한국경영과학회/대한산업공학회 2003 춘계공동학술대회
2003 년 5 월 16 일-17 일 한동대학교(포항)

Mesh 구조의 WDM 통신망에서의 수요집적 및 광파장 경로 설정 문제

이순호
한국과학기술원 테크노경영대학원
서울 동대문구 청량리동 207-43
E-mail: iskra@kgsm.kaist.ac.kr

윤문길
한국항공대학교 경영학과
경기도 고양시 화전동 200-1
Email: mgyoon@mail.hangkong.ac.kr

차동완
한국과학기술원 테크노경영대학원
서울 동대문구 청량리동 207-43
E-mail: tchadw@sorak.kaist.ac.kr

Abstract

통신시스템의 발전과 더불어 WDM 전송기술의 등장은 미래의 다양한 광대역 서비스의 제공이 가능하게 되었다. 하지만, 개별 수요들이 요구하는 대역폭이 광파장의 대역폭에 비해 매우 작으므로, 개별 수요들을 다중화하여 하나의 광경로를 통해 전송하는 수요집적(traffic grooming)에 관한 연구들이 많은 관심을 받고 있다. 본 연구는 mesh 구조의 WDM 통신망에서의 수요집적 및 광경로 설정에 관한 문제를 다루고 있다. 주어진 네트워크 상에 하나의 가상노드와 아크를 추가하여 새로운 네트워크를 구성하고, 이를 대상으로 목적함수를 사용되는 광파장의 수를 최소화하는 혼합정수계획 모형을 수립하였다. 아울러, NP-Complete로 알려진 본 문제의 해를 효과적으로 구하기 위한 발견적 해법을 제안하며, 실제 다양한 실험을 통해 제안된 알고리즘의 효율성을 보인다.

1. 개요

정보통신의 기술의 발전과 더불어 다양한 광대역 서비스의 등장은 초고속 통신망에 대한 필요성을 더욱 가속화시키고 있다. 특히 다수의 광 파장을 통해 초당 수십 테라비트를 전송할 수 있는 파장 분할 다중화 (wavelength division multiplexing, WDM) 방식을 이용한 광전송시스템이 가장 주목을 받고 있다.

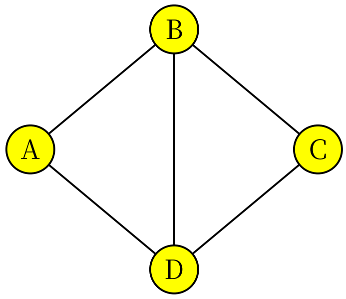
WDM 통신망에서 각 노드 사이의 트래픽 수요가 주어지면, 이러한 수요들을 전송하기 위해 상호배타적으로 광파장을 가지는 광경로(lightpath)를 설정해야 한다. 일반적으로 WDM 장비의 가격은 사용 가능한 광파장의 수에 의해 좌우되므로, 네트워크에서 요구되는 광파장의 수를 최소화하는 문제는 WDM 통신망 설계에서 전체 비용을 줄이는 측면에서 매우 중요한 의미를 가진다.

기존의 연구에서는 WDM 통신망에서의 전송지연을 최소화하는 문제 또는 소요되는

파장의 숫자를 최소화하는 문제 등 주어진 목적에 따라 다양한 유형의 연구가 수행되었다. 최근에는 저속의 트래픽 수요를 고속의 광파장에 효율적으로 적재하기 위한 수요집적(traffic grooming)에 관한 연구들이 많은 관심을 보이고 있다. [3, 9]

Zhang과 Acampora [15]는 광전송 수요가 주어진 경우의 광파장 재사용을 고려한 광경로의 선정 문제를 다루었다. 특히, 광파장의 재사용을 고려하여 동일한 광파장으로 연결되는 광전송 수요의 최대화를 목적으로 하였으며, 발견적 해법을 제시하였다. Rawaswami와 Sivarajan [11]은 WDM 통신망에서 논리적 네트워크 설계문제를 고려하여 각 링크에 할당되는 최대부하를 최소화하도록 광전송 수요의 경로설정문제를 포함하는 전체 설계문제를 다루었다. Mukherjee [10] 등은 주어진 전송수요에 대하여 일반적인 망 구조하에서 평균 전송지연을 최소화하는 광파장 경로설정 및 파장할당 문제를 비선형계획법으로 정식화하였다. 특히, 효과적으로 발견적 실행가능 해를 찾기 위하여 전체 문제를 4개의 부분문제로 분할하고, 발견적 해법을 이용하여 해결하는 방법을 적용하였다. 이러한 연구들은 일반적인 형태의 수요집적 문제가 NP-Complete하다는 것을 보여주고 있다. 최근에 Modiano [8]가 수요집적 문제에 대한 연구들을 개략적으로 정리하고, 현재 이슈가 되는 있는 부분들을 정리하였다. 수요집적 문제의 복잡성으로 인하여 대부분의 연구들은 최적해에 근접하는 결과를 얻기 위한 발견적 해법을 제안하고 있다.

수요집적 과정의 결과로 광경로의 집합이 주어지면 사용되는 광파장의 수를 최소화하기 위해 광경로의 라우팅을 결정하는 것도 매우 중요한 문제이다. 수요집적과 광파장 경로설정 문제는 하나의 단일한 의사결정과정을 통해 해결되어야 하지만 전체 문제의 복잡성으로 인하여 일반적으로 두 개의 부분문제로 분할하여 해결방안을 모색하고 있다. 본 연구에서는 mesh 구조의 WDM 통신망에서 수요집적과 광파장 경로설정 문제를 통합적으로 다루고 있다. 주어진 문제를 해결하기 위해 하나의 통합된 수학적 모형을 제시하고, 또한 이를 해결하기 위한 효율적인 발견적 해법을 제안하고 있다.



(a) Network topology

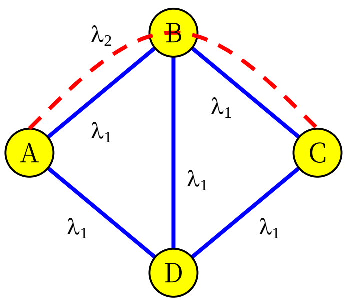
k	$o(k)$	$d(k)$	r_k
1	A	B	15
2	A	C	10
3	A	D	20
4	B	C	5
5	B	D	20
6	B	C	30

(b) Traffic demand

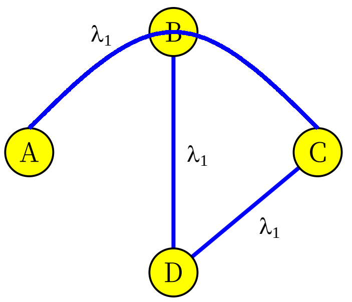
[그림 1] Mesh 형태의 WDM 통신망의 예제

본 연구에서 다루고 있는 문제를 좀더 명확하게 설명하기 위해 [그림 1]에서 보는 바와 같은 4개의 노드로 구성된 mesh 형태의 WDM 통신망을 살펴보자. [그림 1]의 (b)는 각 노드간에 주어진 광전송 수요량을 나타내고 있으며, k는 두 노드간의 전송수요을 나타내기 위한 commodity를 나타내고, $o(k)$와 $d(k)$는 commodity k의 출발지 노드와 목적지 노드를 의미한다. r_k는 $o(k)$와 $d(k)$ 사이에 전송될 트래픽 수요를 나타내며, 각 수요의 단위는 OC-1

단위로 주어진 것으로 가정한다. 또한, 주어진 WDM 통신망에서 사용되는 광파장의 용량은 OC-48로 가정한다. 만약 수요집적 과정을 거치지 않는 경우에는 [그림 2]의 (a)에서 보는 바와 같이 개별 전송수요에 대해서 하나의 광파장을 할당해야 하므로, 2개의 광파장과 6개의 광경로가 요구된다. 하지만, 수요집적 과정을 거치면 [그림 2]의 (b)에서 보는 바와 같이 단지 1개의 광파장과 3개의 광경로만을 필요로 한다. A-B, A-C, A-D 사이의 개별적인 3개의 전송수요들은 노드 A와 C를 연결하는 광경로를 통해 함께 전송된다. 따라서, A-B간의 트래픽 수요를 전송하기 위해 노드 A와 B 사이에 직접 광경로를 설정할 필요가 없으며, 광경로 A-C, 광경로 C-D, 광경로 B-D를 경유하는 가상의 경로를 통해 전송이 가능함을 알 수 있다.



(a) Without traffic grooming



(a) With traffic grooming

[그림 2] Mesh 형태의 WDM 통신망에서 수요집적 및 광파장 경로 설정 예제

본 연구에서는 교환 노드간의 전송수요가 OC-1 단위로 주어진 경우, WDM 통신망에서 최소의 광파장을 이용하여 전체 트래픽 수요를 전송하기 위하여 각 전송수요를 합치고, 선정된 광경로의 최적 경로설정을 다룬다. WDM 망 형태는 제약이 없는 mesh형으로 가정하고, 전송수요는 두 개 이상의 경로를 이용할 수 있도록 수요분할을 허용하는 것으로 가정한다. 2장에서는 본 연구에서 다루는 문제에 대한 수리적 모델을 정형화하는 과정을 설명하고, 3장에서는 이 문제를 좀더 효율적으로 해결하기 위한 발견적 해법에 대해 설명한다. 최적화 모형 및 발견적 해법에 대하여 간략한 예제와 임의의 자료를 대상으로 하는 실험결과 및 분석을 4장에서 제시하고, 본 연구결과에 대한 의의 및 적용가능성과 향후 연구방향에 대하여 5장에서 논의한다.

2. 최적화 모형

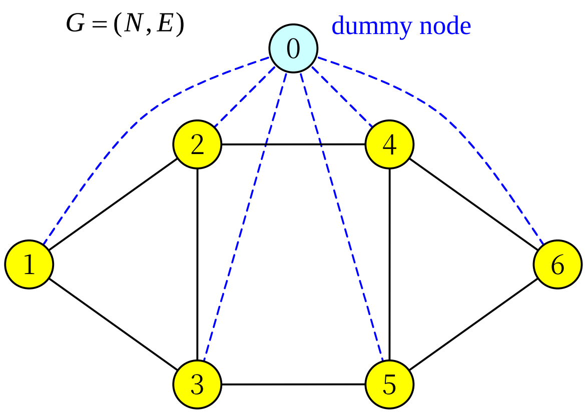
주어진 전송수요에 따른 Mesh 형태의 WDM 통신망 설계문제는 혼합 정수계획법 문제로 수학적 모델을 수립하여 해결할 수 있으며, 다음과 같은 제약식들이 고려되어야 한다. (1) 각 광경로상에서 흐름보존제약이 고려되어야 하며, 개별 트래픽 수요들상의 흐름보존제약도 함께 고려되어야 한다. (2) 개별 광경로상에서 경유되는 노드로 들어오는 수요가 이용하는 광파장과 나가는 부분에서 이용되는 광파장이 동일해야 한다는 파장연속제약이 요구된다. (3) 마지막으로 각 광파장의 용량에 대한 제약을 고려해야 한다.

네트워크가 $G_O=(N_O, E_O)$로 주어지고, 전송수요의 집합 K가 주어지면, 먼저 dummy 노드 (0)를 추가하고, 이 노드와 나머지 모든 노드들 사이에 dummy 아크를 추가한다. [그림 3]

에서 보는 바와 같이 이렇게 dummy 노드와 아크를 추가하여 새로운 네트워크 $G=(N, E)$를 가지고서 문제를 좀더 쉽게 해결할 수 있다.

- $N = N_O \cup \{0\}$
- $E = E_O \cup \{\{i,0\}, i \in N_O\}$

또한, L을 광경로들의 집합이라고 두면, $o_l(l)$과 $d_l(l)$은 광경로 l의 시작노드와 도착노드를 의미한다.



[그림 3] 확장된 네트워크의 예

앞서 언급한 제약식들을 고려하여 mesh 형태의 WDM 통신망에서 요구되는 광파장의 수를 최소화하도록 최적화 모형을 수립하면 다음과 같다.

- w : mesh 형 WDM 통신망에서 요구되는 광파장의 수,
- z_{ij}^l : 링크 $\{i, j\}$상에서 광파장의 설치유무를 나타내는 0,1 변수,
- x_{ij}^{kl} : 링크 $\{i, j\}$상에서 광파장 l을 이용한 수요 k의 처리비율,
- Q_l: 광파장 l의 전송 용량.

(P) Minimize w (1)

subject to

$$\sum_{l=1}^{L}(z_{ij}^l + z_{ji}^l) \le w \text{ for all } \{i,j\} \in E, \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N} z_{ij}^l - \sum_{j \in N} z_{ji}^l = \begin{cases} 1, & \text{if } i = o_l(l), \\ -1, & \text{if } i = d_l(l), \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$
$$\text{for all } \{i,j\} \in E,\ i \in N_0,\ l \in L, \quad (3)$$

$$\sum_{l \in L(i)} \sum_{j \in N_0} x_{ij}^{kl} - \sum_{l \in L(i)} \sum_{j \in N_0} x_{ji}^{kl} = \begin{cases} 1, & \text{if } i = o(k), \\ -1, & \text{if } i = d(k), \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$
$$\text{for all } \{i,j\} \in E,\ i \in N_0,\ k \in K, \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N_0} x_{ij}^{kl} - \sum_{j \in N_0} x_{ji}^{kl} = 0,$$
$$\text{if } i \ne o_l(k), i \ne d_l(k),$$
$$\text{for all } \{i,j\} \in E,\ l \in L, k \in K, i \in N_0, \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} r_k (x_{ij}^{kl} + x_{ji}^{kl}) \le Q_l (z_{ij}^l + z_{ji}^l)$$
$$\text{for all } \{i,j\} \in E,\ l \in L, \quad (6)$$

$$z_{ij}^l + z_{ji}^l \le 1 \text{ for all } \{i,j\} \in E,\ l \in L, \quad (7)$$

$$x_{ij}^{kl} \ge 0 \text{ for all } (i,j) \in A,\ l \in L,\ k \in K \quad (8)$$

$$z_{ij}^l \in \{0,1\} \text{ for all } \{i,j\} \in E,\ l \in L, \quad (9)$$
$$w \ge 0 \text{ and integer.} \quad (10)$$

목적함수는 WDM 통신망에 설치되는 광파장의 수를 최소화하는 것이다. 제약식 (2)는 네트워크의 각 링크에 사용되는 광파장의 수에 대한 제약을 나타내고 있다. (3)은 각 광파장의 설치를 보장하기 위한 흐름보전제약식이며, 제약식 (4)와 (5)는 각 commodity의 수요를 충족하기 위한 흐름보전 제약식을 나타내고 있다. 제약식 (6)은 광파장이 설치된 광경로를 통해 k의 수요가 전송될 수 있으며, 수요량은 Q_l을 초과할 수 없다는 것을 의미한다. (7)은 광파장의 설정시에 양방향 중에서 하나의 방향으로만 설정되도록 하는 제약식이다.

3. 발견적 해법

앞서 제시한 수학적 모형 *[P]*는 혼합정수계획 모형으로 수요집적 문제와 광파장 경로설정 문제가 통합된 매우 복잡한 문제이다. 이미 수요집적 문제가 NP-Complete로 알려져 있으므로, *[P]*에 대해서는 최적해법의 개발보다는 빠른 계산시간 내에 해를 찾을 수 있는 발견적 해법의 개발이 효과적이다. 본 절에서는 *[P]*에 대한 효과적인 발견적 해법을 제시하고자 한다.

본 연구에서 제시하는 해법은 크게 두 부분으로 구성된다. 첫 번째 과정은 모든 commodity에 대해 하나의 광경로를 통해 전송할 수 있는 광전송 용량 범위 내로 수요를 집적시키는 과정이며, 이를 통해 설치되는 광경로의 수를 가능한 최소로 줄이도록 한다. 두 번째 과정은 설치될 광경로가 결정되면, 실제 mesh 네트워크 상에 광경로를 결정하는 과정이다. 이때는 각 링크에 서로 다른 광파장이 할당되도록 하고 필요로 하는 최대 광파장의 수가 최소가 되도록 경로를 설정한다.

각 commodity *k*의 수요가 광경로 *l*에 할당되는 양을 s_k^l 라고 하면, 주어진 네트워크 *G*=(*N*, *E*) 상에서 각 링크들의 이용률을 다음과 같이 계산할 수 있다: $\rho_l = \sum_{k \in K(l)} s_k^l / Q_l$ where Q_l is traffic capacity limit of lightpath *l*. 따라서, 광경로의 집합 *L* 상에서 이용률이 가장 작은 링크 l^*을 선택하고, l^*을 이용하는 광경로 상의 수요를 다른 광경로를 통해 서비스할 수 있는지를 검토한다. 수요집적을 위한 자세한 알고리즘은 다음과 같다.

Algorithm TG

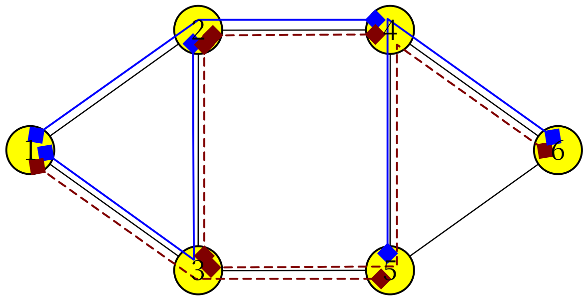
begin
  /* given set of commodities *K* and set of lightpaths *L*, initialize traffic demand s_k^l and set of commodities *K*(*l*) */
  for all commodity $k \in K$ and lightpath $l \in L$ do
    if commodity *k* can be serviced on lightpath *l*
    then $s_k^l = \gamma_k$ and $K(l) = \{k\}$;
  end
  while set *L* is not empty do
    calculate the utilization of each lightpath ρ_l;
    select lightpath l^* having a minimum utilization in *L*;
    for all commodity $k \in K(l^*)$ do
      /* calculate available capacity Δ_k */
      find set of alternate paths *AP(k)*;
    for all path $P \in AP(k)$ do
      calculate the available capacity of each path Δ_k^P;
      select path P^* having a maximum available capacity Δ_k in *AP(k)*;
    end;
    /* adjust traffic demands s_k^l and set of lightpaths *L* */
    $s_k^{l^*} = s_k^{l^*} - \min\{\Delta_k, s_k^{l^*}\}$;
    $s_k^l = s_k^l + \min\{\Delta_k, s_k^{l^*}\}$ for all lightpath $l \in P^*$;
    if $\rho_{l^*} = 0$ or *PA*(*k*) is empty
    then delete l^* from *L*;
  end;
 end;
end.

수요집적 과정을 마치면, 주어진 광경로의 집합 *L*로부터 실제 전송 수요를 서비스하는 광경로의 집합 *T*를 다음과 같이 구할 수 있다: $T = \{l : s_k^l > 0, k \in K\}$. 집합 *T*상의 광경로에는 하나의 광파장이 할당된다. 일단 링크상에 하나의 광파장이 할당되면 routing weight를 주어, 다음 광파장의 경로설정과정에서 핸디캡을 가지도록 한다. 광경로설정 및 광파장할당을 위한 자세한 알고리즘은 다음과 같다.

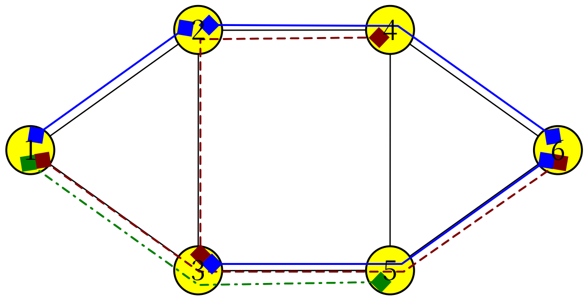
Algorithm LRWA

begin

/* initialize weight of each edge $\{i,j\}$ */
$c(i,j) = \delta$ and $w(i,j) = 0$
for all edge $\{i,j\} \in E$;
for all lightpath $l \in T$ do
find set of candidate routing paths $RP(l)$;
calculate the weight of candidate routing path $P \in RP(l)$;
select routing path P^+ having a minimum weight κ_l in $RP(l)$;
/* adjust the weight and the number of wavelength in each edge */
for all edge $\{i,j\} \in P^+$ do
$c(i,j) = c(i,j) + \delta \cdot n^k$
where $n = |N|$ and $k = w(i,j)$;
$w(i,j) = w(i,j) + 1$
for all $\{i,j\} \in P^+$
end;
end;
end.



(a) A result using optimization model



(b) A result using heuristic algorithm

[그림 4] 최적해와 발견적 해법의 비교

4. 실험결과 및 분석

본 연구에서 제시된 최적화모형을 이용한 최적해는 상용프로그램인 CPLEX를 이용하고, 발견적 해법은 C 프로그램으로 작성하였다. 주어진 네트워크의 형태 및 수요의 유형에 따라 사용되는 광파장의 수와 광경로의 수 및 계산시간을 비교하기로 한다. 수요는 OC-1 단위로 주어지며, 각 광파장의 전송 용량은 동일한 것으로 가정한다. 본 연구에서 고려하는 문제의 유용성을 살펴보기 위해 수요집적을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 최소 광파장수를 고려하였다.

규모가 작은 네트워크에서는 최적해와 발견적 해법을 통한 해의 차이가 크지 않으나, 네트워크의 크기가 커짐에 따라 발견적 해법을 통한 해가 최적해와 차이가 있음을 알 수 있다. 먼저 노드 6개로 이루어진 작은 규모의 mesh 형태의 WDM 통신망에서의 예를 살펴보면, [그림 4]와 같다.

본 연구에서 제시된 발견적 해법에 의해 구해진 해가 최적해에 비하여 소요되는 광파장의 수를 다소 많이 요구하고 있지만, 계산시간을 살펴보면 매우 효과적인 것을 알 수 있다. 하지만, 네트워크의 규모가 커지면 CPLEX를 이용하여 최적해를 구하는 것이 불가능함을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 발견적 해법에서 제시된 해가 최적해와 다소 차이가 있더라도 짧은 계산시간 내에 좋은 실행가능해를 제시하는 것으로 판단할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 mesh 형태의 WDM 통신망에서의 수요집적과 광파장 경로설정 문제를 통합적으로 다루고 있다. 우리는 혼합 정수계획

법을 이용하여 수학적 모델을 수립하였으며, 문제의 복잡성으로 인하여 대규모의 WDM 통신망 설계 문제의 실행가능해를 구하기 위해 발견적 해법을 제시하였다.

일반적으로 개별 수요들의 분포가 광파장의 용량보다 매우 작은 경우에 수요집적의 효과가 크게 나타나며, 네트워크의 구조가 밀접한 형태에서 수요집적의 효과가 비교적 크다는 사실을 실험을 통해 알 수 있었다. 또한 개별수요들의 분포가 광파장의 용량에 비해 매우 작은 경우를 제외한 일반적인 경우에는 발견적 해법의 해가 최적해와 비슷하게 나타나는 것으로 실험결과에서 보여주고 있다.

본 연구에서 제시한 발견적 해법이 빠른 계산시간 내에 효과적인 실행가능해를 제시하므로, WDM 통신망의 설계과정에서 이용될 수 있을 뿐만 아니라 망 운영과정에서도 효과적으로 이용 가능할 것으로 기대된다. 앞으로 광경로 사이의 전광 변환의 오버헤드를 고려하여 가상의 전송경로 설립을 위해 이용되는 광경로의 수에 제약을 두는 문제와 전체 트래픽 수요를 서비스하기 위한 광경로의 수를 최소화하는 문제 등도 함께 고려되어야 할 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] S. Baroni and P. Bayvel, “Wavelength requirements in arbitrarily connected wavelength-routed optical networks,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, pp 242-251, 1997.

[2] A. L. Chiu and E. H. Modiano, “Traffic grooming algorithms for reducing electronic multiplexing costs in WDM ring networks,” *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 18, pp 2-12, 2002.

[3] R. Dutta and G. N. Rouskas, “Traffic grooming in WDM networks: past and future,” *IEEE Networks*, Vol. 16, pp 46-56, 2002.

[4] O. Gerstel, R. Ramaswami and G. Sasaki, “Cost effective traffic grooming in WDM rings,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 8, pp 618-630, 2000.

[5] K. Zhu and B. Mukherjee, “Traffic grooming in an optical WDM mesh network,” *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*,” Vol. 20, pp 122-133, 2002.

[6] Y. Miyao and H. Saito, “Optimal design and evaluation of survivable WDM Transport Networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 16, pp 1190-1198, 1998.

[7] E. Modiano and R. Barry, “Architectural considerations in the design of WDM-based optical access networks,” *Computer Networks*, Vol. 31, pp 327-341, 1999.

[8] E. Modiano, “Traffic grooming in WDM networks,” *IEEE Communications Magazine*, pp 124-129, July 2001.

[9] B. Mukherjee, “WDM optical communication networks: progress and challenges,” *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, Vol. 18, pp 1810-1824, 2000.

[10] B. Mukherjee, D. Banerjee, S. Ramamurthy and A. Mukherjee, “Some principles for designing a wide-area WDM optical network,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 4, pp 684-673, 1996.

[11] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, “Design of logical topologies for wavelength-routed optical networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 14, pp 840-851, 1996.

[12] J. M. Simons, E. L. Goldstein, and A. A. M. Saleh, “On the value of wavelength-add/drop in WDM rings with uniform traffic,” *Proceedings of OFC'98*, San Jose, CA, pp 361-362, March 1998.

[13] J. Wang, V. R. Vemuri, W. Cho and B. Mukherjee, "Improved approaches for cost-effective traffic grooming in WDM ring networks: Non-uniform traffic and bi-directional ring," *Proceedings of ICC2000*, pp. 1295-1299, 2002.

[14] M. G. Yoon, "Traffic grooming and light-path routing in WDM ring networks with hop count constraint," *Proceedings of ICC2001*, Vol. 3, pp 731-737, 2001.

[15] Z. Zhang and S. Acampora, "A heuristic wavelength assignment algorithm for multihop WDM networks with wavelength routing and wavelength re-use," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 3, pp 281-288, 1995.