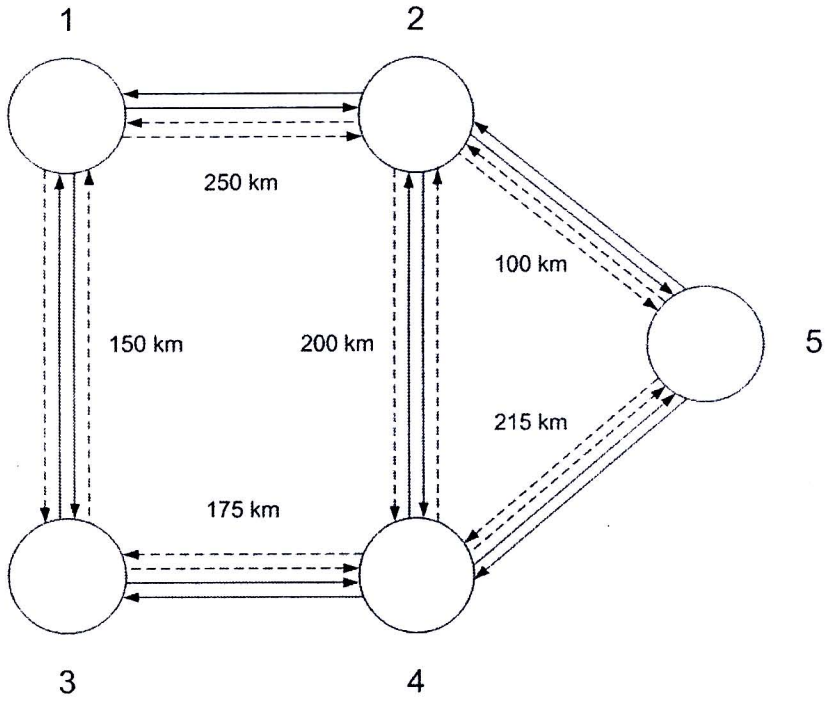
# บทที่ 3

# อัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน

โครงข่ายที่มีการมัลติเพลกซ์แบบเชิงความยาวคลื่นรวมทั้งการออกแบบโครงข่ายด้วยเทคโนโลยีดัลเบิลยูดีเอ็มนำไปสู่แนวคิดของโครงข่ายแบบ Transparency คือไม่มีการเปลี่ยนรูปของพลังงานระหว่างสัญญาณในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์และรูปแบบแสง การส่งข้อมูลด้วยความถี่ที่สูงขึ้นโดยจึงไม่ได้รับผลของปัญหาคอขวด ซึ่งคือขีดจำกัดทางอิเล็กทรอนิกส์ความถี่ 40 GHz ทำให้สามารถขยายขนาดโครงข่ายให้เกิดการใช้งานแบนด์วิดท์สูงสุด อย่างไรก็ตามเมื่อสัญญาณเดินทางไปในเส้นใยแสงระยะทางหนึ่งจะเกิดผลจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน จึงจำเป็นอย่างมากที่ต้องมีการสร้างอัลกอริทึมเพื่อลดผลกระทบจากปรากฏการณ์ดิสเพอร์ชัน วิทยานิพนธ์นี้จึงนำเสนออัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันอย่างมีประสิทธิภาพลงในโครงข่าย Wavelength-Routed ลักษณะเมชทั้งกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติและกรณีที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายซึ่งมีขั้นตอนวิธี 4 ขั้นตอนดังนี้

## 3.1 ระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโนดต้นทางไปสู่โนดปลายทาง

การระบุเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณจากโนดต้นทางไปสู่โนดปลายทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดในกรณีที่โครงข่ายทำงานปกติจะพิจารณาระยะทางระหว่างโนดที่มีค่าน้อยที่สุด (Shortest-Path) ส่วนการจัดสรรเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณภายในโครงข่ายขึ้นใหม่ในกรณีที่มีความเสียหายเกิดขึ้นกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายจะใช้กลไกการกู้คืนสัญญาณตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 2.6.3 และ 2.6.4 บทที่ 2 คือ กลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection บนเส้นใยแสงสำรองดังนี้




รูปที่ 3.1 โครงข่ายตัวอย่างใช้ในการอธิบายเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณ

กรณีโครงข่ายทำงานปกติและในกรณีเกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่าย

กำหนดให้โครงข่ายตัวอย่างในรูปที่ 3.1 เป็นโครงข่ายลักษณะเมช ในแต่ละข่ายเชื่อมโยงประกอบด้วยเส้นใยแสง 4 เส้นคือเส้นใยแสงทำงานและเส้นใยแสงสำรองอย่างละสองเส้นที่สามารถส่งผ่านสัญญาณได้ทั้งสองทิศทาง การจัดสรรเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณกรณีโครงข่ายทำงานปกติและการจัดสรรเส้นทางขึ้นใหม่ในกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งภายในโครงข่ายถูกพิจารณาทุกกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 - ตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.1 เส้นทางการส่งผ่านสัญญาณบนเส้นใยแสงทำงานกรณีโครงข่ายตัวอย่างทำงานปกติ

| สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 2 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 5 |
|---|---|---|---|---|
| 1 – 2 | 2 – 1 | 3 – 1 | 4 – 3 – 1 | 5 – 2 – 1 |
| 1 – 3 | 2 – 4 – 3 | 3 – 4 – 2 | 4 – 2 | 5 – 2 |
| 1 – 3 – 4 | 2 – 4 | 3 – 4 | 4 – 3 | 5 – 4 – 3 |
| 1 – 2 – 5 | 2 – 5 | 3 – 4 – 5 | 4 – 5 | 5 – 4 |

ตารางที่ 3.2 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืน สัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความข่ายเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 12 และ 21

| สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 2 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 5 |
|---|---|---|---|---|
| 1 - - 3 - - 4 - - 2 | 2 - - 4 - - 3 - - 1 | - | - | 5 - - 4 - - 3 - - 1 |
| - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - |

ตารางที่ 3.3 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืน สัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความข่ายเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 13 และ 31

| สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 2 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 5 |
|---|---|---|---|---|
| - | - | 3 - - 4 - - 2 - - 1 | 4 - - 2 - - 1 | - |
| 1 - - 2 - - 4 - - 3 | - | - | - | - |
| 1 - - 2 - - 4 | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - |

ตารางที่ 3.4 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืน สัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความข่ายเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 24 และ 42

| สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 2 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 5 |
|---|---|---|---|---|
| - | - | - | - | - |
| - | 2 - - 1 - - 3 | 3 - - 1 - - 2 | 4 - - 5 - - 2 | - |
| - | 2 - - 5 - - 4 | - | - | - |
| - | - | - | - | - |

ตารางที่ 3.5 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืน สัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความข่ายเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 25 และ 52

| สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 2 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 5 |
|---|---|---|---|---|
| - | - | - | - | 5 - - 4 - - 3 - - 1 |
| - | - | - | - | 5 - - 4 - - 2 |
| - | - | - | - | - |
| 1 - - 3 - - 4 - - 5 | 2 - - 4 - - 5 | - | - | - |

ตารางที่ 3.6 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืน สัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความข่ายเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 34 และ 43

| สัญญาณส่งจาก โนดที่ 1 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 2 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 3 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 4 | สัญญาณส่งจาก โนดที่ 5 |
|---|---|---|---|---|
| - | - | - | 4 - - 2 - - 1 | - |
| - | 2 - - 1 - - 3 | 3 - - 1 - - 2 | - | - |
| 1 - - 2 - - 4 | - | 3 - - 1 - - 2 - - 4 | 4 - - 2 - - 1 - - 3 | 5 - - 2 - - 1 - - 3 |
| - | - | 3 - - 1 - - 2 - - 5 | - | - |

ตารางที่ 3.7 เส้นทางการส่งสัญญาณที่จัดสรรขึ้นใหม่บนเส้นใยแสงสำรองโดยกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection เมื่อเกิดความข่ายเสียหายขึ้นกับข่ายเชื่อมโยง 54 และ 45

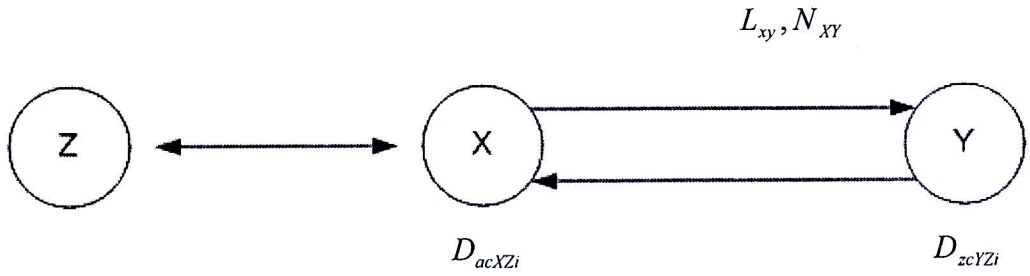
| สัญญาณส่งจากโนดที่ 1 | สัญญาณส่งจากโนดที่ 2 | สัญญาณส่งจากโนดที่ 3 | สัญญาณส่งจากโนดที่ 4 | สัญญาณส่งจากโนดที่ 5 |
|---|---|---|---|---|
| - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | - |
| - | - | - | - | 5 - - 2 - - 4 - - 3 |
| - | - | 3 - - 4 - - 2 - - 5 | 4 - - 2 - - 5 | 5 - - 2 - - 4 |

## 3.2 การสร้างสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตสำหรับเส้นทางการส่งสัญญาณสำหรับการส่งผ่านสัญญาณกรณีโครงข่ายทำงานปกติในตารางที่ 3.1 และสำหรับเส้นทางการส่งผ่านสัญญาณกรณีที่เกิดความเสียหายกับข่ายเชื่อมโยงหนึ่งในโครงข่ายด้วยกลไกการกู้คืนสัญญาณบนเส้นใยแสงสำรองแบบ Path Protection ในตารางที่ 3.2 – 3.7 ประกอบขึ้นด้วยสมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนดต้นทางและโนดปลายทาง (Path Constraints) อสมการเงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน (Maximum Dispersion Constraints) เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม (Integrality Constraint) และการกำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) [17]

### 3.2.1 สมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนด

การสร้างสมการเงื่อนไขขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนดต้นทาง Z ไปยังโนดปลายทาง X และ Y เมื่อเชื่อมต่อด้วยเส้นใยแสง 2 เส้นและสามารถส่งถึงกันได้ทั้งสองทิศทาง เราสามารถกำหนดสมการขอบเขตการส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนดต้นทางไปยังโนดปลายทางใด ๆ ได้ดังนี้




รูปที่ 3.2 การส่งผ่านสัญญาณระหว่างโนดต้นทางและปลายทาง

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

โดยที่ $D_{acXZi}$ คือ ดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทาง X เมื่อสัญญาณความยาวคลื่น $\lambda_i$ ส่งผ่านมาจากโนดต้นทาง Z

$D_{acYZi}$ คือ ดิสเพอร์ชันสะสมที่โนดปลายทาง Y เมื่อสัญญาณความยาวคลื่น $\lambda_i$ ส่งผ่านมาจากโนดต้นทาง Z

$D_i$ คือ ค่าดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงที่ความยาวคลื่น $\lambda_i$

$D_{compi}$ คือ ค่าชดเชยดิสเพอร์ชันของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่ $\lambda_i$

$L_{XY}$ คือ ความยาวของข่ายเชื่อมโยง XY

$N_{XY}$ คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนข่ายเชื่อมโยง XY

จากสมการที่ (3.1) ค่าดิสเพอร์ชันสะสม $D_{acXZi}$ ที่โนดปลายทาง X เมื่อชุดสัญญาณความยาวคลื่น $\lambda_i$ ถูกส่งผ่านมาจากโนดต้นทาง Z จะเพิ่มขึ้นด้วยค่าดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสง SMF ความยาว $L_{XY}$ ที่มีค่าเท่ากับ $D_i \times L_{XY}$ ในขณะเดียวกันค่าดิสเพอร์ชันสะสมดังกล่าวจะถูกชดเชยด้วยหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่วางลงบนข่ายเชื่อมโยง XY จำนวน $N_{XY}$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $D_{compi} \times N_{XY}$ สุดท้ายจะได้เป็นค่าดิสเพอร์ชันสะสมสิ้นสุดที่โนดปลายทาง Y หรือค่า $D_{acYZi}$

### 3.2.2 เงื่อนไขขอบเขตของค่าดิสเพอร์ชัน

เราต้องการให้ค่าดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละความยาวคลื่น ณ โนดปลายทาง Y จากโนดต้นทาง Z มีค่าน้อยกว่า $D_{\max}$ (Acceptable Accumulated Dispersion) และในทางตรงกันข้ามต้องมีค่ามากกว่า $-D_{\max}$ ดังนี้

$$-D_{\max} \le D_{acYZi} \le D_{\max} \tag{3.2}$$

โดยที่ $D_{\max}$ คือ ค่าดิสเพอร์ชันมากที่สุดที่ไม่ทำให้พัลส์สัญญาณเกิดผิดเพี้ยนจนไม่สามารถชดเชยให้กลับมาสู่สัญญาณเดิมได้

### 3.2.3 เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็ม

เงื่อนไขขอบเขตจำนวนเต็มสำหรับแต่ละข่ายเชื่อมโยง XY คือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันที่วางลงในแต่ละข่ายเชื่อมโยงต้องเป็นจำนวนเต็มบวกหรือศูนย์เท่านั้น

$$N_{XY} = \{x : x \in I^{+} \cup \{0\}\} \tag{3.3}$$

### 3.2.4 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นฟังก์ชันที่กำหนดจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดในโครงข่ายในขณะเดียวกันจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดนี้ยังคงรักษาไว้ซึ่งประสิทธิภาพการส่งสัญญาณภายในโครงข่ายได้

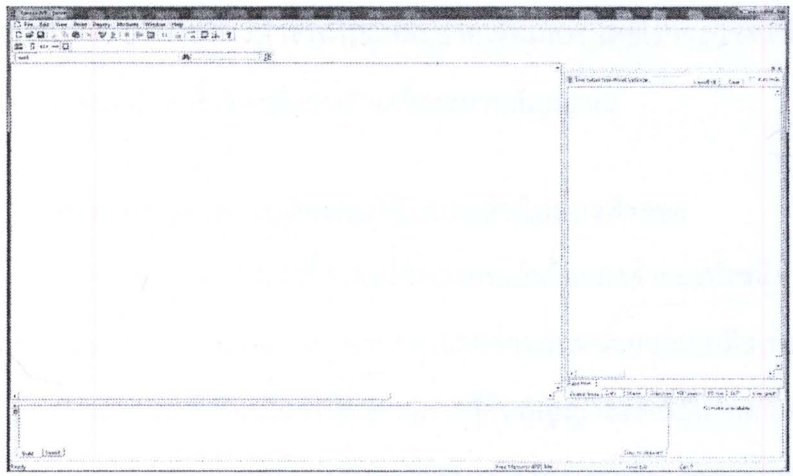
$$Minimize\left\{ N = \sum_{X,Y=1}^{n} N_{XY} \right\} \tag{3.4}$$

โดยที่ $n$ คือ จำนวนโนดทั้งหมดในโครงข่าย

## 3.3 การแก้สมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขต

จากปัญหาข้างต้นเป็นปัญหาที่มีจำนวนจริงและจำนวนเต็มเข้ามาเกี่ยวข้อง อีกทั้งสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้องอยู่ในรูปแบบของสมการเส้นตรงจึงต้องใช้การแก้ปัญหาแบบ Mixed-Integer-Linear-Programming (MILP) เพื่อทำ Optimization หาผลเฉลยจากสมการและอสมการเงื่อนไขขอบเขตโดยเลือกใช้โปรแกรม Xpress MP [40] ในการประมวลผลเนื่องจากโปรแกรมมีวิธีการใช้งานที่ง่ายและมีการประมวลผลที่รวดเร็วแสดงดังรูปที่ 3.3

ผลเฉลยที่ได้เราจะได้จากอัลกอริทึมสำหรับการใช้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันคือ จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงและค่าดิสเพอร์ชันสะสมของแต่ละความยาวคลื่นที่ทุกโนดปลายทางภายในโครงข่าย



รูปที่ 3.3 โปรแกรม Xpress MP

### 3.4 การกำหนดตำแหน่งของหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชัน

การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงในโครงข่ายจะนำผลเฉลยที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.3 มาระบุตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของโครงข่าย ในความเป็นจริงแล้วเมื่อเราพิจารณาเฉพาะผลของดิสเพอร์ชันเราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันตำแหน่งใดๆ บนข่ายเชื่อมโยง เนื่องจากตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันไม่ส่งผลถึงค่าดิสเพอร์ชันสะสมที่ปลายทาง แต่เราเลือกให้หน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันวางที่ขาเข้าของเครื่องขยายสัญญาณหรือในตำแหน่งที่สัญญาณมีกำลังต่ำสุดเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้น

ในกรณีที่จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีจำนวนมากกว่าจำนวนเครื่องขยายสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง นอกจากหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันจะถูกวางที่ขาเข้าของเครื่องขยายสัญญาณแล้ว เรายังวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชัน ณ จุดที่เหมาะสมอื่นๆ ร่วมด้วยและในกรณีที่จำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันมีจำนวนน้อยกว่าจำนวนเครื่องขยายสัญญาณในข่ายเชื่อมโยงหนึ่ง เราสามารถวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันขาเข้าเครื่องขยายสัญญาณใดๆ ในเส้นทางตั้งแต่ตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณ

#### 3.4.1 การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงทำงาน

การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงบนเส้นใยแสงทำงานจะพิจารณาแยกอิสระจากการวางหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรอง ตำแหน่งของหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันทั้งชนิด NS-DCU และ SC-DCU บนเส้นใยแสงทำงานจะพิจารณาจากผลเฉลยจำนวนหน่วย

ชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนเส้นใยแสงทำงานในแต่ละช่ายเชื่อมโยง โดยเราจะวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเมื่อสัญญาณมีกำลังต่ำสุดหรือขาเข้าเครื่องขยายสัญญาณ

### 3.4.2 การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันบนเส้นใยแสงสำรอง

การกำหนดตำแหน่งหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันลงบนเส้นใยแสงสำรองทั้งชนิด NS-DCU และ SC-DCU บนเส้นใยแสงสำรองจะพิจารณาจากผลเฉลยจำนวนหน่วยชดเชยดิสเพอร์ชันน้อยสุดบนเส้นใยแสงสำรองในแต่ละช่ายเชื่อมโยง เนื่องจากการกู้คืนสัญญาณที่เสียหายตามกลไกการกู้คืนสัญญาณแบบ Path Protection จะเกิดบนเส้นใยแสงสำรอง โดยเราจะวางหน่วยชดเชยค่าดิสเพอร์ชันเมื่อสัญญาณมีกำลังต่ำสุดหรือขาเข้าเครื่องขยายสัญญาณ