฉลยในตารางที่ 4.9 และ

ตารางที่ 4.10 แสดงจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงและจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดทั่วทั้งโครงข่าย นอกจากนี้พบว่าทุกค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทาง Y ใด ๆ ของโครงข่ายมีค่าอยู่ในช่วงที่ได้กำหนดเอาไว้ตามเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน

การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงในโครงข่าย เราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตำแหน่งใดๆ บนข่ายเชื่อมโยง เนื่องจากตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันไม่ส่งผลถึงค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทาง แต่เราเลือกให้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันวางในตำแหน่งที่สัญญาณมีกำลังต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น โดยเราจะวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันขาเข้าเครื่องขยายสัญญาณ ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำลองเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดคือเส้นทางการส่งสัญญาณจากโนด 1 ไปโนด 10 เป็นระยะทาง 713 km หลังจากวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันแล้วด้วยโปรแกรม OptiSys 8.0 (ไม่คิดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง) โดยจะส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่น 1577.03 nm ได้ Eye Diagram ของสัญญาณความยาวคลื่น 1577.03 nm โดยมีอัตราบิตเท่ากับ 10 Gb/s Sequence Length เท่ากับ 2048 บิต และจำนวน Sample Per Bit เท่ากับ 512 ได้สัญญาณที่ปลายทางซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันสะสม -83.1405 ps/nm มีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) เท่ากับ 7.00949 และ ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER) เท่ากับ 1.00829×10^{-12} แสดงดังรูปที่ 4.14 ทั้งนี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณไม่ผ่านเส้นใยแสง (Back to Back) และกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแสดงได้ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งมีค่าระดับกำลังแสงที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้อัตราความผิดพลาดบิตคงเดิม (Power Penalty) ณ ค่า BER ที่ยอมรับได้เท่ากับ 10^{-12} [43] เท่ากับ 4.268 dB อีกทั้งยังพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมปลายทางอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแทนด้วยจุดสีดำและกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อชดเชยให้ดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าเท่ากับศูนย์แทนด้วยสีเหลี่ยมมีค่าไม่ต่างกันมากนัก

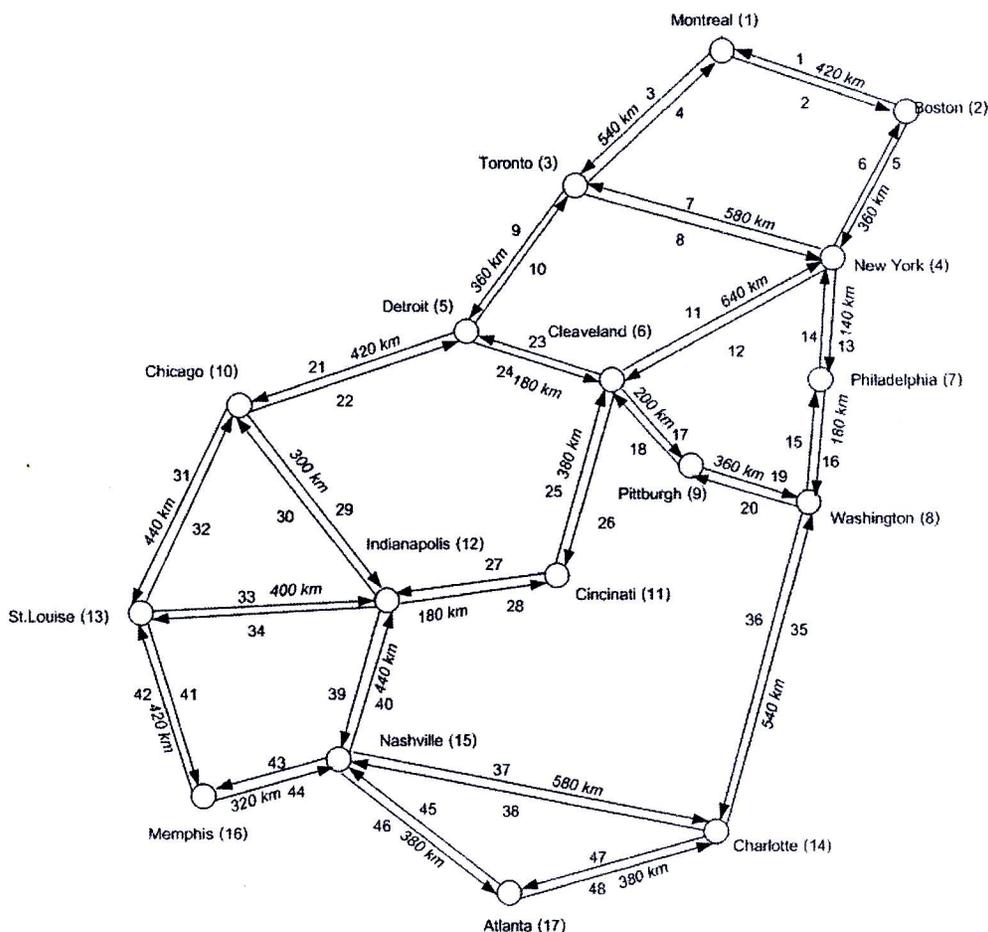


รูปที่ 4.14 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด
กรณีโครงข่าย OPEN ทำงานปกติ



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ log (BER) ของเส้นทางการสื่อสาร
ที่ยาวที่สุดกรณีโครงข่าย OPEN ทำงานปกติ

4.2.4 โครงข่ายส่วนหนึ่งของ North-American Reference Network (NARNET)



รูปที่ 4.16 โครงข่ายส่วนหนึ่งของ NARNET

โครงข่ายที่นำมาใช้ในการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน คือ โครงข่ายส่วนหนึ่งของ North-American Reference Network (NARNET) ประกอบด้วย 24 ข่ายเชื่อมโยง 17 โหนด โดยแต่ละข่ายเชื่อมโยงมีระยะทางตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.16 อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพในโครงข่าย NARNET ด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดอธิบายจะดำเนินการตามอัลกอริทึมที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2 กรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

ในการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันใช้สัญญาณ WDM 72 ความยาวคลื่นตั้งแต่ความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึงความยาวคลื่น 1577.03 nm ที่ความยาวคลื่นกลาง (center wavelength) เท่ากับ 1550.12 nm ด้วยระยะห่างระหว่างช่องสัญญาณเท่ากับ 0.8 nm แต่เพื่อความรวดเร็วในการหาผลเฉลยเราใช้สัญญาณ 2 ความยาวคลื่น คือ 1520.25 nm และ 1577.03 nm ส่งผ่านไปในส่วนหนึ่งของโครงข่าย NARNET ซึ่งแทนด้วยตัวเลขแทนโหนด 1-17 การกำหนด

ความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU ในแต่ละความยาวคลื่นจะคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 จากนั้นแก้สมการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเพื่อหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดเพื่อรองรับการส่ง 2 ความยาวคลื่นบนโครงข่าย NARNET กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติเราจะดำเนินการตามอัลกอริทึมที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2.1 - 4.2.2.3

ในกรณีการใช้ NS-DCU บนโครงข่าย NARNET ไม่สามารถทำได้ ดังที่ได้ให้เหตุผลไปแล้วในหัวข้อ 4.2.3 เนื่องจากผลของการ Over (Under) – Compensation ส่วนในกรณีเมื่อใช้ SC-DCU ที่มีมอดูล DCM - 60 - SMF – C เราไม่สามารถหาคำตอบได้ เนื่องจากปัญหาและข้อจำกัดที่เราพิจารณาอยู่เป็นปัญหาที่เป็นไปไม่ได้ (Infeasible Problem) ดังนั้นเราจึงต้องปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์บางตัวเพื่อให้สามารถหาผลเฉลยกรณีโครงข่าย NARNET ทำงานปกติได้ พิจารณาสมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโหนดต้นทาง Z ไปยังโหนดปลายทาง X และ Y และเงื่อนไขขอบเขตค่าดิสเพอร์ชัน

$$D_{acXZi} + (D_i + L_{XY}) + (D_{compi} \times N_{XY}) = D_{acYZi} \quad (3.1)$$

$$-D_{max} \leq D_{acYZi} \leq D_{max} \quad (3.2)$$

พารามิเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ทั้งหมด 3 ตัวคือ D_{max} , D_i และ D_{compi}

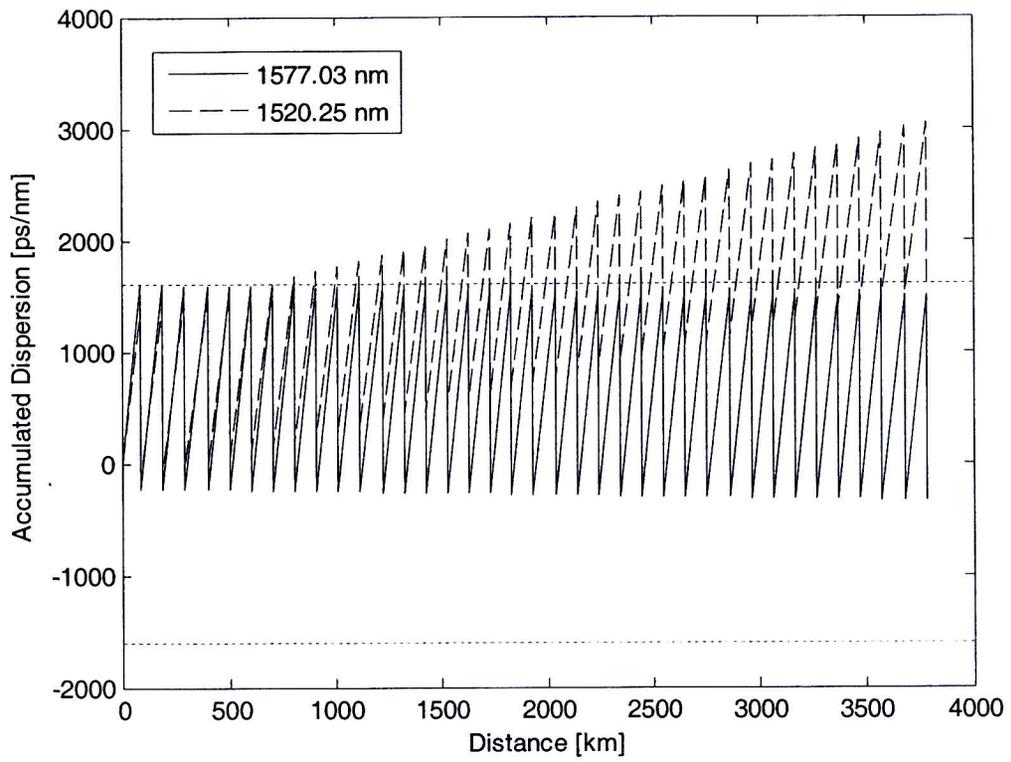
- 1) D_{max} คือ ค่าดิสเพอร์ชันมากที่สุดที่ไม่ทำให้พัลส์สัญญาณเพี้ยนจนไม่สามารถชดเชยให้กลับมาสู่สัญญาณเดิมได้ ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้เราต้องการให้แต่ละช่องสัญญาณมีความเร็ว 10 Gb/s ดังนั้น D_{max} จึงต้องมีค่าเท่ากับ ± 1600 ps/nm ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้
- 2) D_i คือ ค่าดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงที่ความยาวคลื่น λ , ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้เนื่องจากเราต้องการส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึง 1577.03 nm
- 3) D_{compi} คือ ค่าชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ λ , สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความยาวของ DCF ที่อยู่ภายใน SC-DCU ดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ค่าดิสเพอร์ชันของ SC-DCU ที่มอดูลต่างๆ

λ_i (nm)	D_{compi} (ps/nm)		
	DCM - 60 - SMF - C	DCM - 50 - SMF - C	DCM - 40 - SMF - C
1520.25	-1491.74	-1193.44	-895.14
1577.03	-1830.10	-1466.67	-1100.23

เมื่อเราปรับเปลี่ยนค่า D_{compi} ของ SC-DCU แล้ว ส่งผลให้เราสามารถใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C ขดเซยดิสเพอร์ชันบนโครงข่าย NARNET เมื่อส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึง 1577.03 nm เนื่องจากเส้นทางส่งสัญญาณบน NARNET มีจำนวนมากทั้งเส้นทางระยะทางสั้นและเส้นระยะทางยาว ดังนั้นเมื่อเราต้องการใช้หน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายเพื่อให้สามารถขดเซยดิสเพอร์ชันในทุกเส้นทางการส่งสัญญาณ เราจำเป็นต้องลดค่า D_{compi} ให้เป็นค่าลบที่น้อยลง (จาก -1489.5 เป็น -895.14 และ จาก -1830.18 เป็น -1100.23) เพื่อให้สามารถขดเซยดิสเพอร์ชันที่มีค่ามาก (ระยะทางการส่งสัญญาณมาก) โดยใช้จำนวน SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C จำนวนมากและในขณะเดียวกันสามารถขดเซยดิสเพอร์ชันที่มีค่าน้อย (ระยะทางการส่งสัญญาณน้อย) โดยใช้จำนวน SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C จำนวนน้อยได้พร้อมกัน ซึ่งจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 5.3 ต่อไป

อีกหนึ่งวิธีสำหรับการปรับเปลี่ยนค่า D_{compi} คือ จัดรูปแบบของ D_{compi} ให้อยู่ในรูปแบบการผสมของ D_{compi} ของ SC-DCU และ D_{compi} ของ NS-DCU เนื่องจากเมื่อใช้ NS-DCU ขดเซยดิสเพอร์ชันเป็นระยะทางไกลจะเกิด Over Compensation ของสัญญาณความยาวคลื่นต่ำกว่า (1520.25 nm) ดังรูปที่ 4.12 แต่ในทางกลับกันเมื่อใช้ SC-DCU ขดเซยดิสเพอร์ชันเป็นระยะทางไกลจะเกิด Under Compensation ของสัญญาณความยาวคลื่นต่ำกว่า (1520.25 nm) ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งสมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนดต้นทาง Z ไปยังโนดปลายทาง X และ Y เปลี่ยนไปเป็นสมการที่ (4.3) และค่าขดเซยดิสเพอร์ชันของหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความยาวของ DCF ที่อยู่ภายใน NS-DCU สามารถคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 แสดงในตารางที่ 4.12



รูปที่ 4.17 แนวโน้มการเกิด Under Compensation ของสัญญาณความยาวคลื่นต่ำเมื่อใช้ SC-DCU

$$D_{acXZi} + (D_i + L_{XY}) + (D_{comp_i,SC-DCU} \times N_{XY,SC-DCU}) + (D_{comp_i,SC-DCU} \times N_{XY,SC-DCU}) = D_{acYZi} \quad (4.3)$$

โดยที่ D_{acXZi} คือ ดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทาง X เมื่อสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ส่งผ่านมาจากโนดต้นทาง Z

D_{acYZi} คือ ดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทาง Y เมื่อสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ส่งผ่านมาจากโนดต้นทาง Z

D_i คือ ค่าดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงที่ความยาวคลื่น λ_i

$D_{comp_i,SC-DCU}$ คือ ค่าชดเชยดิสเพอร์ชันของ SC-DCU ที่ λ_i

$D_{comp_i,NS-DCU}$ คือ ค่าชดเชยดิสเพอร์ชันของ NS-DCU ที่ λ_i

L_{XY} คือ ความยาวของข่ายเชื่อมโยง XY

$N_{XY,SC-DCU}$ คือ จำนวน SC-DCU บนข่ายเชื่อมโยง XY

$N_{XY,NS-DCU}$ คือ จำนวน NS-DCU บนข่ายเชื่อมโยง XY

ตารางที่ 4.12 ค่าดิสเพอร์ชันของ NS-DCU ที่มีระยะทางการชดเชยดิสเพอร์ชันที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทางต่างๆ

λ_i (nm)	D_{comp_i} (ps/nm)				
	SMF 100 km	SMF 90 km	SMF 80 km	SMF70 km	SMF 60 km
1520.25	-1788.75	-1609.875	-1431	-1252.125	-1073.25
1577.03	-1504.85	-1354.365	-1203.88	-1053.395	-902.91

จากนั้นแก้สมการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเพื่อหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดเพื่อรองรับการส่ง 2 ความยาวคลื่นบนโครงข่าย NARNET กรณีที่โครงข่ายทำงานปกติเราจะดำเนินการตามอัลกอริทึมที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 4.2.2.1 - 4.2.2.3 ได้ผลเฉลยทั้งกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C และในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C และหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU ที่ชดเชยได้พอดีเมื่อ

เปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 80 km ดังตารางที่ 4.13 และ ตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.13 ผลเฉลี่ยจำนวน SC-DCU จากการทำ MILP Optimization

กรณีโครงข่าย NARNET ทำงานปกติ



หน่วยขดเซย ดิสเพอร์ชัน	SC- DCU	Combination		หน่วยขดเซย ดิสเพอร์ชัน	SC- DCU	Combination	
		SC- DCU	NS- DCU			SC- DCU	NS- DCU
N_{1_2}	6	4	0	N_{9_8}	5	3	0
N_{1_3}	9	5	0	N_{10_5}	8	3	1
N_{2_1}	6	4	0	N_{10_12}	5	3	0
N_{2_4}	6	3	0	N_{10_13}	6	4	0
N_{3_1}	9	5	0	N_{11_6}	7	3	1
N_{3_4}	8	5	0	N_{11_12}	4	1	1
N_{3_5}	5	4	0	N_{12_10}	5	3	0
N_{4_2}	6	4	0	N_{12_11}	3	1	1
N_{4_3}	8	6	0	N_{12_13}	6	4	0
N_{4_6}	10	7	0	N_{12_15}	7	4	0
N_{4_7}	3	1	1	N_{13_10}	6	4	0
N_{5_3}	5	4	0	N_{13_12}	6	4	0
N_{5_6}	3	2	0	N_{13_16}	7	4	0
N_{5_10}	8	4	0	N_{14_8}	9	5	0
N_{6_4}	10	6	0	N_{14_15}	9	6	0
N_{6_5}	3	1	1	N_{14_17}	6	4	0
N_{6_9}	3	2	0	N_{15_12}	7	4	0
N_{6_11}	6	3	1	N_{15_14}	9	6	0
N_{7_4}	3	1	0	N_{15_16}	5	3	0

N_{7_8}	3	2	0	N_{15_17}	5	0	5
N_{8_7}	3	2	0	N_{16_13}	7	4	0
N_{8_9}	5	3	0	N_{16_15}	5	3	0
N_{8_14}	9	5	0	N_{17_14}	6	4	0
N_{9_6}	3	2	0	N_{17_15}	5	4	0
				N_{min}	288	169	12

ตารางที่ 4.14 ผลเฉลยค่าดีสเพอร์ชันสะสมกรณีใช้หน่วยชดเชยดีสเพอร์ชันชนิดเดียว

จากการทำ MILP Optimization กรณีโครงข่าย NARNET ทำงานปกติ

	ดีสเพอร์ชันสะสม (ps/nm)			ดีสเพอร์ชันสะสม (ps/nm)	
	1520.25 nm	1577.03 nm		1520.25 nm	1577.03 nm
D_{ac2_li}	934.41	896.25	D_{ac1_2i}	934.41	896.25
D_{ac3_li}	50.49	-262.26	D_{ac3_2i}	1579.79	1377.19
D_{ac4_li}	968.97	721.41	D_{ac4_2i}	33.66	-174.84
D_{ac5_li}	979.29	66.3.13	D_{ac5_2i}	707.09	160.40
D_{ac6_li}	996.12	575.71	D_{ac6_2i}	690.26	247.82
D_{ac7_li}	384.40	-80.07	D_{ac7_2i}	-550.01	-976.32
D_{ac8li}	401.23	-167.49	D_{ac8_2i}	-533.18	-1063.74
D_{ac9_li}	1313.20	845.32	D_{ac9_2i}	1007.34	1107.34
D_{ac10_li}	123.42	-641.08	D_{ac10_2i}	-148.78	-1143.81
D_{ac11_li}	1330.03	-757.90	D_{ac11_2i}	1024.17	430.01
D_{ac12_li}	151.47	-786.78	D_{ac12_2i}	145.86	-757.64
D_{ac13_li}	1358.08	612.20	D_{ac13_2i}	780.02	-218.42
D_{ac14_li}	448.21	-434.88	D_{ac14_2i}	-482.69	-1326.00
D_{ac15_li}	490.99	-633.73	D_{ac15_2i}	168.30	-874.20
D_{ac16_li}	1397.35	408.22	D_{ac16_2i}	496.60	-662.87

D_{ac17_1i}	785.63	-247.56	D_{ac17_2i}	-148.78	-1143.81
D_{ac1_3i}	50.49	-262.26	D_{ac1_4i}	968.07	721.41
D_{ac2_3i}	1579.79	1377.19	D_{ac2_4i}	33.66	-174.84
D_{ac4_3i}	1546.13	1552.03	D_{ac3_4i}	1546.13	1552.03
D_{ac5_3i}	928.80	925.39	D_{ac5_4i}	673.43	335.24
D_{ac6_3i}	945.63	837.97	D_{ac6_4i}	656.60	422.66
D_{ac7_3i}	962.46	750.55	D_{ac7_4i}	-583.67	-801.48
D_{ac8_3i}	979.29	663.13	$D_{ac8_4_i}$	-566.84	-888.90
D_{ac9_3i}	1262.71	1107.58	D_{ac9_4i}	973.68	692.27
D_{ac10_3i}	72.93	-378.82	D_{ac10_4i}	-182.44	-968.97
D_{ac11_3i}	1279.54	1020.16	D_{ac11_4i}	990.51	604.85
D_{ac12_3i}	100.98	-524.52	D_{ac12_4i}	112.20	-582.80
D_{ac13_3i}	1307.59	874.46	D_{ac13_4i}	746.36	-43.58
D_{ac14_3i}	1029.78	400.87	D_{ac14_4i}	-516.35	-1151.16
D_{ac15_3i}	440.50	-371.47	D_{ac15_4i}	134.64	-699.36
D_{ac16_3i}	1346.86	670.48	D_{ac16_4i}	462.94	-488.03
D_{ac17_3i}	1363.69	583.06	D_{ac17_4i}	-182.44	-968.97
D_{ac1_5i}	979.29	663.13	D_{ac1_6i}	996.12	575.71
D_{ac2_5i}	707.09	160.40	D_{ac2_6i}	690.26	247.82
D_{ac3_5i}	928.80	925.39	D_{ac3_6i}	945.63	837.97
D_{ac4_5i}	673.43	335.24	D_{ac4_6i}	656.60	422.66
D_{ac6_5i}	16.83	-87.42	D_{ac5_6i}	16.83	-87.42
D_{ac7_5i}	1279.54	1020.16	D_{ac7_6i}	1262.71	1107.58
D_{ac8_5i}	1262.71	1107.58	D_{ac8_6i}	1245.88	1195.00
D_{ac9_5i}	333.91	182.19	D_{ac9_6i}	317.08	269.61
D_{ac10_5i}	-855.87	-1304.21	D_{ac10_6i}	-839.04	-1304.21

D_{ac11_5i}	350.74	94.77	D_{ac11_6i}	-333.91	182.19
D_{ac12_5i}	-827.82	-1449.91	D_{ac12_6i}	-544.40	-1005.46
D_{ac13_5i}	378.79	-50.93	D_{ac13_6i}	89.76	-466.24
D_{ac14_5i}	1313.20	845.32	D_{ac14_6i}	1296.37	923.74
D_{ac15_5i}	-488.30	-1296.86	D_{ac15_6i}	-204.88	-852.41
D_{ac16_5i}	418.06	-254.91	D_{ac16_6i}	123.42	-641.08
D_{ac17_5i}	740.75	-14.44	D_{ac17_6i}	1024.49	430.01
D_{ac1_7i}	384.40	-80.07	D_{ac1_8i}	401.23	-167.49
D_{ac2_7i}	-550.01	-976.32	D_{ac2_8i}	-533.18	-1063.74
D_{ac3_7i}	962.46	750.55	D_{ac3_8i}	979.29	663.13
D_{ac4_7i}	-583.67	-801.48	D_{ac4_8i}	-566.84	-888.90
D_{ac5_7i}	1279.54	1020.16	D_{ac5_8i}	1262.54	1107.58
D_{ac6_7i}	1262.71	1107.58	D_{ac6_8i}	1245.88	1195.00
D_{ac8_7i}	16.83	-87.42	D_{ac7_8i}	16.83	-87.42
D_{ac9_7i}	945.63	837.97	D_{ac9_8i}	928.80	925.39
D_{ac10_7i}	423.67	-284.05	D_{ac10_8i}	406.84	-196.63
D_{ac11_7i}	1596.62	1289.77	D_{ac11_8i}	1579.79	1377.19
D_{ac12_7i}	718.31	102.12	D_{ac12_8i}	701.48	189.54
D_{ac13_7i}	1352.47	641.34	D_{ac13_8i}	1335.64	728.76
D_{ac14_7i}	67.32	-349.68	D_{ac14_8i}	50.49	-262.26
D_{ac15_7i}	718.31	102.12	D_{ac15_8i}	701.48	189.54
D_{ac16_7i}	1046.61	313.45	D_{ac16_8i}	1029.78	400.87
D_{ac17_7i}	401.23	-167.49	D_{ac17_8i}	384.40	-80.07
D_{ac1_9i}	1313.20	845.32	D_{ac1_10i}	123.42	-641.08
D_{ac2_9i}	1007.34	517.43	D_{ac2_10i}	-148.78	-1143.81
D_{ac3_9i}	1262.71	1107.58	D_{ac3_10i}	72.93	-378.82

D_{ac4_9i}	973.68	692.27	D_{ac4_10i}	-182.44	-968.97
D_{ac5_9i}	333.91	182.19	D_{ac5_10i}	-855.87	-1304.21
D_{ac6_9i}	317.08	269.61	D_{ac6_10i}	-839.04	-1391.63
D_{ac7_9i}	945.63	837.97	D_{ac7_10i}	423.67	-284.05
D_{ac8_9i}	928.80	925.39	D_{ac8_10i}	406.84	-196.63
D_{ac10_9i}	-521.96	-1122.02	D_{ac9_10i}	-521.96	-1122.02
D_{ac11_9i}	650.99	451.80	D_{ac11_10i}	44.88	-233.12
D_{ac12_9i}	-227.32	-735.85	D_{ac12_10i}	28.05	-145.70
D_{ac13_9i}	406.84	-196.63	D_{ac13_10i}	1234.28	1253.28
D_{ac14_9i}	979.29	663.13	D_{ac14_10i}	1018.56	459.15
D_{ac15_9i}	112.20	-582.80	D_{ac15_10i}	367.57	7.35
D_{ac16_9i}	440.50	-371.47	D_{ac16_10i}	1273.93	1049.30
D_{ac17_9i}	1313.20	845.32	D_{ac17_10i}	1596.62	1289.77
D_{ac1_11i}	434.89	-342.33	D_{ac1_12i}	151.47	-786.78
D_{ac2_11i}	129.03	-670.22	D_{ac2_12i}	145.86	-757.64
D_{ac3_11i}	384.40	-80.07	D_{ac3_12i}	100.98	-524.52
D_{ac4_11i}	95.37	-495.38	D_{ac4_12i}	112.20	-582.80
D_{ac5_11i}	-544.40	-1005.46	D_{ac5_12i}	-827.82	-1449.91
D_{ac6_11i}	-561.23	-918.04	D_{ac6_12i}	-544.40	-1005.46
D_{ac7_11i}	701.48	189.54	D_{ac7_12i}	718.31	102.12
D_{ac8_11i}	684.65	276.96	D_{ac8_12i}	701.48	189.54
D_{ac9_11i}	-244.15	-648.43	D_{ac9_12i}	-227.32	-735.85
D_{ac10_11i}	-850.26	-1333.35	D_{ac10_12i}	28.05	-145.70
D_{ac12_11i}	-878.31	-1187.65	D_{ac11_12i}	16.83	-87.42
D_{ac13_11i}	-224.15	-648.43	D_{ac13_12i}	634.16	539.22
D_{ac14_11i}	112.20	-582.80	D_{ac14_12i}	990.51	604.85

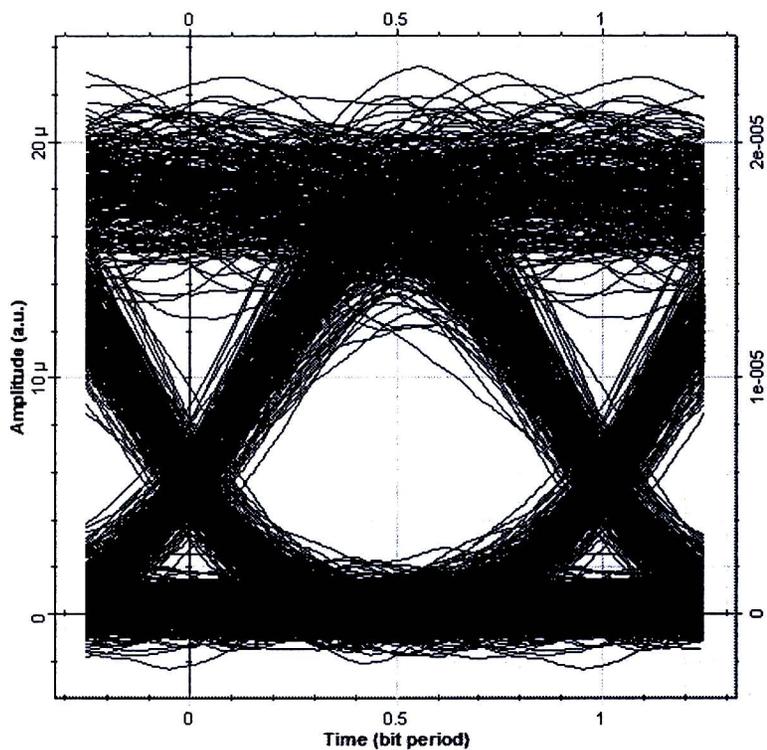
D_{ac15_11i}	-538.79	-1034.60	D_{ac15_12i}	339.52	153.05
D_{ac16_11i}	-210.49	-823.27	D_{ac16_12i}	667.82	364.38
D_{ac17_11i}	690.26	247.82	D_{ac17_12i}	1568.57	1435.47
D_{ac1_13i}	1358.08	612.20	D_{ac1_14i}	451.72	-429.75
D_{ac2_13i}	780.02	-218.42	D_{ac2_14i}	-482.69	-1326.00
D_{ac3_13i}	1307.59	874.46	D_{ac3_14i}	1029.78	400.87
D_{ac4_13i}	746.36	-43.58	D_{ac4_14i}	-516.35	-1151.16
D_{ac5_13i}	378.79	-50.93	D_{ac5_14i}	1313.20	845.32
D_{ac6_13i}	89.76	-466.24	D_{ac6_14i}	1296.37	932.74
D_{ac7_13i}	1352.47	641.34	D_{ac7_14i}	67.32	-349.68
D_{ac8_13i}	1335.64	728.76	D_{ac8_14i}	50.49	-262.26
D_{ac9_13i}	406.84	-196.63	D_{ac9_14i}	979.29	663.13
D_{ac10_13i}	1234.66	1253.28	D_{ac10_14i}	1018.56	459.16
D_{ac11_13i}	650.99	451.80	D_{ac11_14i}	1007.34	517.43
D_{ac12_13i}	634.16	539.22	D_{ac12_14i}	990.51	604.85
D_{ac14_13i}	718.31	102.12	D_{ac13_14i}	1018.56	455.16
D_{ac15_13i}	67.32	-349.68	D_{ac15_14i}	650.99	451.80
D_{ac16_13i}	-260.98	-561.01	D_{ac16_14i}	979.29	663.13
D_{ac17_13i}	1296.37	932.74	D_{ac17_14i}	333.91	182.19
D_{ac1_15i}	490.99	-633.73	D_{ac1_16i}	1397.35	408.22
D_{ac2_15i}	168.30	-874.20	D_{ac2_16i}	496.60	-662.87
D_{ac3_15i}	440.50	-371.47	D_{ac3_16i}	1346.86	670.48
D_{ac4_15i}	134.64	-699.36	D_{ac4_16i}	462.94	-488.03
D_{ac5_15i}	-488.30	-1296.86	D_{ac5_16i}	418.06	-254.91
D_{ac6_15i}	-204.88	-852.41	D_{ac6_16i}	123.42	-641.08
D_{ac7_15i}	718.31	102.12	D_{ac7_16i}	1046.61	313.45

D_{ac8_15i}	701.48	189.54	D_{ac8_16i}	1029.78	400.87
D_{ac9_15i}	112.20	-582.80	D_{ac9_16i}	440.50	-371.47
D_{ac10_15i}	367.57	7.35	D_{ac10_16i}	1273.93	1049.30
D_{ac11_15i}	356.35	65.63	D_{ac11_16i}	684.65	276.96
D_{ac12_15i}	339.52	153.05	D_{ac12_16i}	667.82	364.38
D_{ac13_15i}	367.57	7.35	D_{ac13_16i}	39.27	-203.98
D_{ac14_15i}	650.99	541.80	D_{ac14_16i}	979.29	663.13
D_{ac16_15i}	211.33	211.33	D_{ac15_16i}	328.30	211.33
D_{ac17_15i}	1229.05	1282.42	D_{ac17_16i}	1557.35	1493.75
D_{ac1_17i}	785.63	-247.56	D_{ac9_17i}	1313.20	845.32
D_{ac2_17i}	-148.78	-1143.81	D_{ac10_17i}	1596.62	1289.77
D_{ac3_17i}	1363.69	583.06	D_{ac11_17i}	1585.40	1348.05
D_{ac4_17i}	-182.44	-968.97	D_{ac12_17i}	1568.57	1435.47
D_{ac5_17i}	740.75	-14.44	D_{ac13_17i}	1596.62	1289.77
D_{ac6_17i}	1024.17	430.01	D_{ac14_17i}	333.91	182.19
D_{ac7_17i}	401.23	-167.49	D_{ac15_17i}	1229.05	1282.42
D_{ac8_17i}	384.40	-80.07	D_{ac16_17i}	1557.35	1493.75

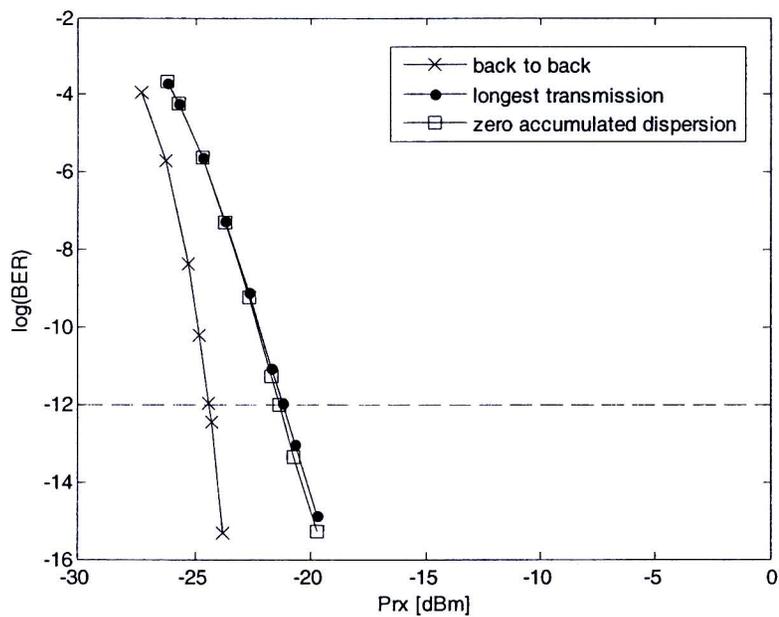
อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพที่ได้กำหนดขึ้นสามารถนำไปใช้งานได้จริงทั้งในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU เพียงชนิดเดียวและการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU ร่วมกับหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU จากผลเฉลยในตารางที่ 4.13 แสดงจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันแต่ละชนิดในแต่ละข่ายเชื่อมโยงและจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดทั่วทั้งโครงข่าย จากผลเฉลยจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนมอดูลของ SC-DCU กรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิดเดียวส่งผลให้จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมากกว่ากรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน นอกจากนี้พบว่าทุก

ค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทาง Y ไต ๆ ของโครงข่ายมีค่าอยู่ในช่วงที่ได้กำหนดเอาไว้ตามเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน

การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงในโครงข่าย เราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตำแหน่งใด ๆ บนข่ายเชื่อมโยง เนื่องจากตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันไม่ส่งผลถึงค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทาง แต่เราเลือกให้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันวางในตำแหน่งที่สัญญาณมีกำลังต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น โดยเราจะวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันขาเข้าเครื่องขยายสัญญาณ ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำลองเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดคือเส้นทางการส่งสัญญาณจากโนด 1 ไปโนด 16 เป็นระยะทาง 2180 km หลังจากวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกันแล้วด้วยโปรแกรม OptiSys 8.0 (ไม่คิดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง) โดยจะส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 1577.03 nm ได้ Eye Diagram ของสัญญาณความยาวคลื่น 1577.03 nm โดยมีอัตราบิตเท่ากับ 10 Gb/s Sequence Length เท่ากับ 1024 บิต และจำนวน Sample Per Bit เท่ากับ 512 ได้สัญญาณที่ปลายทางซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเท่ากับ 408.22 ps/nm มีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) เท่ากับ 7.000616 และ ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER) เท่ากับ 1.08722×10^{-12} แสดงดังรูปที่ 4.18 ทั้งนี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณไม่ผ่านเส้นใยแสง (Back to Back) และกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแสดงได้ดังรูปที่ 4.19 ซึ่งมีค่าระดับกำลังแสงที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้อัตราความผิดพลาดบิตคงเดิม (Power Penalty) ณ ค่า BER ที่ยอมรับได้เท่ากับ 10^{-12} [43] เท่ากับ 3.141 dB อีกทั้งยังพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมปลายทางอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแทนด้วยจุดสีดำและกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อชดเชยให้ดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าเท่ากับศูนย์แทนด้วยสีเหลี่ยมมีค่าไม่ต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.18 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด
กรณีโครงข่าย NARNET ทำงานปกติ



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ ของเส้นทางการสื่อสาร
ที่ยาวที่สุดกรณีโครงข่าย NARNET ทำงานปกติ