รายการอ้างอิง

1. George N. Rouskas. Routing and Wavelength Assignment in Optical WDM Networks. Wiley Encyclopedia of Telecommunications. (John Proakis, Editor), John Wiley & Sons. (2001).
2. B. Mukherjee. WDM optical communication networks: Progress and Challenges. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 18 (October 2000): 1810-1824.
3. G. N. Rouskas and H. G. Parros. A tutorial on optical networks. Networking 2002 Tutorial. (2002): 155-193.
4. K. N. Sivarajan and R. Ramaswami. Routing and wavelength assignment in all-optical networks. IEEE Transactions of Networking. 3 (Oct. 1995): 489-500.
5. D. Banerjee and B. Mukherjee. A practical approach for routing and wavelength assignment in large wavelength-routed optical networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications.14 (June 1996): 903-908.
6. N. Nagatsu, Y. Hamazumi and K. Sato. Optical path accommodation designs applicable to large scale networks. IEICE Transactions on Communications E78-B (April 1995): 597-607.
7. J. Strand, A. L. Chiu and R. Tkach. Issues for routing in the optical layer. IEEE Communications Magazine. (Feb. 2001): 81-87.
8. Y. Xin, G. N. Rouskas and H. G. Perros. Light-Tree Routing Under Optical Layer Power Budget Constraints. Infocom submission. (2003):1-11.
9. G. N. Rouskas. Optical layer multicast: Rationale, building blocks, and challenges. IEEE Network. (Jan./Feb. 2003): 2-8.
10. L. H. Sahasrabuddhe and B. Mukherjee. Multicast routing algorithm and protocols: A tutorial. IEEE Network. (Jan./Feb. 2000): 90-102.
11. C. Boworntummarat. Wavelength Routing and Optical Layer Network Protection Approaches Against Single Link Failures for Multicast Traffic on WDM Networks. A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering Chulalongkorn University. (2003).

12. D. Yan. Optimization models and methods for communication network design and routing. Ph. D. Dissertion Linkopings University. (2001).

13. Sadiq M. Sait and Habib Youssef. Iterative computer algorithms with applications in engineering:solving combinatorial optimization problems. Wiley-IEEE Computer Society Press. (2000).

14. Emile Aarts and Jan Korst. Simulated annealing and Boltzmann machines: a stochastic approach to combinatorial optimization and neural computing. John Wiley & Sons. (July 1990).

15. F. Glover and M. Laguna. Tabu Search. Kluwer Academic Publishers. (1997).

16. M. Gendreau. An Introduction to Tabu Search. (2002).

17. B. Mukherjee. Optical Communication Networks. Newyork : McGraw-Hill. (1997).

18. Eng, K.Y. and Santoro, M. Multi-Gb/s optical cross-connect switch architectures: TDM versus FDM techniques. Proc. of GLOBECOM '89. (November 1989): 999-1003.

19. H. Zang, J. P. Jue and B. Mukherjee. A Review of Routing and Wavelength Assignment Approaches for Wavelength-Routed Optical WDM Networks. Optical Networks Magazine. 1 (January 2000): 47-60.

20. S. Baroni, S.K. Korotky and P. Bayvel. Wavelength interchange in multi-wavelength optical transport networks. Proceedings. ECOC'97. 3 (1997): 164-167.

21. สมชาย ประสิทธิ์จูตระกูล. การออกแบบและวิเคราะห์อัลกอริทึม. กรุงเทพฯ : ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ, 2544.

22. ธัญพร เอี่ยมวสันต์. การออกแบบโครงข่าย WDM บนพื้นฐานของโครงสร้างแบบวงแหวนหลายวงโดยใช้ฮิวริสติกอัลกอริทึม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

23. วรางรัตน์ วัฒนวรากุล. การจัดสรรเส้นทางเชิงความยาวคลื่นและการป้องกันโครงข่ายจากความขัดข้องหนึ่งข่ายเชื่อมโยงบนโครงข่าย WDM สำหรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

ภาคผนวก

ก.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model)

งานวิจัย [11] เสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อนำมาใช้ออกแบบการแก้ไขปัญหาการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นให้กับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ และแบบจำลองสำหรับการป้องกันโครงข่ายเมื่อหนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหายสำหรับโครงข่าย WDM ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 โดยมีวัตถุประสงค์ของการสร้างแบบจำลองคือ เพื่อใช้ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกที่เกิดขึ้นทั้งหมดได้ ทั้งในกรณีที่ทุกโนดในโครงข่ายมีและไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์แปลงผันความยาวคลื่น โดยอาศัย Integer Linear Programming (ILP) เป็นเทคนิคในการสร้างแบบจำลองซึ่งมีรายละเอียดที่สำคัญดังนี้

ก.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่โครงข่ายต้องการ

พารามิเตอร์ และ ตัวแปรสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
N	จำนวนโนดทั้งหมดในโครงข่าย
L	จำนวนข่ายเชื่อมโยงที่พิจารณาทั้งหมดในโครงข่าย
$K = \|R\|$	จำนวนมัลติคาสต์เซสชัน
$r_k(s_k, D_k)$	มัลติคาสต์เซสชันที่ r_k โดยมีโนดต้นทางคือ s_k และมีชุดโนดปลายทางคือ ชุด D_k
t_{r_k}	ปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k
Δ	จำนวนสัญญาณที่มากที่สุดที่อนุญาตให้ออกจากตัวแยกสัญญาณได้ (fanout)
M	จำนวนความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถมัลติเพลกซ์ลงบนเส้นใยนำแสงได้
$\delta_{ij,p}^{r_k}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อเส้นทางที่ p ของชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ผ่านข่ายเชื่อมโยง ij ถ้าไม่ผ่านจะมีค่าเป็น 0
P_{sd}	ชุดของเส้นทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดของคู่โนดที่ sd
I_∞	ค่าคงที่จำนวนเต็มที่มีค่ามาก

ตัวแปร	คำอธิบาย
f_{ij}	จำนวนเส้นใยนำแสงที่ต้องจัดสรรให้แก่ข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij
$x_{r_k}^{ij}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อกิ่งเชิงแสงที่ใช้ส่งข้อมูลจากโนด i ไปยังโนด j ถูกนำมาใช้เป็นโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงสำหรับมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ถ้าไม่ถูกใช้จะมีค่าเป็น 0

ตัวแปร	คำอธิบาย
$a^{sd}_{r_k,p}$	เส้นทางทางกายภาพ (physical route) ลำดับที่ p ของคู่โนดที่ sd สำหรับชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k (กรณี VLT)
$a^{sd}_{r_k,p,\lambda}$	เส้นทางทางกายภาพลำดับที่ p ของคู่โนดที่ sd สำหรับชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ (กรณี LT)
$W_{r_k,\lambda}$	มีค่าเป็น 1 เมื่อค่าความยาวคลื่น λ ถูกเลือกเพื่อใช้ส่งข้อมูลสำหรับมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ถ้าไม่ถูกเลือกจะมีค่าเป็น 0 (กรณี LT)

พารามิเตอร์ และ ตัวแปรเพิ่มเติมสำหรับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กรณีโครงข่ายได้รับความเสียหาย

พารามิเตอร์	คำอธิบาย
Q	ชุดของวงแหวนที่เป็นไปได้ทั้งหมดในโครงข่าย
n_q	จำนวนข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพทั้งหมดของวงแหวน $q \in Q$
π^{ij}_q	มีค่าเป็น 1 เมื่อวงแหวน q ผ่านข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij ของโครงข่าย ถ้าไม่ใช่จะมีค่าเป็น 0

ตัวแปร	คำอธิบาย
s_{ij}	จำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่ต้องจัดสรรให้แก่ข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij
$b^{ij}_{r_k,q}$	จำนวนช่องสัญญาณทำงานของวงแหวน q ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij สำหรับชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k (กรณี VLT)
$b^{ij}_{r_k,q,\lambda}$	จำนวนช่องสัญญาณทำงานของวงแหวน q ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij สำหรับชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ (กรณี LT)
$Sw^{q}_{r_k,ij}$	จำนวนช่องสัญญาณสำรองของวงแหวน q ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij สำหรับชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งข่ายเชื่อมโยง (กรณี VLT)
$Sw^{q}_{r_k,ij,\lambda}$	จำนวนช่องสัญญาณสำรองของวงแหวน q ที่ผ่านข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพ ij สำหรับชุดเส้นทางจากมัลติคาสต์เซสชันที่ r_k เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นหนึ่งข่ายเชื่อมโยง ซึ่งใช้ค่าความยาวคลื่น λ (กรณี LT)

ก.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการสร้างโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง

ในการหาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะที่สุด (optimal light-tree) T_k เพื่อรองรับมัลติคาสต์เซสชันที่ $r_k(s_k, D_k)$ นั้น จะต้องแทนที่โครงข่าย WDM ที่พิจารณาด้วยกราฟแบบไม่แสดงทิศทาง $G_k = (N_k, A_k)$ โดยชุดของโนด N_k จะประกอบไปด้วยโนดต้นทาง s_k และชุดของโนดปลายทาง D_k แสดงได้ดังสมการ $N_k = \{ i \in N_k | i \in D_k \vee i = s_k \}$ รวมทั้งสิ้นจำนวน N_k โนด, และชุดของเส้นเชื่อมเชิงตรรกะ (logical arcs) A_k ซึ่งแสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $A_k = \{ ij \in A_k | i, j \in N_k \wedge i \neq j \}$ แล้วเปลี่ยนกราฟแบบไม่แสดงทิศทาง G_k ที่ได้ให้เป็นโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะที่สุด T_k โดยโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องประกอบด้วยกิ่งเชิงแสงจำนวน $|N_k|-1$ กิ่ง ดังนั้น สามารถแสดงเงื่อนไขบังคับ 2 ข้อแรกได้ดังนี้

$$\sum_{ij \in A_k} x_{r_k}^{ij} = |N_k| - 1, \qquad \forall r_k \in R \tag{ก.1}$$

$$x_{r_k}^{ij} \in \{0,1\}, \qquad \forall ij \in A_k, \forall r_k \in R \tag{ก.2}$$

เมื่อพิจารณาเส้นเชื่อมขาออกของแต่ละโนด จะพบว่าจำนวนเส้นเชื่อมขาออกของแต่ละโนดจะถูกจำกัดด้วยอุปกรณ์แยกสัญญาณทางแสงที่สามารถแยกสัญญาณแสงออกเป็นสัญญาณขนาดย่อยได้จำนวนเท่ากับ Δ ดังนั้น สามารถแสดงเงื่อนไขบังคับสมการที่ ก.3 ได้ดังนี้

$$\sum_{j:ij \in A_k} x_{r_k}^{ij} \leq \Delta, \qquad \forall i \in N_k, \forall r_k \in R \tag{ก.3}$$

และเพื่อเป็นการรับประกันว่าทุกโนดที่เป็นสมาชิกของกลุ่มมัลติคาสต์สามารถเชื่อมต่อถึงกันได้ และโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องไม่มีลักษณะเป็นวงปิด เงื่อนไขบังคับสมการที่ ก.4 สามารถแสดงได้ดังนี้

$$\sum_{ij \in \vartheta(S)} x_{r_k}^{ij} \geq 1, \qquad \forall S \subset N_k, S \neq \phi, N, \forall r_k \in R \tag{ก.4}$$

เมื่อ S คือเซตย่อย (subset) ของ N_k และ $\vartheta(S)$ คือ เซตตัด (cut-set) ของเซตย่อย S โดยสามารถแสดงในรูปทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้ $\vartheta(S) = \{ ij \in A_k | i \in S, j \notin S \}$

ก.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติ

ในการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นให้กับโครงข่ายที่รองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ในสภาวะทำงานปกติ จะเป็นการจัดสรรความจุใช้งานเพื่อรองรับเส้นทางที่เป็นวิถีทำงานให้กับโครงข่าย โดยสามารถใช้เทคนิค ILP ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

ก.4.1 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเสมือน (Virtual Light-Tree method, VLT)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \tag{ก.5}$$

และมีเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) - (ก.4) และ

$$\sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k,p}^{sd} = t_{r_k} \times x_{r_k}^{sd}, \qquad \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \tag{ก.6}$$

$$M \times f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k,p}^{sd} \delta_{ij,p}^{sd} \geq 0, \quad \forall ij \in L \tag{ก.7}$$

$$a_{r_k,p}^{sd} \in Z^{+}, \qquad \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \tag{ก.8}$$

$$f_{ij} \in Z^{+}, \qquad \forall ij \in L \tag{ก.9}$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นวิธี VLT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (ก.5) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) - (ก.4) และ (ก.6) - (ก.9) ซึ่งเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) - (ก.4) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้หาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะที่สุด เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.6) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงทุกกิ่งของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.7) เป็นเงื่อนไขของปัญหาที่ใช้บังคับให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.8) และ (ก.9) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้มีค่าเป็นจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

ก.4.2 วิธีโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง (Light-Tree method, LT)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} f_{ij} \qquad \text{(ก.10)}$$

และมีเงื่อนไขบังคับสมการที่ (ก.1) - (ก.4) และ

$$\sum_{p \in P_{r_k}} \sum_{\lambda=1}^{M} a_{r_k,p,\lambda} = t_{r_k} \times x_{r_k}^{sd}, \qquad \forall sd \in V_k, \forall r_k \in R \qquad \text{(ก.11)}$$

$$f_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a_{r_k,p,\lambda}^{sd} \delta_{ij,p}^{sd} \geq 0, \quad \forall \lambda = \{1,2,\ldots,M\}, \forall ij \in L \qquad \text{(ก.12)}$$

$$\sum_{\lambda=1}^{M} W_{r_k,\lambda} = t_{r_k}, \qquad \forall r_k \in R \qquad \text{(ก.13)}$$

$$a_{r_k,p,\lambda}^{sd} \leq I_{\infty} \times W_{r_k,\lambda}, \quad \forall \lambda = \{1,2,\ldots,M\}, \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \qquad \text{(ก.14)}$$

$$W_{r_k,\lambda} \in \{0,1\}, \qquad \forall \lambda = \{1,2,\ldots,M\}, \forall r_k \in R \qquad \text{(ก.15)}$$

$$a_{r_k,p,\lambda}^{sd} \in Z^{+}, \qquad \forall \lambda = \{1,2,\ldots,M\}, \forall p \in P_{sd}, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \qquad \text{(ก.16)}$$

$$f_{ij} \in Z^{+}, \qquad \forall ij \in L \qquad \text{(ก.17)}$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นวิธี LT แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (ก.10) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) – (ก.4) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ใช้หาโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงที่เหมาะที่สุด เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.11) เป็นเงื่อนไขบังคับที่ให้กิ่งเชิงแสงของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงจะต้องมีเส้นทางทางกายภาพรองรับ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.12) เป็นเงื่อนไขของปัญหาที่ใช้บังคับให้ความจุช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทุกข่ายเชื่อมโยงสามารถรองรับปริมาณทราฟฟิกทั้งหมดที่เกิดขึ้นได้ เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.13) จะกำหนดให้แต่ละมัลติคาสต์เซสชันเลือกความยาวคลื่นได้เพียงค่าเดียว และความยาวคลื่นนั้นจะถูกกำหนดให้กับเส้นทางทางกายภาพที่เลือกจากเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก. 11) ซึ่งแสดงได้ดังเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.14) ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.15) – (ก.17) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้มีค่าเป็นตัวแปรแบบบูล (boolean variable) และจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

ก.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบโครงข่ายกรณีโครงข่ายได้รับความเสียหาย

เมื่อเกิดความเสียหายขึ้นในโครงข่าย ทราฟฟิกในโครงข่ายจะถูกจัดสรรเส้นทางใหม่เพื่อแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น โดยสามารถแสดงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการจัดสรรเส้นทางใหม่วิธีต่าง ๆ ดังนี้

ก.5.1 กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF (Physical Branch Fixed)

กรณี VLT

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} s_{ij} \tag{ก.18}$$

และมีเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) - (ก.4) , (ก.6) - (ก.8) และ

$$\sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a^{sd}_{r_k,p} \delta^{sd}_{ij,p} = \sum_{q \in Q} b^{ij}_{r_k,q} \pi^{ij}_{q} \qquad \forall r_k \in R, \forall ij \in L \tag{ก.19}$$

$$(Sw^{q}_{r_k,ij} + b^{ij}_{r_k,q})\pi^{ij}_{q} \geq b^{ij'}_{r_k,q} \pi^{ij'}_{q} \qquad \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \tag{ก.20}$$

$$M \times s_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{q \in Q} Sw^{q}_{r_k,ij} \pi^{ij}_{q} \geq 0 \qquad \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \tag{ก.21}$$

$$b^{ij}_{r_k,q} \in Z^{+} \qquad \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \forall ij \in L \tag{ก.22}$$

$$Sw^{q}_{r_k,ij} \in Z^{+} \qquad \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \tag{ก.23}$$

$$s_{ij} \in Z^{+} \qquad \forall ij \in L \tag{ก.24}$$

จุดประสงค์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการจัดสรรเส้นทางและกำหนดความยาวคลื่นสำหรับการป้องกันโครงข่ายแบบ PBF แสดงได้ดังฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (ก.18) คือ เพื่อหาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.1) – (ก.4) และ (ก.6) ที่ใช้คำนวณหาวิถีทำงานของแต่ละมัลติคาสต์เซสชันในโครงข่าย ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.19) แสดงวิถีทำงานในสภาวะปกติของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสง r_k ซึ่งช่องสัญญาณของวงแหวน q ถูกกำหนดให้ครอบคลุมข่ายเชื่อมโยง ij ในระหว่างที่หนึ่งข่ายเชื่อมโยงได้รับความเสียหาย เงื่อนไขบังคับที่ (ก.20) ถูกนำมาใช้คำนวณหาช่องสัญญาณสำรองในแต่ละข่ายเชื่อมโยงของวงแหวน q โดยจำนวนช่องสัญญาณสำรองต้องมีจำนวนมากพอที่จะรองรับวิถีทำงานสำหรับการเกิดความ

เสียหายใด ๆ ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.20) และ (ก.21) ใช้คำนวณหาเส้นใยนำแสงสำรองที่ต้องการสำหรับวิถีบูรณะ ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.22) – (ก.24) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้มีค่าจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

<u>กรณี LT</u>

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} s_{ij} \qquad \text{(ก.25)}$$

และมีเงื่อนไขบังคับสมการที่ (ก.1) - (ก.4), (ก.11), (ก.12), (ก.14) และ

$$\sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a^{sd}_{r_k,p,\lambda} \delta^{sd}_{ij,p,\lambda} = \sum_{q \in Q} b^{ij}_{r_k,q,\lambda} \pi^{ij}_{q} \qquad \forall \lambda = \{1,2,...,M\}, \forall r_k \in R, \forall ij \in L \qquad \text{(ก.26)}$$

$$(Sw^{q,ij'}_{r_k,ij,\lambda} + b^{ij}_{r_k,q,\lambda})\pi^{ij}_{q} \geq b^{ij'}_{r_k,q,\lambda} \pi^{ij'}_{q} \qquad \forall \lambda = \{1,2,...,M\}, \forall r_k \in R, \forall q \in Q,$$

$$\forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \qquad \text{(ก.27)}$$

$$s_{ij} - \sum_{r_k \in R} \sum_{q \in Q} Sw^{q,ij'}_{r_k,ij,\lambda} \pi^{ij}_{q} \geq 0 \qquad \forall \lambda = \{1,2,...,M\}, \forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \qquad \text{(ก.28)}$$

$$\sum_{\lambda=1}^{M} W_{r_k,\lambda} = t_{r_k} \qquad \forall r_k \in R \qquad \text{(ก.29)}$$

$$b^{ij}_{r_k,q,\lambda} \leq I_{\infty} \times W_{r_k,\lambda} \qquad \forall \lambda = \{1,2,...,M\}, \forall q \in Q, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \qquad \text{(ก.30)}$$

$$W_{r_k,\lambda} \in \{0,1\}, \qquad \forall \lambda = \{1,2,\ldots,M\}, \forall r_k \in R \qquad \text{(ก.31)}$$

$$b^{ij}_{r_k,q,\lambda} \in Z^{+} \qquad \forall \lambda = \{1,2,\ldots,M\}, \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \forall ij \in L \qquad \text{(ก.32)}$$

$$Sw^{q,ij'}_{r_k,ij,\lambda} \in Z^{+} \qquad \forall \lambda = \{1,2,...,M\}, \forall r_k \in R, \forall q \in Q,$$

$$\forall ij \in L - \{ij'\}, \forall ij' \in L \qquad \text{(ก.33)}$$

$$s_{ij} \in Z^{+} \qquad \forall ij \in L \qquad \text{(ก.34)}$$

ก.5.2 กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP (Optical Mesh Protection)

<u>กรณี VLT</u>

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} s_{ij} \qquad \text{(ก.35)}$$

และมีเงื่อนไขบังคับข้อ (ก.1) - (ก.4) , (ก.6) - (ก.8) และ

$$\sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a^{sd}_{r_k,p} \delta^{sd}_{ij,p} = \sum_{q \in Q} b^{ij}_{r_k,q} \pi^{ij}_{q} \qquad \forall r_k \in R, \forall ij \in L \qquad \text{(ก.36)}$$

$$Rw^{kl}_{r_k,ij} \pi^{kl}_{q} \geq b^{ij}_{r_k,q} \pi^{ij}_{q} \qquad \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \forall ij \in L - \{kl\}, \forall kl \in L \qquad \text{(ก.37)}$$

$$H^{ij}_{r_k} - \sum_{q \in Q} Rw^{ij}_{q} \pi^{ij}_{q} \geq 0 \qquad \forall r_k \in R, \forall ij \in L \qquad \text{(ก.38)}$$

$$M \times s_{ij} - \sum_{r_k \in R} H^{ij}_{r_k} \geq 0 \qquad \forall ij \in L \qquad \text{(ก.39)}$$

$$b^{ij}_{r_k,q}, Rw^{ij}_{q} \in Z^{+} \qquad \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \forall ij \in L \qquad \text{(ก.40)}$$

$$H^{ij}_{r_k} \in Z^{+} \qquad \forall r_k \in R, \forall ij \in L \qquad \text{(ก.41)}$$

$$s_{ij} \in Z^{+} \qquad \forall ij \in L \qquad \text{(ก.42)}$$

กลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ OMP มีลักษณะการใช้แนวคิดวงแหวนหลายวงเช่นเดียวกับกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF โดยโครงข่ายจะสำรองช่องสัญญาณเฉพาะ (dedicated) สำหรับแต่ละมัลติคาสต์เซสชันทั้งกรณีโครงข่ายทำงานในสภาวะปกติและกรณีเกิดความเสียหาย ดังนั้นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ข้อที่ (ก.35) คือ หาจำนวนเส้นใยนำแสงสำรองที่น้อยที่สุดที่ต้องจัดสรรให้แก่โครงข่ายเพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย โดยมีเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.1) – (ก.4) และ (ก.6) ที่ใช้คำนวณหาวิถีทำงานของแต่ละมัลติคาสต์เซสชันในโครงข่าย

เงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.36) เป็นการกำหนดช่องสัญญาณสำรองที่ครอบคลุมวิถีทำงานในสภาวะปกติของโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงเช่นเดียวกับเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.19) ของกลยุทธ์การป้องกันโครงข่ายแบบ PBF โดยจำนวนช่องสัญญาณของข่ายเชื่อมโยงทางกายภาพทั้งหมดของวงแหวน q เหมือนกับโครงสร้างต้นไม้เชิงแสงในวิถีทำงาน ดังนั้น การคำนวณหาช่องสัญญาณ Rw^{ij}_{q} ที่ข่ายเชื่อมโยง ij ต้องการของวงแหวน q เป็นไปตามเงื่อนไขบังคับที่ (ก.37) ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.38) ใช้คำนวณหาช่องสัญญาณ $H^{ij}_{r_k}$ ที่ข่ายเชื่อมโยง ij ต้องการสำหรับโครงสร้างเมชเชิงแสงของมัลติคาสต์เซสชัน r_k ส่วนเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.39) ใช้คำนวณหาจำนวนความต้องการใช้เส้นใยนำแสงของข่ายเชื่อมโยง ij เพื่อให้สามารถรองรับทราฟฟิกชนิดมัลติคาสต์ที่เกิดขึ้นในโครงข่าย และเงื่อนไขบังคับข้อที่ (ก.40) – (ก.42) เป็นเงื่อนไขของค่าตัวแปรโดยให้มีค่าจำนวนเต็มที่มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์

<u>กรณี LT</u>

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ

$$\min : \sum_{ij \in L} s_{ij} \qquad \text{(ก.43)}$$

และมีเงื่อนไขบังคับสมการที่ (ก.1) - (ก.4), (ก.11), (ก.12), (ก.14) และ

$$\sum_{sd} \sum_{p \in P_{sd}} a^{sd}_{r_k,p,\lambda} \delta^{sd}_{ij,p,\lambda} = \sum_{q \in Q} b^{ij}_{r_k,q,\lambda} \pi^{ij}_{q} \qquad \forall \lambda = \{1,2,...,M\}, \forall r_k \in R, \forall ij \in L \qquad \text{(ก.44)}$$

$$Rw^{kl}_{q,\lambda} \pi^{kl}_{q} \geq b^{ij}_{r_k,q,\lambda} \pi^{ij}_{q} \qquad \forall \lambda = \{1,2,...,M\}, \forall r_k \in R, \forall q \in Q,$$

$$\forall ij \in L - \{kl\}, \forall kl \in L \qquad \text{(ก.45)}$$

$$H^{ij}_{r_k,\lambda} - \sum_{q \in Q} Rw^{ij}_{q,\lambda} \pi^{ij}_{q} \geq 0 \qquad \forall \lambda = \{1,2,...,M\}, \forall r_k \in R, \forall ij \in L \qquad \text{(ก.46)}$$

$$s_{ij} - \sum_{r_k \in R} H^{ij}_{r_k,\lambda} \geq 0 \qquad \forall \lambda = \{1,2,...,M\}, \forall ij \in L \qquad \text{(ก.47)}$$

$$\sum_{\lambda=1}^{M} W_{r_k,\lambda} = t_{r_k} \qquad \forall r_k \in R \qquad \text{(ก.48)}$$

$$b^{ij}_{r_k,q,\lambda} \leq I_{\infty} \times W_{r_k,\lambda} \qquad \forall \lambda = \{1,2,...,M\}, \forall q \in Q, \forall sd \in A_k, \forall r_k \in R \qquad \text{(ก.49)}$$

$$W_{r_k,\lambda} \in \{0,1\}, \qquad \forall \lambda = \{1,2,\ldots,M\}, \forall r_k \in R \qquad \text{(ก.50)}$$

$$b^{ij}_{r_k,q,\lambda}, Rw^{ij}_{q,\lambda} \in Z^{+} \qquad \forall \lambda = \{1,2,\ldots,M\}, \forall r_k \in R, \forall q \in Q, \forall ij \in L \qquad \text{(ก.51)}$$

$$H^{ij}_{r_k,\lambda} \in Z^{+} \qquad \forall \lambda = \{1,2,...,M\}, \forall r_k \in R, \forall ij \in L \qquad \text{(ก.52)}$$

$$s_{ij} \in Z^{+} \qquad \forall ij \in L \qquad \text{(ก.53)}$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายอนุชิต มั่นจิรังกูร เกิดวันที่ 18 กรกฎาคม พ.ศ.2523 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปีการศึกษา 2542 สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2546