หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 3

# แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการจำลองปัญหาการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย WDM โดยวัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลองคือการหาจำนวนเส้นใยนำแสงโดยรวมที่โครงข่ายต้องการเพื่อรองรับทราฟฟิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้ ทั้งในกรณีที่ทุกโนดในโครงข่ายมีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่นและในกรณีที่ทุกโนดในโครงข่ายไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยใช้เทคนิคแบบ Integer linear programming (ILP) ในการสร้างแบบจำลอง

## 3.1 แบบจำลองของโครงข่าย (Network model)

กำหนดให้โครงข่าย WDM ที่พิจารณาถูกแทนที่ด้วยกราฟแบบไม่แสดงทิศทาง (Unidirected graph) G(V,E) ซึ่งประกอบไปด้วยเซตของโนด (V) จำนวน N โนด, $|V| = N$ และเซตของข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ (Physical link) (E) แบบไม่แสดงทิศทาง(Unidirected link) จำนวน L ข่ายเชื่อมโยง , $|E| = L$ โดยแต่ละข่ายเชื่อมโยงจะประกอบไปด้วยกลุ่มของเส้นใยนำแสงที่ทำหน้าที่รองรับเส้นทางที่ใช้ในการส่งผ่านข้อมูลระหว่างโนดต้นทางกับโนดปลายทาง โดยกำหนดให้จำนวนความยาวคลื่นที่สามารถมัลติเพล็กซ์ได้ในเส้นใยนำแสงแต่ละเส้นมีจำนวนเท่ากับ M อีกทั้งยังกำหนดให้แต่ละโนดมีการติดตั้งอุปกรณ์ในการทำมัลติตาสต์เพื่อคัดลอกและแยกสัญญาณแสงออกเป็นสัญญาณย่อยจำนวนหนึ่ง ทำให้สามารถส่งข้อมูลไปยังโนดปลายทางที่ร้องขอข้อมูลดังกล่าวได้เป็นจำนวนมาก และยังกำหนดให้ปริมาณทราฟฟิกในโครงข่ายเป็นทราฟฟิกชนิดคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา

## 3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ

โครงข่าย WDM เส้นใยนำแสงที่ใช้ช่องสัญญาณหลายๆช่องสัญญาณซึ่งขึ้นอยู่กับค่า M ของเส้นใยนำแสง โดยช่องสัญญาณสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะการใช้งานดังนี้

1) ความจุใช้งาน (Working capacity) คือความจุที่ใช้รองรับเส้นทางที่เป็นวิถีทำงาน (Active path) ซึ่งเป็นเส้นทางใช้งานทั่วไปเมื่อโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติหรือสภาวะที่ไม่มีความขัดข้องเกิดขึ้นภายในโครงข่าย

2) ความจุสำรอง (Spare capacity) คือความจุที่ใช้รองรับเส้นทางที่เป็นวิถีสำรอง (Protection path)
ซึ่งเป็นเส้นทางที่ถูกเปลี่ยนมาใช้งานเมื่อโครงข่ายเกิดความขัดข้องขึ้นหนึ่งโนด

ดังนั้น ในการสร้างแบบจำลองปัญหาการจัดสรรเส้นทางและความยาวคลื่นให้กับโครงข่าย WDM เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการจึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ดังนี้

1) Optimized Spare Capacity Assignment เป็นวิธีการหาจำนวนความจุสำรองทั้งหมดที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายเพื่อให้โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาเมื่อมีความเสียหายหนึ่งโนด ในกรณีนี้จะต้องมีการกำหนดเส้นทางและความยาวคลื่นของวิถีทำงานมาให้ รวมทั้งกำหนดจำนวนความจุทำงานมาให้ด้วย เพื่อนำมาพิจารณาร่วมกับความจุสำรองที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่โครงข่ายต้องการ
2) Jointly Optimized Working and Spare Capacity Assignment เป็นวิธีการหาความจุทำงานทั้งหมดที่ใช้รองรับทราฟฟิกเมื่อโครงข่ายอยู่ในสภาวะปกติ และจำนวนความจุสำรองทั้งหมดที่ใช้ที่ต้องจัดสรรให้กับโครงข่ายเพื่อให้โครงข่ายสามารถแก้ไขปัญหาเมื่อมีความเสียหายหนึ่งโนดพร้อมกันโดยไม่ต้องมีการกำหนดเส้นทาง ความยาวคลื่น และจำนวนความจุทำงานมาให้เหมือนกับวิธีแรก

เมื่อพิจารณาจะพบว่าการจำลองปัญหาในกรณีแรกจะเป็นการจำลองปัญหาสำหรับโครงข่ายที่มีการใช้งานจริงในทางปฏิบัติแล้ว แต่ว่าโครงข่ายดังกล่าวยังไม่ได้มีการคำนึงถึงกรณีที่โครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด นั่นคือ ยังไม่มีการติดตั้งความจุสำรองเพิ่มเติมให้กับโครงข่าย ดังนั้น สามารถใช้วิธีการจำลองแบบแรกมาออกแบบหาจำนวนความจุสำรองที่โครงข่ายต้องการได้ ส่วนในกรณีของการจำลองปัญหาในกรณีที่สองนั้น จะเหมาะสมสำหรับการออกแบบโครงข่ายที่ต้องการทราบถึงต้นทุนของโครงข่ายก่อนที่จะมีการพิจารณาวาง โครงข่ายจริงในทางปฏิบัติ โดยค่าต้นทุนของโครงข่ายจะเป็นค่าจำนวนเส้นใยนำแสงทั้งหมดที่ต้องทำการติดตั้งให้กับโครงข่ายซึ่งจะประกอบไปด้วยความจุทำงานและความจุสำรอง ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะพิจารณาเฉพาะปัญหาที่เกิดในกรณีแรกเท่านั้น โดยกำหนดตัวแปรและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ดังนี้

พารามิเตอร์ และ ตัวแปรสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

| พารามิเตอร์ | คำอธิบาย |
|---|---|
| $N$ | จำนวนโนดทั้งหมดในโครงข่าย |
| $L$ | จำนวนข่ายเชื่อมโยงทั้งหมดในโครงข่าย |
| $i$ | ดัชนีของมัลติคาสต์ |
| $S_i$ | มัลติคาสต์เซสชั่นที่ $i$ โดยมีโนดต้นทางคือ $s_i$ และชุดโนดปลายทางคือ $d_j$ |
| $t_i$ | ทราฟฟิกของมัลติคาสต์เซสชั่นที่ $i$ |
| $\Delta$ | จำนวนสัญญาณที่มากที่สุดที่อนุญาตให้ออกจากตัวแยกสัญญาณได้ (fanout) |
| $M$ | จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ลงบนเส้นใยนำแสงได้ |
| $\delta_{mn,p}^{sd}$ | มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางหลักที่ $p$ ของกิ่งเชิงแสง $sd$ ผ่านข่ายเชื่อมโยง $mn$ ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0 |
| $p_{sd}$ | ชุดเส้นทางหลักที่เป็นไปได้ทั้งหมดของคู่โนด $sd$ |
| $I_\alpha$ | ค่าคงที่จำนวนเต็มที่มีค่ามาก |

| ตัวแปร | คำอธิบาย |
|---|---|
| $X_i^{mn}$ | มีค่าเป็น 1 เมื่อกิ่งเชิงแสงของเส้นทางหลักที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากโนด $m$ ไปยังโนด $n$ ถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำหรับมัลติคาสต์เซสชั่นที่ $i$ ถ้าไม่ถูกใช้จะมีค่าเป็น 0 |
| $P_{i,p}^{sd}$ | เส้นทางทางกายภาพของเส้นทางหลัก(physical route) ลำดับที่ $p$ ของคู่โนด $sd$ ของมัลติคาสต์เซสชั่นที่ $i$ (สำหรับวิธี VLT) |
| $P_{i,p,\lambda}^{sd}$ | เส้นทางทางกายภาพของเส้นทางหลัก (physical route) ลำดับที่ $p$ ของคู่โนด $sd$ ของมัลติคาสต์เซสชั่นที่ $i$ ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น $\lambda$ (สำหรับวิธี LT) |
| $W_{i,\lambda}$ | มีค่าเป็น 1 เมื่อค่าความยาวคลื่น $\lambda$ ถูกเลือกเพื่อใช้ส่งข้อมูลสำหรับมัลติคาสต์เซสชั่นที่ $i$ ถ้าไม่ถูกเลือกจะมีค่าเป็น 0 |
| $fp_{mn}$ | จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้แก่ข่ายเชื่อมโยง $mn$ ในสภาวะปกติ |

พารามิเตอร์ และ ตัวแปรสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด

| พารามิเตอร์ | คำอธิบาย |
|---|---|
| $itf$ | ดัชนีของมัลติคาสต์ที่มีเส้นทางผ่านโนดที่เสียหาย |
| $iaf$ | ดัชนีของมัลติคาสต์ที่โนดระหว่างทางเชื่อมต่อมายังโนดที่เสียหาย |
| $B_{i,r}^{sd,f}$ | ชุดเส้นทางสำรองที่เป็นไปได้ทั้งหมดของคู่โนด $sd$ เมื่อโนด $f$ เกิดความเสียหาย |

| ตัวแปร | คำอธิบาย |
|---|---|
| $\mu_{mn,r}^{sd,f}$ | มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางสำรองที่ $p$ ของกิ่งเชิงแสง $sd$ ผ่านข่ายเชื่อมโยง $mn$ เมื่อโนด $f$ เกิดความเสียหาย ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0 |
| $fb_{mn}$ | จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้แก่ข่ายเชื่อมโยง $mn$ กรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด(สำหรับวิธีET) |
| $ft_{mn}$ | จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้แก่ข่ายเชื่อมโยง $mn$ กรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด(สำหรับวิธีTT) |
| $fa_{mn}$ | จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้แก่ข่ายเชื่อมโยง $mn$ กรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด(สำหรับวิธีAD) |
| $xb_{i,f}^{mn}$ | มีค่าเป็น 1 เมื่อกิ่งเชิงแสงของเส้นทางสำรองที่ใช้ในการส่งข้อมูลจากโนด $m$ ไปยังโนด $n$ ถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำหรับมัลติคาสต์เซสชั่นที่ $i$ เมื่อโนด $f$ เกิดความเสียหายถ้าไม่ถูกใช้จะมีค่าเป็น 0 |
| $B_{i,r}^{sd,f}$ | เส้นทางทางกายภาพของเส้นทางสำรอง(physical route) ลำดับที่ $p$ ของคู่โนด $sd$ ของมัลติคาสต์เซสชั่นที่ $i$ เมื่อโนด $f$ เกิดความเสียหาย(สำหรับวิธี VLT) |
| $B_{i,r,\lambda}^{sd,f}$ | เส้นทางทางกายภาพของเส้นทางสำรอง (physical route) ลำดับที่ $p$ ของคู่โนด $sd$ ของมัลติคาสต์เซสชั่นที่ $i$ ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น $\lambda$ เมื่อโนด $f$ เกิดความเสียหาย (สำหรับวิธี LT) |
| $NDJ(P_{i,p,f}^{sd})$ | ชุดของเส้นทางสำรองทางกายภาพที่ไม่ซ้ำโนดกับเส้นทางหลักทางกายภาพ ( $P_{i,p,f}^{sd}$ ) ที่ผ่านโนดที่เสียหาย |
| $NDJ(P_{i,p,af}^{sd})$ | ชุดของเส้นทางสำรองทางกายภาพที่ไม่ซ้ำโนดกับเส้นทางหลักทางกายภาพ ( $P_{i,p,f}^{sd}$ ) ที่โนดระหว่างทางเชื่อมต่อไปยังที่เสียหาย |

### 3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการสร้างโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง

ในการหาต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด (optimal light-tree) $T_i$ เพื่อรองรับมัลติคาสต์เซสชั่นที่ $i$ นั้น จะต้องแทนที่โครงข่าย WDM ที่พิจารณาด้วยกราฟแบบสองทิศทาง $G_i = (N_i, A_i)$ โดยชุดของโนด $N_i$ จะประกอบไปด้วยโนดต้นทางคือ $s_i$ และชุดโนดปลายทางคือ $d_j$ ซึ่งสามารถแสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $N_i = \{m \in N_i \,|\, m = s_i \vee m = d_j\}$ รวมทั้งสิ้น $|N_i|$ โนด และชุดของเส้นเชื่อมเชิงตรรกะ (logical arcs) ซึ่งสามารถแสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $A_i = \{mn \in A_i \,|\, m,n \in N_i \wedge m \neq n\}$ แล้วเปลี่ยนกราฟแบบสองทิศทาง $G_i$ ที่ได้ให้เป็นโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด $T_i$ โดยโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องประกอบด้วยกิ่งเชิงแสงจำนวน $|N_i|-1$ กิ่ง โดยมีเงื่อนไขบังคับดังนี้

$$\sum_{mn \in A_i} X_i^{mn} = |N_i| - 1 \qquad \forall i, \forall mn \in L \qquad (1)$$

$$X_i^{mn} \in \{0,1\} \qquad \forall m,n \in A_i, \forall i \qquad (2)$$

เพื่อเป็นการแน่ใจว่าทุกโนดที่เป็นสมาชิกของมัลติคาสต์สามารถเชื่อมต่อถึงกันได้และโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องไม่มีลักษณะเป็นวงปิด เงื่อนไขบังคับข้อที่ (3) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sum_{mn \in \partial(S)} X_i^{mn} \geq 1 \qquad \forall i, \forall S \subset N, S \neq \varnothing, N \qquad (3)$$

เมื่อ $S$ คือเซตย่อย(subset) ของ $N_i$ และ $\partial(S)$ คือเซตตัด(cutest) ของเซตย่อย $S$ โดยสามารถแสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $\partial(S) = \{mn \in A_i \,|\, m \in S, n \notin S\}$ และเมื่อพิจารณาขาออกของแต่ละโนด จะพบว่าจำนวนเส้นเชื่อมขาออกของแต่ละโนดจะถูกจำกัดด้วยอุปกรณ์แยกสัญญาณทางแสงที่สามารถแยกสัญญาณออกเป็นสัญญาณขนาดย่อยได้เท่ากับ $\Delta$ ดังนั้นเงื่อนไขบังคับข้อที่ (4) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sum_{n:mn \in A_i} X_i^{mn} \leq \Delta \qquad \forall m \in N_i, \forall i \qquad (4)$$

**3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ**

ในการจัดเส้นทางและการกำหนดความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายที่รองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ในสภาวะทำงานปกติ จะเป็นการจัดสรรความจุใช้งานเพื่อรองรับเส้นทางที่เป็นวิถีทำงานให้กับโครงข่าย โดยสามารถใช้เทคนิค ILP ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

3.4.1 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือน (Virtual Light-Tree method, VLT)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$Min : \sum_{mn \in L} fp_{mn} \qquad (5)$$

เงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) และ

$$\sum_{p\in P_{sd}} P_{i,p}^{sd} = txX_i^{sd} \qquad \forall sd \in A_i, \forall i \qquad (6)$$

$$Mxfp_{mn} - \sum_{i}\sum_{sd}\sum_{p\in P_{sd}} P_{i,p}^{sd}\delta_{mn,p}^{sd} \geq 0 \qquad \forall mn \in L \qquad (7)$$

$$P_{i,p}^{sd} \in Z^{+} \qquad \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_i, \forall i \qquad (8)$$

$$fp_{mn} \in Z^{+} \qquad \forall mn \in L \qquad (9)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (5) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) และ (6) ถึง (9) ซึ่งเงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในการหาต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด เงื่อนไขบังคับข้อ (6) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อ (7) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ เงื่อนไขบังคับข้อ (8) และ (9) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ค่าของตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.4.2 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง (Light-Tree method, LT)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$Min: \sum_{mn\in L} fp_{mn} \qquad (10)$$

เงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) และ

$$\sum_{\lambda=1}^{M}\sum_{p\in P_{sd}} P_{i,p,\lambda}^{sd} = txX_i^{sd} \qquad \forall sd \in A_i, \forall i \qquad (11)$$

$$fp_{mn} - \sum_{i}\sum_{sd}\sum_{p\in P_{sd}} P_{i,p,\lambda}^{sd}\delta_{mn,p}^{sd} \geq 0 \qquad \forall \lambda = \{1,2,..,M\}, \forall mn \in L \qquad (12)$$

$$\sum_{\lambda=1}^{M} W_{i,\lambda} = 1 \qquad \forall i \qquad (13)$$

$$P_{i,p,\lambda}^{sd} \leq I_{\alpha} W_{i,\lambda} \qquad \forall \lambda = \{1,2,..,M\}, \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_i, \forall i \qquad (14)$$

$$W_{i,\lambda} \in Z^{+} \qquad \forall \lambda = \{1,2,..,M\}, \forall i \qquad (15)$$

$$P_{i,p,\lambda}^{sd} \in Z^{+} \qquad \forall p \in P_{sd}, \forall \lambda = \{1,2,..,M\}, \forall sd \in A_i, \forall i \qquad (16)$$

$$fp_{mn} \in Z^{+} \qquad \forall mn \in L \qquad (17)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (10) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) และ (11) ถึง (17) ซึ่งเงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในการหาต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะสมที่สุด เงื่อนไขบังคับข้อ (11) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อ (12) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ เงื่อนไขบังคับข้อ (13) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้แต่ละมัลติคาสต์เซสชันเลือกใช้ความยาวคลื่นได้เพียงค่าเดียวและความยาวคลื่นที่ถูกเลือกมาใช้งานนั้นจะถูกกำหนดให้กับเส้นทางทางกายภาพจากเงื่อนไขบังคับข้อ (14) เงื่อนไขบังคับที่ (15) ถึง (17) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ค่าของตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

**3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายมีความเสียหายหนึ่งโนด**

ความน่าจะเป็นหรือโอกาสที่โนดจะเกิดความเสียหายขึ้นในโครงข่ายนั้นน้อยมากเมื่อเทียบกับความเสียหายที่จะเกิดขึ้นที่ข่ายเชื่อมโยงเนื่องจากมีการใช้ระบบการทำงานสำรองของอุปกรณ์ในโครงข่าย แต่อย่างไรก็ตามโอกาสที่โนดจะเกิดความเสียหายขึ้นในโครงข่ายนั้นก็เป็นไปได้ และก่อให้เกิดความเสียหายร้ายแรงกับการให้บริการสื่อสารโทรคมนาคมได้ เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งโนดในโครงข่าย ทราฟฟิกในโครงข่ายจะถูกจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น ซึ่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มีการกำหนดว่าถ้าโนดที่เสียหายเป็นโนดต้นทางหรือโนดปลายทางจะไม่สามารถบูรณะได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่ในโครงข่ายเมื่อโนดมีความเสียหายเกิดขึ้น 3 วิธี

1).Reconfiguration of entire network (ET)

2). Reconfiguration of traffic traversing through failure node (TT)

3). Reconfiguration of traffic adjacent to failure node (AD)

ซึ่งสามารถแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่างๆดังนี้

3.5.1 Reconfiguration of entire network

การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้ เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งโนดในโครงข่าย การจัดสรรเส้นทางใหม่จะกำหนดให้ทุกมัลติคาสต์เซสชันจะถูกปลดออกและจัดสร้างขึ้นมาใหม่โดยเปลี่ยนไป

ใช้เส้นทางสำรองเพื่อหลีกเลี่ยงโนดที่เสียหาย ถึงแม้ว่าเซสชันเหล่านั้นจะไม่มีเส้นทางผ่านโนดที่เสียหายก็ตาม ทำให้วิธีการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้มีความยืดหยุ่นสูง และใช้ทรัพยากรในโครงข่ายต่ำ

3.5.1.1 กรณี VLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$Min: \sum_{mn \in L} fb_{mn} \tag{18}$$

และมีเงื่อนไขบังคับดังนี้

$$\sum_{mn \in A_i} Xb_{i,f}^{mn} = |N_i| - 1 \qquad \forall i, \forall mn \in L, \forall f \in N \tag{19}$$

$$\sum_{mn \in \partial(S)} Xb_{i,f}^{mn} \geq 1 \qquad \forall i, \forall S \subset N, S \neq \varnothing, N, \forall f \in N \tag{20}$$

$$\sum_{n:mn \in A_i} Xb_{i,f}^{mn} \leq \Delta \qquad \forall m \in N_i, \forall i, \forall f \in N \tag{21}$$

$$Xb_{i,f}^{mn} \in \{0,1\} \qquad \forall m,n \in A_i, \forall i, \forall f \in N \tag{22}$$

$$\sum_{r \in B_f^{sd}} B_{i,r,f}^{sd} = txXb_{i,f}^{sd} \qquad \forall sd \in A_i, \forall i, \forall f \in N \tag{23}$$

$$Mxfb_{mn} - \sum_{i} \sum_{sd} \sum_{r \in B_f^{sd}} B_{i,r,f}^{sd} \mu_{mn,r}^{sd,f} \geq 0 \qquad \forall r \in B_f^{sd}, \forall f \in N, \forall mn \in L \tag{24}$$

$$fb_{mn} \geq fp_{mn} \qquad \forall mn \in L \tag{25}$$

$$B_{i,r,f}^{sd} \in Z^+ \qquad \forall r \in B_f^{sd}, \forall sd \in A_i, \forall f \in N, \forall i \tag{26}$$

$$fb_{mn} \in Z^+ \qquad \forall mn \in L \tag{27}$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (18) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดให้แก่โครงข่ายในการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ทั้งหมดจากสภาวะการทำงานปกติ โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (19) ถึง (22) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในการหาต้นไม้เชิงแสงสำรองที่เหมาะสมที่สุดในการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงโนดที่เสียหาย เงื่อนไขบังคับข้อ (23) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงสำรองทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำรองจะต้องมีเส้นทางสำรองทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อ (24) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงสำรองทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่

เกิดขึ้นได้ เงื่อนไขบังคับข้อ (25) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองสามารถรองรับการใช้งานของโครงข่ายทั้งในสภาวะการใช้งานปกติและสภาวะที่เกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งโนดในโครงข่าย เงื่อนไขบังคับข้อ (26) และ (27) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ค่าของตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.5.1.2 กรณี LT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$Min: \sum_{mn \in L} fb_{mn} \tag{28}$$

เงื่อนไขบังคับข้อ (19) ถึง (22) และ

$$\sum_{r \in B_f^{sd}} \sum_{\lambda=1}^{M} B_{i,r,\lambda,f}^{sd} = txXb_{i,f}^{sd} \qquad \forall sd \in A_i, \forall i, \forall f \in N \tag{29}$$

$$fb_{mn} - \sum_{i} \sum_{sd} \sum_{r \in B_f^{sd}} B_{i,r,\lambda,f}^{sd} \mu_{mn,r}^{sd,f} \geq 0 \qquad \forall \lambda = \{1,2,..,M\}, \forall f \in N \tag{30}$$

$$\sum_{\lambda=1}^{M} W_{i,\lambda} = 1 \qquad \forall i \tag{31}$$

$$B_{i,r,\lambda,f}^{sd} \leq I_{\alpha} W_{i,\lambda} \qquad \forall \lambda = \{1,2,..,M\}, \forall r \in B_f^{sd}, \forall sd \in A_i, \forall i, \forall f \in N \tag{32}$$

$$fb_{mn} \geq fp_{mn} \qquad \forall mn \in L \tag{33}$$

$$B_{i,r,\lambda,f}^{sd} \in Z^{+} \qquad \forall \lambda = \{1,2,..,M\}, \forall r \in B_f^{sd}, \forall i, \forall f \in N \tag{34}$$

$$W_{i,\lambda} \in Z^{+} \qquad \forall \lambda = \{1,2,..,M\}, \forall i \tag{35}$$

$$fb_{mn} \in Z^{+} \qquad \forall mn \in L \tag{36}$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (28) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดให้แก่โครงข่ายในการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ทั้งหมดจากสภาวะการทำงานปกติ โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (19) ถึง (22) และ (29) ถึง (36) ซึ่งเงื่อนไขบังคับข้อ (19) ถึง (22) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในการหาต้นไม้เชิงแสงสำรองที่เหมาะสมที่สุดในการจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงโนดที่เสียหาย เงื่อนไขบังคับข้อ (29) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงสำรองทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำรองจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อ (30) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงสำรองทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ เงื่อนไขบังคับข้อ (31) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้

แต่ละมัลติคาสต์เซสชันที่จัดสรรเส้นทางใหม่เลือกใช้ความยาวคลื่นได้เพียงค่าเดียวและความยาวคลื่นที่ถูกเลือกมาใช้งานนั้นจะถูกกำหนดให้กับเส้นทางสำรองทางกายภาพจากเงื่อนไขบังคับข้อ (32) เงื่อนไขบังคับข้อ (33) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองสามารถรองรับการใช้งานของโครงข่ายทั้งในสภาวะการใช้งานปกติและสภาวะที่เกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งโนดในโครงข่าย เงื่อนไขบังคับที่ (34) ถึง (36) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ค่าของตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.5.2 Reconfiguration of traffic traversing through failure node

การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้จะเป็นการจัดสรรเส้นทางทางกายภาพใหม่ให้เฉพาะกับเส้นทางหลักทางกายภาพของมัลติคาสต์เซสชันที่มีโนดระหว่างทางเป็นโนดที่เสียหาย โดยวิธีการแบบเส้นทางไม่ซ้ำโนด ซึ่งหมายความว่า โนดระหว่างทางของเส้นทางกายภาพเส้นทางหลักและเส้นทางกายภาพเส้นทางสำรองจะต้องไม่ซ้ำกัน

3.5.2.1 กรณี VLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$Min: \sum_{mn \in L} (fp_{mn} + ft_{mn}) \tag{37}$$

เงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) , (6) ถึง (9) และ (19) ถึง (22)

$$P^{sd}_{itf,p,f}\delta^{sd}_{p,f} - \sum_{ra \in NDJ(P^{sd}_{i,p,f})} B^{sd}_{i,ra,f} = 0 \qquad \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_i, \forall itf, \forall f \in N \tag{38}$$

$$\sum_{ra \in NDJ(P^{sd}_{itf,p,f})} B^{sd}_{itf,ra,f} = txXb^{sd}_{itf,f} \qquad \forall sd \in A_i, \forall itf, \forall f \in N \tag{39}$$

$$Mxft_{mn} - \sum_{itf}\sum_{sd}\sum_{ra \in NDJ(P^{sd}_{itf,p,f})} B^{sd}_{itf,ra,f}\mu^{sd,f}_{mn,ra} \geq 0$$

$$\forall ra \in NDJ(P^{sd}_{itf,p,f}), \forall f \in N, \forall mn \in L \tag{40}$$

$$B^{sd}_{itf,ra,f} \in Z^{+} \qquad \forall ra \in NDJ(P^{sd}_{itf,p,f}), \forall sd \in A_i, \forall itf, \forall f \in N \tag{41}$$

$$ft_{mn} \in Z^{+} \qquad \forall mn \in L \tag{42}$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (37) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงหลักและเส้นใยนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดให้แก่โครงข่าย โดยจำนวนเส้นใยนำแสงหลักหาได้จากสภาวะการทำงานปกติ และจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองหาได้จากการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้เฉพาะกับเส้นทางกายภาพเส้นทางหลักของมัลติคาสต์เซสชันที่มีโนดระหว่างทางเป็นโนดที่เสียหาย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) และ (6) ถึง (9) เป็นเงื่อนไขบังคับของการทำงานสภาวะปกติ เงื่อนไขบังคับข้อ (19) ถึง (22) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในการหาต้นไม้เชิงแสงสำรองที่เหมาะสมที่สุดในการจัดสรรเส้นทางใหม่สำหรับเส้นทางทางกายภาพเส้นทางหลักที่มีเส้นทางผ่านโนดที่เสียหาย เงื่อนไขบังคับข้อ (38) เป็นเงื่อนไขบังคับที่โครงข่ายเลือกเส้นทางสำรองเป็นเส้นทางไม่ซ้ำโนดกับเส้นทางหลัก เงื่อนไขบังคับข้อ (39) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงสำรองทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำรองจะต้องมีเส้นทางสำรองทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อ (40) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงสำรองทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของเส้นทางหลักที่ผ่านโนดที่เสียหายได้ เงื่อนไขบังคับข้อ (41) และ (42) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ค่าของตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.5.2.2 กรณี LT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$Min: \sum_{mn \in L} (fp_{mn} + ft_{mn}) \tag{43}$$

เงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) , (11), (12) , (14) ถึง (17) และ (19) ถึง (22)

$$\sum_{\lambda=1}^{M} P^{sd}_{itf,p,\lambda,f} \delta^{sd}_{p,f} - \sum_{ra \in NDJ(P^{sd}_{i,p,f})} B^{sd}_{i,ra,\lambda,f} = 0$$

$$\forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_i, \forall itf, \forall f \in N \tag{44}$$

$$\sum_{\lambda=1}^{M} \sum_{ra \in NDJ(P^{sd}_{i,p,f})} B^{sd}_{itf,ra,\lambda,f} = txXb^{sd}_{itf,f} \qquad \forall sd \in A_i, \forall itf, \forall f \in N \tag{45}$$

$$ft_{mn} - \sum_{itf} \sum_{sd} \sum_{ra \in NDJ(P^{sd}_{itf,p,f})} B^{sd}_{itf,ra,\lambda,f} \mu^{sd,f}_{mn,ra} \geq 0$$

$$\forall \lambda = \{1,2,..,M\}, \forall ra \in NDJ(P^{sd}_{itf,p,f}), \forall f \in N, \forall mn \in L \tag{46}$$

$$\sum_{\lambda=1}^{M} W_{itf,\lambda} = 1 \qquad \forall itf \tag{47}$$

$$B^{sd}_{itf,ra,\lambda,f} \leq I_{\alpha} W_{itf,\lambda} \quad \forall \lambda = \{1,2,..,M\}, \forall ra \in NDJ(P^{sd}_{itf,p,f}), \forall sd \in A_i, \forall itf, \forall f \in N \tag{48}$$

$$B^{sd}_{iif,ra,\lambda,f} \in Z^{+} \qquad \forall \lambda = \{1,2,..,M\}, \forall ra \in NDJ(P^{sd}_{iif,p,f}) \quad (49)$$

$$W_{iif,\lambda} \in Z^{+} \qquad \forall \lambda = \{1,2,..,M\}, \forall itf \quad (50)$$

$$ft_{mn} \in Z^{+} \qquad \forall mn \in L \quad (51)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (43) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงหลักและเส้นใยนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดให้แก่โครงข่าย โดยจำนวนเส้นใยนำแสงหลักหาได้จากสภาวะการทำงานปกติ และจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองหาได้จากการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้เฉพาะกับเส้นทางกายภาพเส้นทางหลักของมัลติคาสต์เซสชันที่มีโนดระหว่างทางเป็นโนดที่เสียหาย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) , (11) , (12) , (14) ถึง (17) เป็นเงื่อนไขบังคับของการทำงานสภาวะปกติ เงื่อนไขบังคับข้อ (19) ถึง (22) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในการหาต้นไม้เชิงแสงสำรองที่เหมาะสมที่สุดในการจัดสรรเส้นทางใหม่สำหรับเส้นทางทางกายภาพเส้นทางหลักที่มีเส้นทางผ่านโนดที่เสียหาย เงื่อนไขบังคับข้อ (44) เป็นเงื่อนไขบังคับที่โครงข่ายเลือกเส้นทางสำรองเป็นเส้นทางไม่ซ้ำโนดกับเส้นทางหลัก เงื่อนไขบังคับข้อ (45) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงสำรองทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำรองจะต้องมีเส้นทางสำรองทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อ (46) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงสำรองทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของเส้นทางหลักที่ผ่านโนดที่เสียหายได้ เงื่อนไขบังคับข้อ (47) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้แต่ละมัลติคาสต์เซสชันที่จัดสรรเส้นทางใหม่เลือกใช้ความยาวคลื่นได้เพียงค่าเดียวและความยาวคลื่นที่ถูกเลือกมาใช้งานนั้นจะถูกกำหนดให้กับเส้นทางสำรองทางกายภาพจากเงื่อนไขบังคับข้อ (48) เงื่อนไขบังคับข้อ (49) ถึง (51) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ค่าของตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.5.3 Reconfiguration of traffic adjacent to failure node

การจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีนี้ ไม่เพียงแต่จัดสรรเส้นทางทางกายภาพใหม่ให้เฉพาะกับเส้นทางกายภาพเส้นทางหลักของมัลติคาสต์เซสชันที่มีโนดระหว่างทางเป็นโนดที่เสียหาย แต่ยังจัดสรรเส้นทางทางกายภาพใหม่ให้กับเส้นทางกายภาพเส้นทางหลักของมัลติคาสต์เซสชันที่มีโนดระหว่างทางเชื่อมต่อมายังโนดที่เสียหายด้วย โดยวิธีการแบบเส้นทางไม่ซ้ำโนด ซึ่งหมายความว่าโนดระหว่างทางของเส้นทางกายภาพเส้นทางหลักและเส้นทางกายภาพเส้นทางสำรองจะต้องไม่ซ้ำกัน

3.5.3.1 กรณี VLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$Min: \sum_{mn \in L} (fp_{mn} + ft_{mn} + fa_{mn}) \quad (52)$$

เงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) , (6) ถึง (9) , (19) ถึง (22) และ (38) ถึง (42)

$$P^{sd}_{iaf,p,af}\delta^{sd}_{p,af} - \sum_{rb \in NDJ(P^{sd}_{i,p,f})} B^{sd}_{i,rb,af} = 0 \qquad \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_i, \forall iaf, \forall f \in N \quad (53)$$

$$\sum_{rb \in NDJ(P^{sd}_{i,p,af})} B^{sd}_{iaf,rb,af} = txXb^{sd}_{iaf,f} \qquad \forall sd \in A_i, \forall iaf, \forall f \in N \quad (54)$$

$$Mxfa_{mn} - \sum_{iaf} \sum_{sd} \sum_{rb \in NDJ(P^{sd}_{iaf,p,af})} B^{sd}_{iaf,rb,af}\mu^{sd,af}_{mn,rb} \geq 0$$

$$\forall rb \in NDJ(P^{sd}_{iaf,p,af}), \forall af \in N, \forall mn \in L \quad (55)$$

$$B^{sd}_{iaf,rb,af} \in Z^+ \qquad \forall rb \in NDJ(P^{sd}_{iaf,p,af}), \forall sd \in A_i, \forall iaf, \forall af \in N \quad (56)$$

$$fa_{mn} \in Z^+ \qquad \forall mn \in L \quad (57)$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (52) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงหลักและเส้นใยนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดให้แก่โครงข่าย โดยจำนวนเส้นใยนำแสงหลักหาได้จากสภาวะการทำงานปกติ จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่เส้นทางหลักผ่านโนดที่เสียหายหาได้จากเงื่อนไขบังคับข้อ (38) ถึง (42)และจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองหาได้จากการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเส้นทางกายภาพเส้นทางหลักของมัลติคาสต์เซสชันที่มีโนดระหว่างทางเชื่อมต่อมายังโนดที่เสียหาย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) และ (6) ถึง (9) เป็นเงื่อนไขบังคับของการทำงานสภาวะปกติ เงื่อนไขบังคับข้อ (19) ถึง (22) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในการหาต้นไม้เชิงแสงสำรองที่เหมาะสมที่สุดในการจัดสรรเส้นทางใหม่สำหรับเส้นทางทางกายภาพเส้นทางหลักที่มีเส้นทางผ่านโนดที่เสียหายและเส้นทางทางกายภาพเส้นทางหลักที่มีโนดระหว่างทางเชื่อมต่อมายังโนดที่เสียหาย เงื่อนไขบังคับข้อ (53) เป็นเงื่อนไขบังคับที่โครงข่ายเลือกเส้นทางสำรองเป็นเส้นทางไม่ซ้ำโนดกับเส้นทางหลักที่มีโนดระหว่างทางเชื่อมต่อไปยังโนดที่เสียหาย เงื่อนไขบังคับข้อ (54) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงสำรองทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำรองจะต้องมีเส้นทางสำรองทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อ (55) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงสำรองทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของเส้นทางหลักที่มีโนดระหว่างทางเชื่อมต่อ

I 23100461

มายังโนดที่เสียหายได้ เงื่อนไขบังคับข้อ (56) และ (57) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ค่าของตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

3.5.3.2 กรณี LT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

$$Min: \sum_{mn \in L} (fp_{mn} + ft_{mn} + fa_{mn}) \tag{58}$$

เงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) ,(11), (12), (14), (16), (17), (19) ถึง (22) , (44) ถึง (47) ,(49), (51) และ

$$\sum_{\lambda=1}^{M} P^{sd}_{iaf,p,\lambda,af} \delta^{sd}_{p,af} - \sum_{rb \in NDJ(P^{sd}_{i,p,af})} B^{sd}_{i,rb,\lambda,af} = 0$$

$$\forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_i, \forall iaf, \forall af \in N \tag{59}$$

$$\sum_{\lambda=1}^{M} \sum_{rb \in NDJ(P^{sd}_{i,p,af})} B^{sd}_{iaf,rb,\lambda,af} = txXb^{sd}_{iaf,af} \qquad \forall sd \in A_i, \forall iaf, \forall af \in N \tag{60}$$

$$fa_{mn} - \sum_{iaf} \sum_{sd} \sum_{rb \in NDJ(P^{sd}_{iaf,p,af})} B^{sd}_{iaf,rb,\lambda,af} \mu^{sd,af}_{mn,rb} \geq 0$$

$$\forall \lambda = \{1,2,..,M\}, \forall rb \in NDJ(P^{sd}_{iaf,p,af}), \forall af \in N, \forall mn \in L \tag{61}$$

$$\sum_{\lambda=1}^{M} W_{iaf,\lambda} = 1 \qquad \forall iaf \tag{62}$$

$$B^{sd}_{iaf,rb,\lambda,af} \leq I_{\alpha} W_{iaf,\lambda} \quad \forall \lambda = \{1,2,..,M\}, \forall rb \in NDJ(P^{sd}_{iaf,p,af}), \forall sd \in A_i, \forall iaf, \forall af \in N \tag{63}$$

$$B^{sd}_{iaf,rb,\lambda,af} \in Z^{+} \qquad \forall \lambda = \{1,2,..,M\}, \forall rb \in NDJ(P^{sd}_{iaf,p,af}) \tag{64}$$

$$W_{iaf,\lambda} \in Z^{+} \qquad \forall \lambda = \{1,2,..,M\}, \forall iaf \tag{65}$$

$$fa_{mn} \in Z^{+} \qquad \forall mn \in L \tag{66}$$

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (58) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงหลักและเส้นใยนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดให้แก่โครงข่าย โดยจำนวนเส้นใยนำแสงหลักหาได้จากสภาวะการทำงานปกติ จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่เส้นทางหลักผ่านโนดที่เสียหายหาได้จากเงื่อนไขบังคับข้อ (44) ถึง (51) และจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองหาได้จากการจัดสรรเส้นทางใหม่ให้กับเส้นทางกายภาพเส้นทางหลักของมัลติคาสต์เซสชันที่มีโนดระหว่างทางเชื่อมต่อมายังโนดที่เสียหาย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (1) ถึง (4) , (11) , (12) , (14) ถึง (17) เป็นเงื่อนไขบังคับของการทำงานสภาวะปกติ

เงื่อนไขบังคับข้อ (19) ถึง (22) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้ในการหาต้นไม้เชิงแสงสำรองที่เหมาะสมที่สุดในการจัดสรรเส้นทางใหม่สำหรับเส้นทางทางกายภาพเส้นทางหลักที่มีเส้นทางผ่านโนดที่เสียหายและเส้นทางทางกายภาพเส้นทางหลักที่มีโนดระหว่างทางเชื่อมต่อมายังโนดที่เสียหาย เงื่อนไขบังคับข้อ (59) เป็นเงื่อนไขบังคับที่โครงข่ายเลือกเส้นทางสำรองเป็นเส้นทางไม่ซ้ำโนดกับเส้นทางหลัก เงื่อนไขบังคับข้อ (60) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงสำรองทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำรองจะต้องมีเส้นทางสำรองทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อ (61) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงสำรองทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกของเส้นทางหลักที่มีโนดระหว่างทางเชื่อมต่อมายังโนดที่เสียหายได้ เงื่อนไขบังคับข้อ (62) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้แต่ละมัลติคาสต์เซสชันที่จัดสรรเส้นทางใหม่เลือกใช้ความยาวคลื่นได้เพียงค่าเดียวและความยาวคลื่นที่ถูกเลือกมาใช้งานนั้นจะถูกกำหนดให้กับเส้นทางสำรองทางกายภาพจากเงื่อนไขบังคับข้อ (63) เงื่อนไขบังคับข้อ (64) ถึง (66) เป็นเงื่อนไขบังคับที่กำหนดให้ค่าของตัวแปรมีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์