

บทที่ 5

ตัวอย่างการใช้อัลกอริทึมที่นำเสนอ

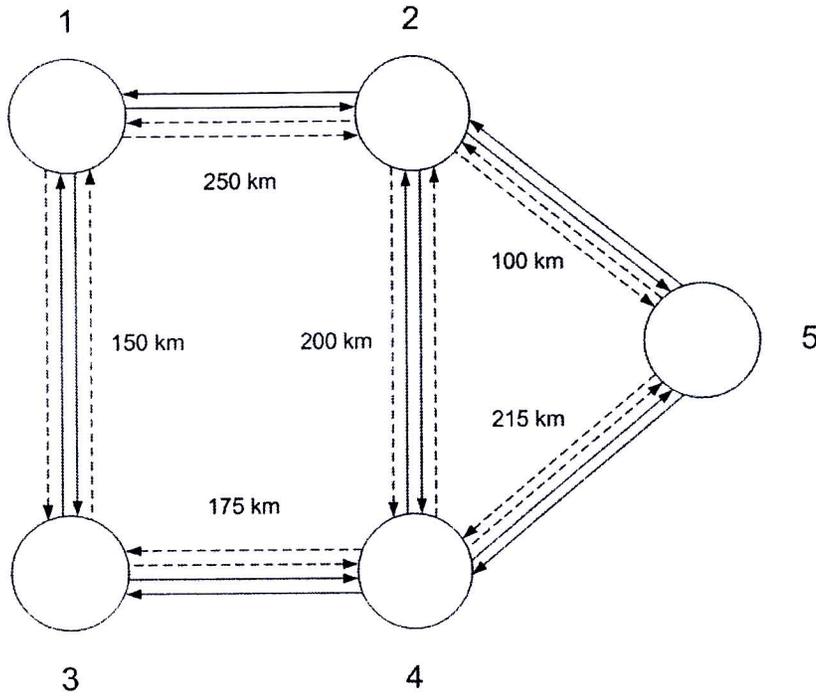
กรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย

ในบทนี้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายตามอัลกอริทึมที่ได้เสนอในบทที่ 3 ในส่วนแรกจะเป็นการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งของโครงข่ายตัวอย่าง ในส่วนที่สองเป็นการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN และส่วนสุดท้ายเป็นการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนโครงข่ายส่วนหนึ่งของ NARNET

5.1 สมมติฐานและข้อกำหนดที่จำเป็นสำหรับการจำลองโครงข่าย

- 1) การสร้างอัลกอริทึมสำหรับใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันด้วยเงื่อนไขที่ไม่มีผลจากปรากฏการณ์ความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง
- 2) กำหนดให้โครงข่ายตัวอย่าง โครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN และโครงข่ายส่วนหนึ่งของ NARNET เป็นโครงข่ายลักษณะเมชสามารถส่งผ่านข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทางบนเส้นใยแสงสำรอง
- 3) หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU มีระยะทางการชดเชยดิสเพอร์ชันที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 100 km
- 4) เมื่อเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายจะมีการจัดสรรเส้นทางส่งสัญญาณขึ้นใหม่ด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณโดยใช้เส้นใยแสงสำรองแบบ Path Protection
- 5) ความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายที่พิจารณานำมาใช้ในการจำลองโครงข่ายคือความเสียหายของเส้นใยแสงทั้ง 4 เส้นในแต่ละข่ายเชื่อมโยง (Working & Spare Fiber Failure) โดยจะทำการพิจารณาให้เกิดความเสียหายที่ละข่ายเชื่อมโยง

5.2 การจำลองการใช้หน่วยขีดเซยติสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่าง



รูปที่ 5.1 เส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองบนโครงข่ายตัวอย่าง

ในการจำลองโครงข่ายกำหนดให้โครงข่ายตัวอย่าง เป็นโครงข่ายลักษณะเมฆ ประกอบด้วย 4 ข่ายเชื่อมโยง (Link) 4 โหนด (Node) ระยะทางรวม 1090 km โดยการส่งผ่านสัญญาณนี้จะมีสองทิศทางบนเส้นใยแสงสำรองเท่านั้น คือระยะทางที่สั้นสุดสำหรับเส้นทางที่ถูกจัดสรรขึ้นใหม่ตามกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรอง อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยขีดเซยติสเพอร์ชันในโครงข่ายตัวอย่างด้วยจำนวนหน่วยขีดเซยติสเพอร์ชันน้อยสุดกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายอธิบายได้ดังนี้

5.2.1 ระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทาง

การระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโหนดต้นทางไปสู่โหนดปลายทางขึ้นใหม่จากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย เป็นการจัดสรรเส้นทางการส่งสัญญาณขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองตามกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรอง ในการระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณใหม่จะพิจารณาแยกเป็นกรณีความเสียหายของทุกข่ายเชื่อมโยงด้วยระยะทางระหว่างโหนดที่มีค่าน้อยที่สุด (Shortest-Path) โดยเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณกรณี

ที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายแสดงไว้ในบทที่ 3 ตารางที่ 3.2 - ตารางที่ 3.7

5.2.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตสำหรับเส้นทางการส่งสัญญาณในตารางที่ 3.2 - ตารางที่ 3.7 สำหรับการส่งผ่านสัญญาณกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายประกอบขึ้นด้วย สมการเงื่อนไขขอบเขตเซตค่าดีสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนดต้นทางและโนดปลายทางใด ๆ เงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชัน เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม และ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

5.2.2.1 สมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนด

สร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตเซตค่าดีสเพอร์ชันการส่งผ่านสัญญาณความยาวคลื่นเมื่อจัดสรรเส้นทางการส่งสัญญาณใหม่จากทุกโนดต้นทาง Z ไปยังทุกโนดปลายทาง Y โดยแยกเป็นกรณีตามความเสียหายที่เกิดในแต่ละข่ายเชื่อมโยงดังตารางที่ 3.2 - ตารางที่ 3.7 สร้างดังนี้

1) กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 12 และ ข่ายเชื่อมโยง 21 (A)

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ , ถูกส่งมาจากโนด 1; $Z = 1$

1 -- 3 -- 4 -- 2

$$0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{13}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) = D_{ac21iA}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ , ถูกส่งมาจากโนด 2; $Z = 2$

2 -- 4 -- 3 -- 1

$$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac12iA}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ , ถูกส่งมาจากโนด 5; $Z = 5$

5 -- 4 -- 3 -- 1

$$0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac15iA}$$

2) กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 13 และ ข่ายเชื่อมโยง 31 (B)

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ , ถูกส่งมาจากโนด 1; $Z = 1$

1 -- 2 -- 4 -- 3

$$0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac31iB}$$

1 -- 2 -- 4

$$0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) = D_{ac41iB}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 3; Z = 3

3 -- 4 -- 2 -- 1

$$0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac13iB}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 4; Z = 4

4 -- 2 -- 1

$$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac14iB}$$

3) กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 24 และ ข่ายเชื่อมโยง 42 (C)

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 2; Z = 2

2 -- 1 -- 3

$$0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{13}) = D_{ac32iC}$$

2 -- 5 -- 4

$$0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) = D_{ac42iC}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 3; Z = 3

3 -- 1 -- 2

$$0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) = D_{ac23iC}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 4; Z = 4

4 -- 5 -- 2

$$0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) = D_{ac24iC}$$

4) กรณีเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 25 และ ข่ายเชื่อมโยง 52 (D)

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 1; Z = 1

1 -- 3 -- 4 -- 5

$$0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{13}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{34}) + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) = D_{ac21iD}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 2; Z = 2

2 -- 4 -- 5

$$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{45}) = D_{ac52iD}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 5; $Z = 5$

$$5 - 4 - 3 - 1$$

$$0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) = D_{ac15iD}$$

$$5 - 4 - 2$$

$$0 + (D_i \times 215) + (D_{compi} \times N_{54}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) = D_{ac25iD}$$

5) กรณีเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 34 และ ข่ายเชื่อมโยง 43 (E)

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 1; $Z = 1$

$$1 - 2 - 4$$

$$0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) = D_{ac41iE}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 2; $Z = 2$

$$2 - 1 - 3$$

$$0 + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{13}) = D_{ac32iE}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 3; $Z = 3$

$$3 - 1 - 2$$

$$0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) = D_{ac23iE}$$

$$3 - 1 - 2 - 4$$

$$0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) = D_{ac43iE}$$

$$3 - 1 - 2 - 5$$

$$0 + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{31}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{12}) + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac53iE}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 4; $Z = 4$

$$4 - 2 - 1$$

$$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) = D_{ac14iE}$$

$$4 - 2 - 1 - 3$$

$$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{13}) = D_{ac34iE}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 5; $Z = 5$

$$5 - 2 - 1 - 3$$

$$0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) + (D_i \times 250) + (D_{compi} \times N_{21}) + (D_i \times 150) + (D_{compi} \times N_{13}) = D_{ac55iE}$$

6) กรณีเกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 45 และ ข่ายเชื่อมโยง 54 (F)

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 3; Z = 3

3 -- 4 -- 2 -- 5

$$0 + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac53iF}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 4; Z = 4

4 -- 2 -- 5

$$0 + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{42}) + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{25}) = D_{ac54iF}$$

กรณีทุกสัญญาณความยาวคลื่น λ_i ถูกส่งมาจากโหนด 5; Z = 5

5 -- 2 -- 4 -- 3

$$0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) + (D_i \times 175) + (D_{compi} \times N_{43}) = D_{ac35iF}$$

5 -- 2 -- 4

$$0 + (D_i \times 100) + (D_{compi} \times N_{52}) + (D_i \times 200) + (D_{compi} \times N_{24}) = D_{ac45iF}$$

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 ดังที่ได้ให้เหตุผลไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.2.2.1 เขียนสมการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยดิสเพอร์ชันจากโหนดต้นทาง Z ไปยังทุกข่ายเชื่อมโยง XY ด้วยกลไกการกักคืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรองด้วยวิธีเดียวกันกับการเขียนสมการเงื่อนไขขอบเขตการชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติซึ่งได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 บทที่ 4 ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU ในแต่ละความยาวคลื่นมอดูลต่างๆ จะคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 ซึ่งถูกแสดงในตารางที่ 4.3 ตารางที่ 4.11 และ ตารางที่ 4.12 ตามลำดับ

5.2.2.2 เงื่อนไขขอบเขตค่าดีสเพอร์ชัน

เงื่อนไขขอบเขตค่าดีสเพอร์ชันเป็นการกำหนดค่าดีสเพอร์ชันสะสมของทุกสัญญาณความยาวคลื่นจากโนดต้นทาง Z ทุกโนดปลายทาง Y ชุดรูปแบบอสมการเงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชันแสดงไว้ในตารางที่ 5.1 ดังนี้

ตารางที่ 5.1 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดีสเพอร์ชันในการส่งผ่านสัญญาณด้วย

กลไกการกักคั้นสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรองในโครงข่ายตัวอย่าง

รูปแบบการส่งสัญญาณ $\lambda_i = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_7\}$		กรณี	รูปแบบสมการ
โนดต้นทาง	โนดปลายทาง		
1	2	A	$-1600 \leq D_{ac21iA} \leq 1600$
1	3	B	$-1600 \leq D_{ac31iB} \leq 1600$
1	4	B	$-1600 \leq D_{ac41iB} \leq 1600$
1	5	D	$-1600 \leq D_{ac51iD} \leq 1600$
1	4	E	$-1600 \leq D_{ac41iE} \leq 1600$
2	1	A	$-1600 \leq D_{ac12iA} \leq 1600$
2	3	C	$-1600 \leq D_{ac32iC} \leq 1600$
2	4	C	$-1600 \leq D_{ac42iC} \leq 1600$
2	5	D	$-1600 \leq D_{ac52iD} \leq 1600$
2	3	E	$-1600 \leq D_{ac32iE} \leq 1600$
3	1	B	$-1600 \leq D_{ac13iB} \leq 1600$
3	2	C	$-1600 \leq D_{ac23iC} \leq 1600$
3	2	E	$-1600 \leq D_{ac23iE} \leq 1600$
3	4	E	$-1600 \leq D_{ac43iE} \leq 1600$
3	5	E	$-1600 \leq D_{ac53iE} \leq 1600$

3	5	F	$-1600 \leq D_{ac53iF} \leq 1600$
4	1	B	$-1600 \leq D_{ac14iB} \leq 1600$
4	2	C	$-1600 \leq D_{ac24iC} \leq 1600$
4	1	E	$-1600 \leq D_{ac14iE} \leq 1600$
4	3	E	$-1600 \leq D_{ac34iE} \leq 1600$
4	2	F	$-1600 \leq D_{ac24iF} \leq 1600$
5	1	A	$-1600 \leq D_{ac15iA} \leq 1600$
5	1	D	$-1600 \leq D_{ac15iD} \leq 1600$
5	2	D	$-1600 \leq D_{ac25iD} \leq 1600$
5	3	E	$-1600 \leq D_{ac35iE} \leq 1600$
5	3	F	$-1600 \leq D_{ac35iF} \leq 1600$
5	4	F	$-1600 \leq D_{ac45iF} \leq 1600$

5.2.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม

เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็มสำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยง XY คือ จำนวนหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันที่วางลงบนเส้นใยแสงสำรวจในแต่ละข่ายเชื่อมโยงต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์

5.2.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการทดลองเป็นการกำหนดจำนวนหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันที่น้อยสุดในโครงข่าย ในขณะที่เดียวกันจำนวนหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันน้อยสุดนี้ยังคงรักษาไว้ซึ่งประสิทธิภาพการส่งสัญญาณภายในโครงข่ายได้ ในกรณีการใช้หน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันเพียงชนิดเดียว ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการทดลองเป็นการกำหนดผลรวมจำนวนหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันที่น้อยสุดเพียงชนิดเดียวเท่านั้น แต่ในกรณีการใช้หน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของการทดลองเป็นการกำหนดผลรวมจำนวนหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันที่น้อยสุดของสองชนิด

5.2.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

สำหรับการทำ Optimization ปัญหาแบบ MILP เราเลือกใช้โปรแกรม X-press.MP ในการแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต ผลเฉลยที่ได้จากการจำลองโครงข่ายโดยการส่งผ่านสัญญาณ 2 ความยาวคลื่นขอบในโครงข่ายตัวอย่างบนเส้นใยแสงสำรองด้วยกลไกการกักคั้นสัญญาณแบบ Path Protection ในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพียงชนิดเดียว เราเลือกหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันโดยพิจารณาจากมอดูลที่ยาวที่สุดมอดูล DCM -60 - SMF - C ก่อน ถ้าไม่สามารถหาคำตอบได้จึงปรับเปลี่ยนเป็นมอดูลที่มีความยาวลดหลั่นลงมาตามลำดับ ผลเฉลยที่ได้คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU มอดูล DCM - 50 - SMF - C และในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน เราใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C เป็นหลักในการชดเชยดิสเพอร์ชัน จากนั้นเราเลือกหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU โดยพิจารณาจาก NS-DCU ที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 100 km ก่อน ถ้าไม่สามารถหาคำตอบได้จึงปรับเปลี่ยนเป็นมอดูลที่มาจากความยาวลดหลั่นลงมาตามลำดับ ผลเฉลยที่ได้คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C และหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU ที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 100 km บนเส้นใยแสงสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายและค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ทุกโหนดปลายทาง Y ของทุกรูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงในโครงข่ายแสดงไว้ในตารางที่ 5.2 จากผลเฉลยจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนมอดูลของ SC-DCU กรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิดเดียวส่งผลให้จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมากกว่ากรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน

ตารางที่ 5.2 ผลเฉลยจำนวน NS-DCU และ SC-DCU โครงข่ายตัวอย่าง

ด้วยกลไกการกักคั้นสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรอง

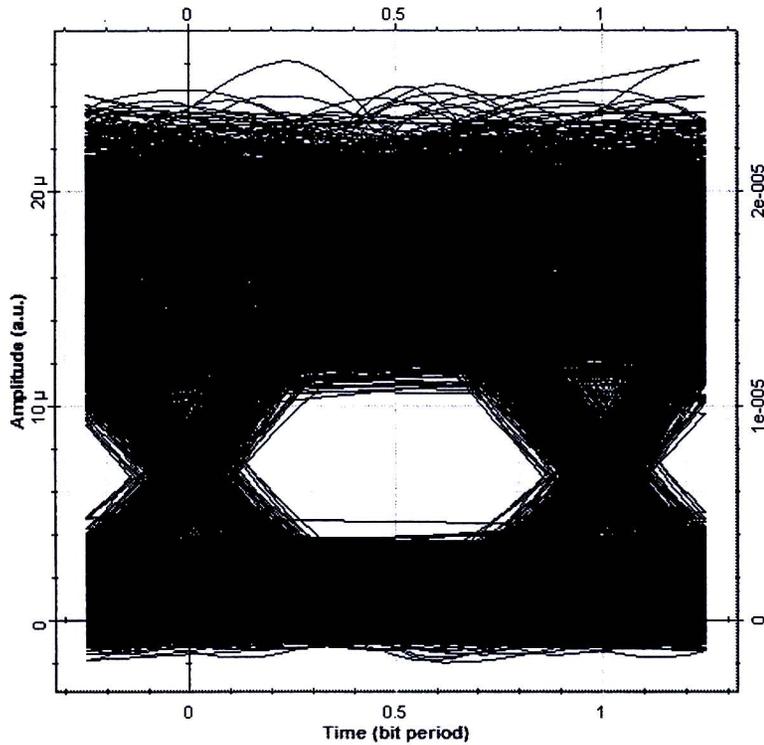
หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน	SC-DCU	Combination	
		SC-DCU	NS-DCU
N_{12}	3	2	0
N_{13}	2	2	0
N_{21}	2	2	0
N_{24}	2	1	1
N_{25}	1	1	0
N_{31}	1	2	0

N_{34}	2	1	1
N_{42}	3	2	0
N_{43}	3	2	0
N_{45}	2	2	0
N_{52}	1	1	0
N_{54}	2	2	0
N_{\min}	24	20	2

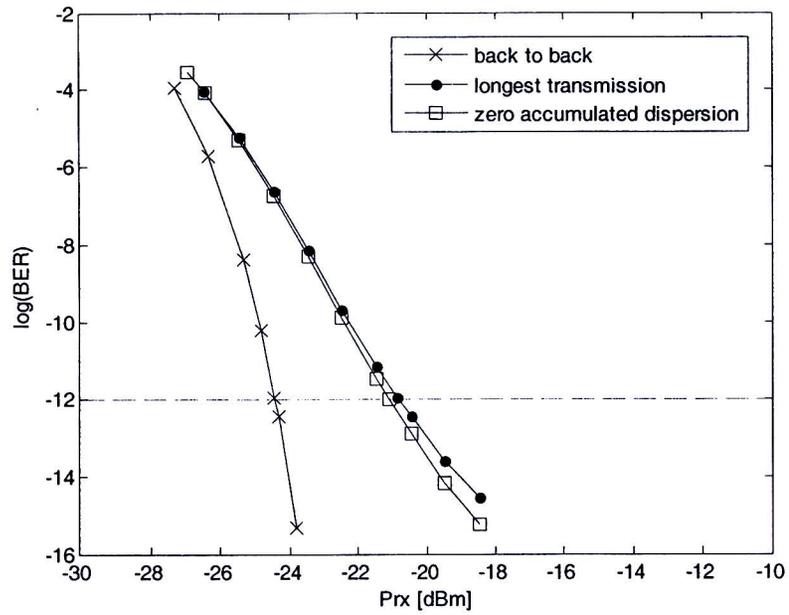
5.2.4 การวางตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

ในการทดลองเมื่อสัญญาณส่งผ่านไปในโครงข่ายตัวอย่างบนเส้นใยแสงสำรองชนิด SMF การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงในโครงข่ายเราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตำแหน่งใดๆ บนข่ายเชื่อมโยงสำรอง เนื่องจากตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันไม่ส่งผลถึงค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทาง แต่เราเลือกให้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันวางในตำแหน่งที่สัญญาณมีกำลังต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น โดยเราจะวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันขาเข้าเครื่องขยายสัญญาณ ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำลองเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดคือเส้นทางการส่งสัญญาณจากโนด 1 ไปโนด 3 กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 13 และ ข่ายเชื่อมโยง 31 เป็นระยะทาง 625 km หลังจากวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน กรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกันแล้วด้วยโปรแกรม OptiSys 8.0 (ไม่คิดผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของเส้นใยแสง) โดยจะส่งสัญญาณที่ความยาวคลื่น 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 ได้สัญญาณที่ปลายทางซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเท่ากับ 486.838 ps/nm มีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) เท่ากับ 6.9999 และ ค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER) เท่ากับ 1.08982×10^{-12} แสดงดังแสดงรูปที่ 5.2 ทั้งนี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณไม่ผ่านเส้นใยแสง (Back to Back) และกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแสดงได้ดังรูปที่ 5.3 ซึ่งมีค่าระดับกำลังแสงที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้อัตราความผิดพลาดบิตคงเดิม (Power Penalty) ณ ค่า BER ที่ยอมรับได้ เท่ากับ 10^{-12} [43] เท่ากับ 3.572 dB อีกทั้งยังพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าและ

$\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมปลายทางอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแทนด้วยจุดสีดำและกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อชดเชยให้ดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าเท่ากับศูนย์แทนด้วยสีเหลี่ยมมีค่าไม่ต่างกันมากนัก

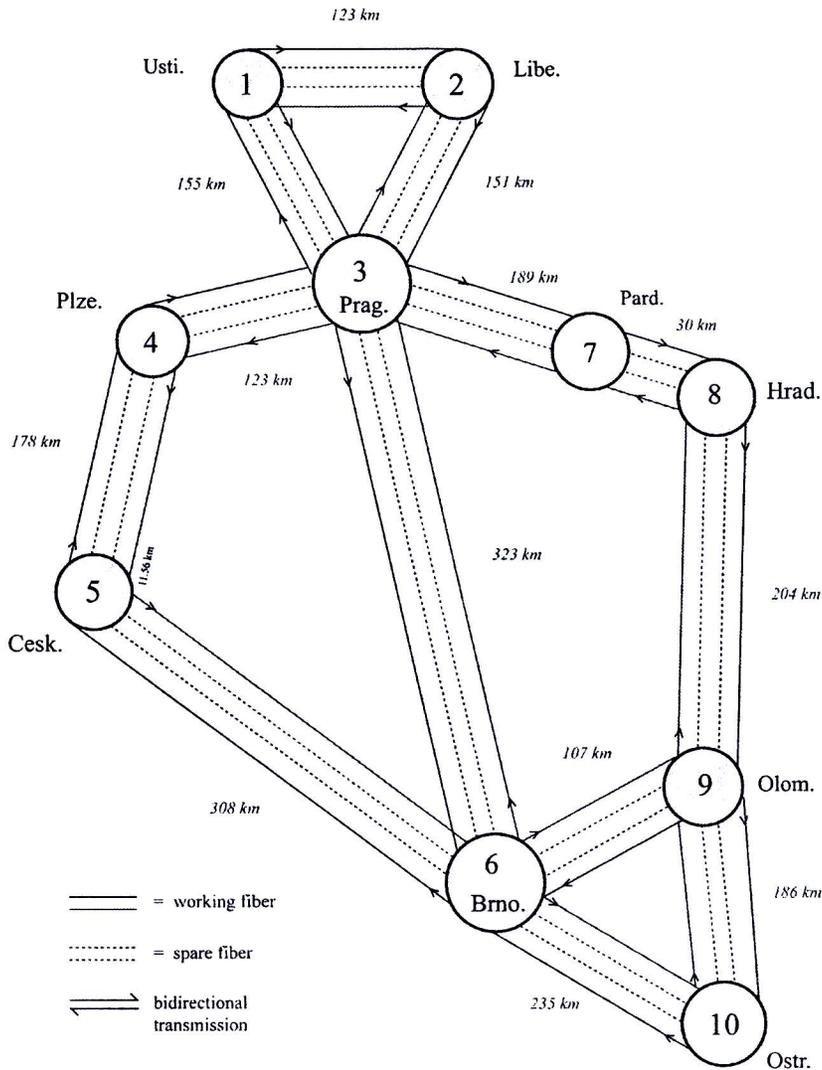


รูปที่ 5.2 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด กรณีโครงข่ายตัวอย่างเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย



รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ log (BER) ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดกรณีโครงข่ายตัวอย่างเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย

5.3 การจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนโครงข่าย OPEN



รูปที่ 5.4 เส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองบนโครงข่าย OPEN

โครงข่ายที่นำมาใช้ในการจำลองการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน คือ โครงข่ายส่วนหนึ่งของ Optical Pan European Network (OPEN) ประกอบด้วย 13 ข่ายเชื่อมโยง 10 โหนด ส่งข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทางผ่านไปในเส้นใยแสงทำงานมีระยะทางทั้งหมด 1882 km เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่หลังเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายจะเลือกใช้เส้นทางที่มีระยะทางสั้นสุดตามกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรอง

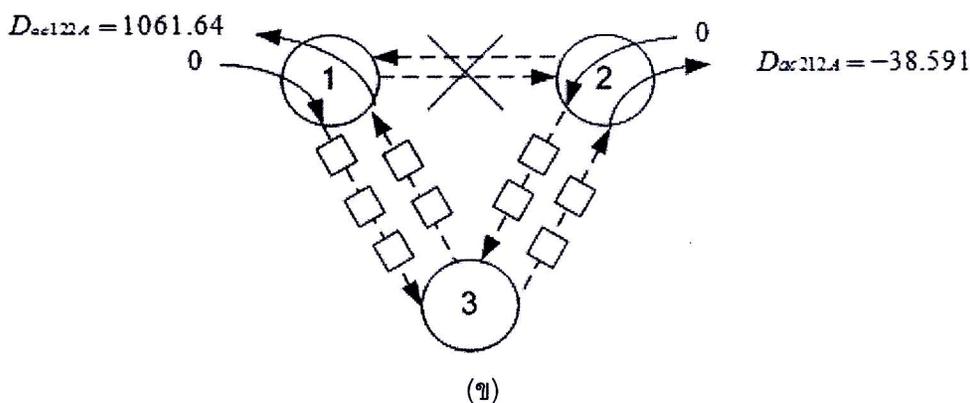
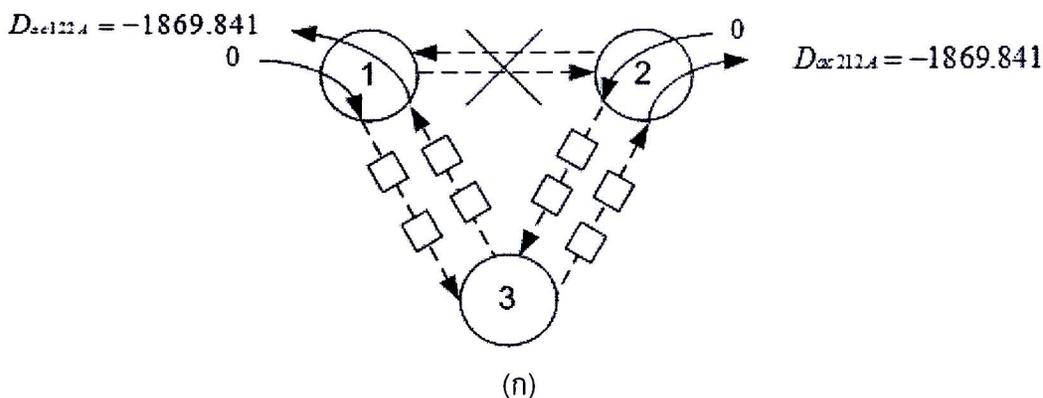
การหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันและการกำหนดตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงกรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายจะ

ดำเนินการตามอัลกอริทึมที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.2 กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายตัวอย่าง การจำลองโครงข่ายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำหรับเราเลือกใช้สัญญาณ 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 ดังที่ได้ให้เหตุผลไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.2.2.1 ส่งผ่านไปในส่วนหนึ่งของโครงข่าย OPEN การกำหนดความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU ในแต่ละความยาวคลื่นจะคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU ในแต่ละความยาวคลื่นมอดูลต่างจะคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 และถูกแสดงในตารางที่ 4.3 ตารางที่ 4.11 และ ตารางที่ 4.12 ตามลำดับ จากนั้นแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขตตามอัลกอริทึมที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.2 เพื่อหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดบนเส้นใยแสงสำหรับในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN

ในกรณีเมื่อใช้ SC-DCU ที่มีมอดูล DCM - 60 - SMF - C เราไม่สามารถหาคำตอบได้เนื่องจากปัญหาและข้อจำกัดที่เราพิจารณาอยู่เป็นปัญหาที่เป็นไปไม่ได้ (Infeasible Problem) หรืออาจกล่าวได้ว่า เราไม่สามารถใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C ชดเชยดิสเพอร์ชันได้พร้อมกันทุกเส้นทางทุกกรณีที่ข่ายเชื่อมโยงเกิดความเสียหายภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ ตัวอย่างเช่น ดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณจากโนด 1 ไปโนด 2 ความยาวคลื่น 1577.03 nm กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 12 และ ข่ายเชื่อมโยง 21 (D_{ac212A}) และ ดิสเพอร์ชันสะสมของสัญญาณจากโนด 2 ไปโนด 1 ความยาวคลื่น 1577.03 nm กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 12 และ ข่ายเชื่อมโยง 21 (D_{ac122A}) ไม่สามารถถูกชดเชยให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดโดยที่ดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทางทุกเส้นทางทุกกรณีที่เหลือสามารถชดเชยให้อยู่ในขอบเขตที่กำหนดได้ ในทางกลับกันเมื่อเราพยายามทำให้ D_{ac212A} และ D_{ac122A} มีค่าอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ ส่งผลให้ดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทางของเส้นทางอื่นเกินขอบเขต ดังนั้นเราจึงต้องปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์บางตัวเพื่อให้สามารถหาผลเฉลยกรณีโครงข่าย OPEN เกิดความเสียหาย

กับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งได้ ซึ่งพารามิเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนได้คือ D_{compi} ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.4

เมื่อเราปรับเปลี่ยนค่า D_{compi} ของ SC-DCU แล้ว ส่งผลให้เราสามารถใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C ขดเซยดิสเพอร์ชันบนโครงข่าย OPEN กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งเมื่อส่งสัญญาณที่มีความยาวคลื่น 1520.25 nm ถึง 1577.03 nm ได้ เนื่องจากเส้นทางส่งสัญญาณบน OPEN กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งมีจำนวนมากกว่ากรณีโครงข่ายทำงานปกติทั้งเส้นทางระยะทางสั้นและเส้นทางยาว ดังนั้นเมื่อเราต้องการวางหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันบนโครงข่ายเพื่อให้สามารถขดเซยดิสเพอร์ชันในทุกเส้นทางของการส่งสัญญาณ 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 จำนวนน้อย รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบค่า D_{ac212A} และ D_{ac122A} ระหว่างกรณีใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C และ กรณีใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C ตามลำดับ ซึ่งจำนวน SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C ที่วางลงบนข่ายเชื่อมโยงเป็นผลเฉลยเมื่อค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทางทุกเส้นทางทุกกรณีมีค่าอยู่ในขอบเขตยกเว้น D_{ac212A} และ D_{ac122A} ส่วนจำนวน SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C ที่วางลงบนข่ายเชื่อมโยงเป็นผลเฉลยเมื่อค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทางทุกเส้นทางทุกกรณีมีค่าอยู่ในขอบเขต จะเห็นได้ว่าค่า D_{ac212A} และ D_{ac122A} กรณีใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C อยู่ในขอบเขตที่กำหนด



รูปที่ 5.5 เปรียบเทียบค่า D_{ac212A} และ D_{ac122A}

(ก)กรณีใช้ SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C และ(ข) มอดูล DCM - 40 - SMF - C

ผลเฉลยในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพียงชนิดเดียว คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C และในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C และหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU ที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 70 km บนเส้นใยแสงสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายแสดงไว้ในตารางที่ 5.3 จากผลเฉลยจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนมอดูลของ SC-DCU กรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิดเดียวส่งผลให้จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมากกว่ากรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน

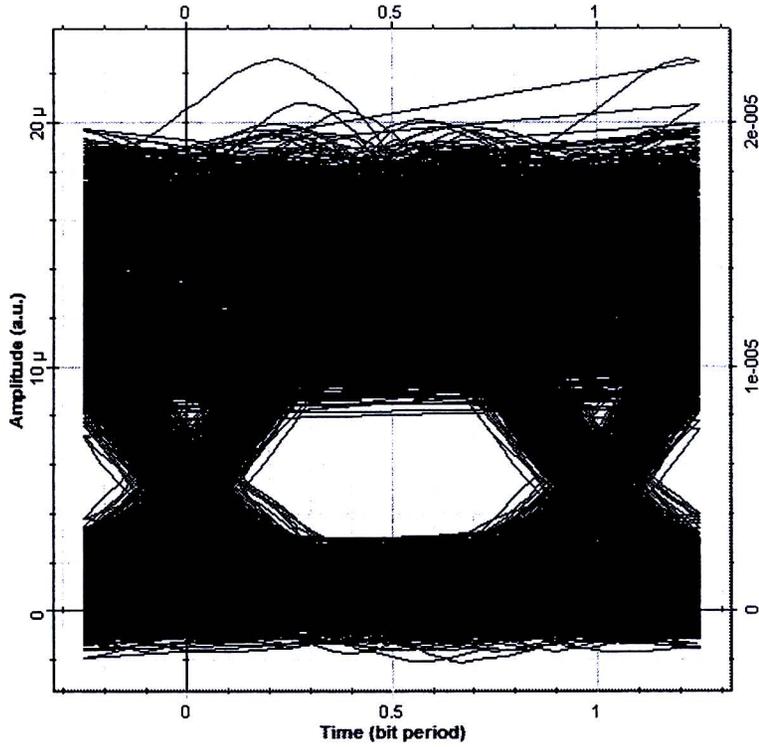
ตารางที่ 5.3 ผลเฉลยจำนวน NS-DCU และ SC-DCU โครงข่าย OPEN

ด้วยกลไกการกักสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรอง

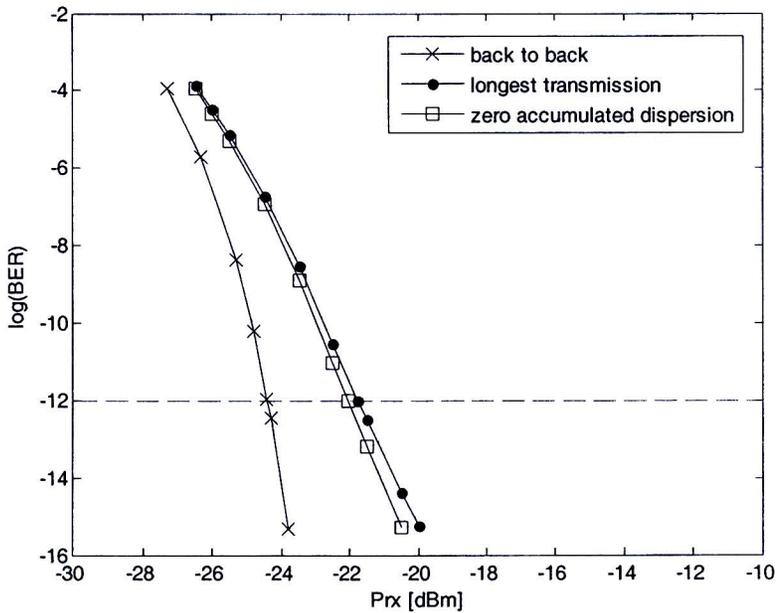
หน่วยขดเซย ดิสเพอร์ชัน	SC- DCU	Combination		หน่วยขดเซย ดิสเพอร์ชัน	SC- DCU	Combination	
		SC- DCU	NS- DCU			SC- DCU	NS- DCU
N_{12}	2	1	0	N_{65}	5	3	0
N_{13}	3	1	0	N_{69}	2	1	0
N_{21}	2	1	0	N_{610}	4	2	1
N_{23}	2	1	0	N_{73}	3	1	1
N_{31}	2	2	0	N_{78}	0	0	0
N_{32}	2	1	1	N_{87}	1	1	0
N_{34}	1	1	1	N_{89}	3	2	0
N_{36}	5	3	0	N_{96}	2	1	0
N_{37}	3	0	2	N_{98}	3	2	0
N_{43}	2	1	0	N_{910}	3	2	0
N_{45}	3	1	1	N_{106}	3	2	0
N_{54}	3	2	0	N_{109}	3	1	0
N_{56}	4	3	0	N_{\min}	72	39	7
N_{63}	6	3	1			46	

ในการทดลองเมื่อสัญญาณส่งผ่านไปโครงข่ายตัวอย่างบนเส้นใยแสงสำรองชนิด SMF การกำหนดตำแหน่งหน่วยขดเซยค่าดิสเพอร์ชันลงในโครงข่าย เราสามารถวางหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันตำแหน่งใดๆ บนข่ายเชื่อมโยงสำรอง เนื่องจากตำแหน่งของหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันไม่ส่งผลถึงค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทาง แต่เราเลือกให้หน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันวางในตำแหน่งที่สัญญาณมีกำลังต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น โดยเราจะวางหน่วยขดเซยค่าดิสเพอร์ชันเข้าเครื่องขยายสัญญาณ ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำลองเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดคือเส้นทางการส่งสัญญาณจากจากโหนด 2 ไปโหนด 4 กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่าย

เชื่อมโยง 34 และ ข่ายเชื่อมโยง 43 เป็นระยะทาง 960 km หลังจากวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน แล้วกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกันด้วยโปรแกรม 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 ได้สัญญาณที่ปลายทางซึ่งมีค่าดิสเพอร์ชันสะสมเท่ากับ 641.55 ps/nm มีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) เท่ากับ 7.02038 และค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER) เท่ากับ 1.00279×10^{-12} แสดงดังรูปที่ 5.6 ทั้งนี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณไม่ผ่านเส้นใยแสง (Back to Back) และกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแสดงได้ดังรูปที่ 5.7 ซึ่งมีค่าระดับกำลังแสงที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้อัตราความผิดพลาดบิตคงเดิม (Power Penalty) ณ ค่า BER ที่ยอมรับได้เท่ากับ 10^{-12} [43] เท่ากับ 2.928 dB อีกทั้งยังพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมปลายทางอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแทนด้วยจุดสีดำและกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อชดเชยให้ดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าเท่ากับศูนย์แทนด้วยสี่เหลี่ยมมีค่าไม่ต่างกันมากนัก

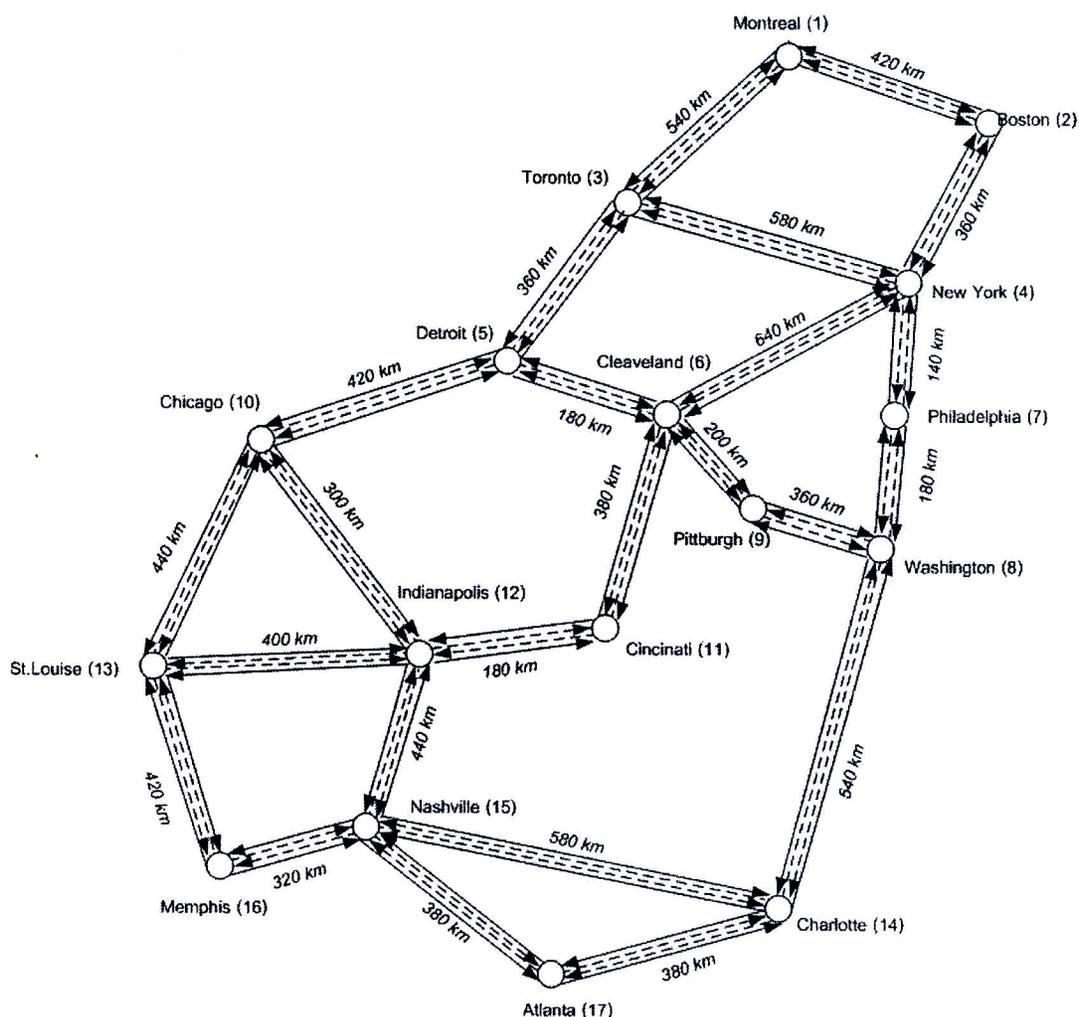


รูปที่ 5.6 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุด กรณีโครงข่าย OPEN เกิดความเสียหายกับสายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย



รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดกรณีโครงข่าย OPEN เกิดความเสียหายกับสายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย

5.4 การจำลองการใช้หน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันบนโครงข่าย NARNET



รูปที่ 5.8 เส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองบนโครงข่าย NARNET

โครงข่ายที่นำมาใช้ในการจำลองการใช้หน่วยขดเซยดิสเพอร์ชัน คือ โครงข่ายส่วยหนึ่งของ North-American Reference Network (NARNET) ประกอบด้วย 24 ข่ายเชื่อมโยง 17 โหนด ส่งข้อมูลถึงกันได้ทั้งสองทิศทางผ่านไปในเส้นใยแสงสำรองมีระยะทางทั้งหมด 1882 km เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่หลังเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายจะเลือกใช้เส้นทางที่มีระยะทางสั้นสุดตามกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรอง

การหาผลเฉลยจำนวนหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันและการกำหนดตำแหน่งของหน่วยขดเซยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงกรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่าย จะ

ดำเนินการตามอัลกอริทึมที่เสนอไว้ในหัวข้อที่ 5.2 กรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายตัวอย่าง การจำลองโครงข่ายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงเราเลือกใช้สัญญาณ 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 ดังที่ได้ให้เหตุผลไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.2.2.1

ส่งผ่านไปในส่วนหนึ่งของโครงข่าย OPEN การกำหนดความยาวคลื่นและค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU ในแต่ละความยาวคลื่นจะคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1

ค่าดิสเพอร์ชันของเส้นใยแสงชนิด SMF และค่าการชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU และ SC-DCU ในแต่ละความยาวคลื่นมอดูลต่างจะคำนวณตามรายละเอียดที่อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 และถูกแสดงในตารางที่ 4.3 ตารางที่ 4.11 และ ตารางที่ 4.12 ตามลำดับ จากนั้นแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขตตามอัลกอริทึมที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 5.2 เพื่อหาผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่น้อยที่สุดบนเส้นใยแสงสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายส่วนหนึ่งของ OPEN ผลเฉลยในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันเพียงชนิดเดียว คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU มอดูล DCM - 40 - SMF - C และในกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด SC-DCU มอดูล DCM - 60 - SMF - C และหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิด NS-DCU ที่ชดเชยได้พอดีเมื่อเปรียบเทียบกับเส้นใยแสงชนิด SMF ITU-T G.652 ที่ระยะทาง 80 km บนเส้นใยแสงสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่ายแสดงไว้ในตารางที่ 5.4 จากผลเฉลยจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนมอดูลของ SC-DCU กรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันชนิดเดียวส่งผลให้จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมากกว่ากรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกัน

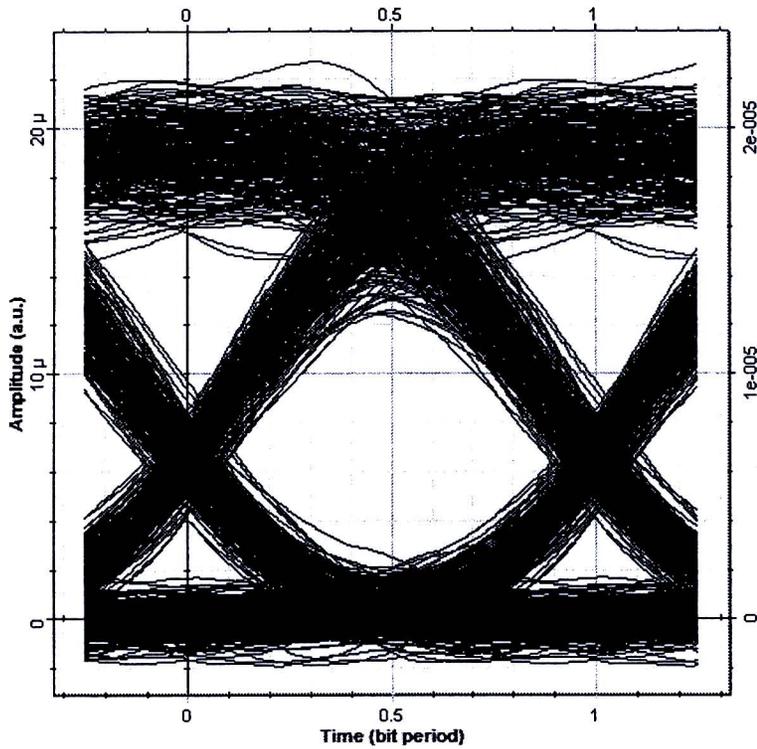
ตารางที่ 5.4 ผลเฉลยจำนวน NS-DCU และ SC-DCU โครงข่าย NARNET

ด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรอง

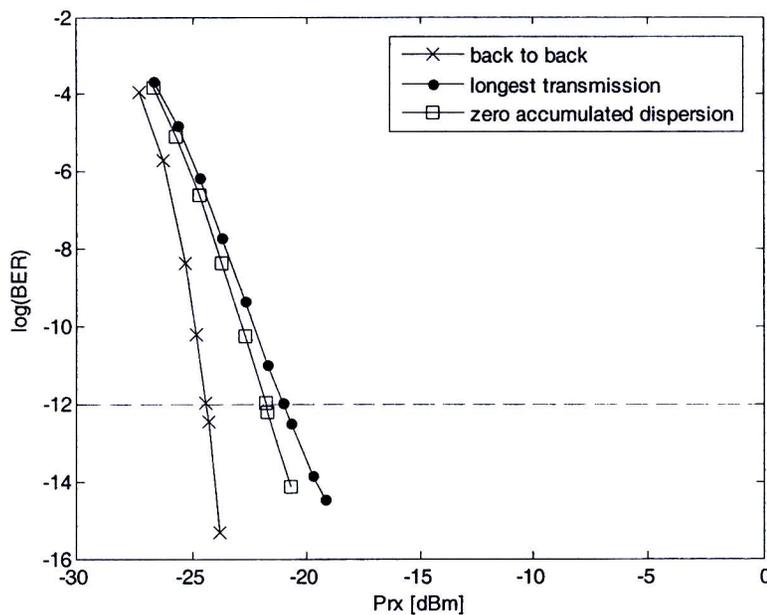
หน่วยขดเชย ดิสเพอร์ชัน	SC- DCU	Combination		หน่วยขดเชย ดิสเพอร์ชัน	SC- DCU	Combination	
		SC- DCU	NS- DCU			SC- DCU	NS- DCU
N_{1_2}	7	4	0	N_{9_8}	6	4	0
N_{1_3}	9	5	0	N_{10_5}	7	3	1
N_{2_1}	7	4	1	$N_{10_{12}}$	5	3	0
N_{2_4}	6	3	1	$N_{10_{13}}$	7	4	1
N_{3_1}	9	5	0	N_{11_6}	6	4	0
N_{3_4}	9	6	0	$N_{11_{12}}$	3	2	0
N_{3_5}	6	2	2	$N_{12_{10}}$	5	3	0
N_{4_2}	6	3	0	$N_{12_{11}}$	3	1	1
N_{4_3}	9	5	1	$N_{12_{13}}$	6	4	0
N_{4_6}	11	5	1	$N_{12_{15}}$	7	4	0
N_{4_7}	2	1	0	$N_{13_{10}}$	7	4	1
N_{5_3}	6	3	1	$N_{13_{12}}$	6	4	0
N_{5_6}	3	2	0	$N_{13_{16}}$	7	4	0
$N_{5_{10}}$	7	4	0	N_{14_8}	9	5	1
N_{6_4}	11	6	1	$N_{14_{15}}$	10	6	0
N_{6_5}	3	2	0	$N_{14_{17}}$	6	3	1
N_{6_9}	3	2	0	$N_{15_{12}}$	7	4	0
$N_{6_{11}}$	6	3	1	$N_{15_{14}}$	10	5	1
N_{7_4}	2	2	0	$N_{15_{16}}$	5	3	0
N_{7_8}	3	2	0	$N_{15_{17}}$	6	4	0
N_{8_7}	3	1	0	$N_{16_{13}}$	7	3	1

N_{8_9}	6	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}	6	4	0
				N_{min}	298	168	17

ในการทดลองเมื่อสัญญาณส่งผ่านไปในโครงข่ายตัวอย่างบนเส้นใยแสงสำรองชนิด SMF การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงในโครงข่าย เราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตำแหน่งใดๆ บนข่ายเชื่อมโยงสำรอง เนื่องจากตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันไม่ส่งผลถึงค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทาง แต่เราเลือกให้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันวางในตำแหน่งที่สัญญาณมีกำลังต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น โดยเราจะวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันขาเข้าเครื่องขยายสัญญาณ ขั้นตอนต่อไปเป็นการจำลองเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดคือเส้นทางการส่งสัญญาณจากโนด 2 ไปโนด 17 กรณีที่เกิดความเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 24 และ ข่ายเชื่อมโยง 42 เป็นระยะทาง 2780 km หลังจากวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันแล้วกรณีใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันสองชนิดร่วมกันด้วยโปรแกรม 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 -441.19 ps/nm มีค่าตัวประกอบคุณภาพ (Q) เท่ากับ 7.00926 และค่าอัตราความผิดพลาดบิต (BER) เท่ากับ 1.03538×10^{-12} แสดงดังรูปที่ 5.9 ทั้งนี้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังแสงขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณไม่ผ่านเส้นใยแสง (Back to Back) และกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงแสดงดังรูปที่ 5.10 ซึ่งมีค่าระดับกำลังแสงที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้อัตราความผิดพลาดบิตคงเดิม (Power Penalty) ณ ค่า BER ที่ยอมรับได้เท่ากับ 10^{-12} [43] เท่ากับ 3.361 dB อีกทั้งยังพบว่ากราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ กรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมปลายทางอยู่ในขอบเขตที่กำหนดแทนด้วยจุดสีดำและกรณีรับส่งสัญญาณผ่านเส้นใยแสงเมื่อชดเชยให้ดิสเพอร์ชันสะสมมีค่าเท่ากับศูนย์แทนด้วยสีเหลี่ยมมีค่าไม่ต่างกันมากนัก



รูปที่ 5.9 Eye Pattern จากการจำลองผลบน Optisys ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดกรณีโครงข่าย NARNET เกิดความเสียหายกับสายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย



รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังขาเข้าและ $\log(\text{BER})$ ของเส้นทางการสื่อสารที่ยาวที่สุดกรณีโครงข่าย NARNET เกิดความเสียหายกับสายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย