

양방향 WDM 광통신망

Bidirectional WDM networks

이창희, 신정훈, 김현덕
 한국과학기술원 전자전산학과
 chl@ee.kaist.ac.kr

I. 서론

최근 양방향 전송에 기반을 둔 양방향 파장 분할 다중 방식(WDM: wavelength division multiplexing) 광통신망⁽¹⁻³⁾이 제안되고 있다. 양방향 파장 분할 다중 방식 광통신망은 광섬유의 수나 광증폭기의 수 등 경제적 비용을 경감할 수 있고 비선형 현상을 줄일 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 이러한 양방향 광통신망에서는 Rayleigh 역산란이나 다중 광반사, 각종 소자의 누화에 의한 상대 강도 잡음(RIN: relative intensity noise)에 의해 시스템의 성능과 통신망의 확장성이 심각하게 저하될 수 있다⁽⁴⁾. 따라서 상대 강도 잡음을 억제하면서도 양방향 광통신망의 장점을 살릴 수 있는 광증폭기 및 애드/드롭 모듈의 설계가 필수적이다.

II. 양방향 애드/드롭 광증폭기

그림 1은 하나의 광섬유를 통해 양방향 광통신을 가능케 하는 양방향 애드/드롭 다중화기(B-ADM: bidirectional add/drop multiplexer)의 구조이다. 그림의 B-ADM 모듈은 단지 하나의 $N \times N$ WDM 다중화기를 폴드백(fold-back) 형태로 연결함으로써 양방향 WDM 신호를 애드/드롭할 수 있도록 구성하였다⁽³⁾. 실험에서는 200 GHz의 채널 간격과 6 dB의 삽입 손실을 갖는 8×8 도파열 격자(AWG: arrayed-waveguide grating)를 이용하였다. 이처럼 8×8 도파열 격자를 이용하는 경우 각 방향으로 세 개씩 서로 다른 파장의 신호를 전송할 수 있다. 각 방향으로 진행되는 WDM 신호들은 4번 단자에서 역다중화된 후 해당 노드에서 수신되어야 할 신호만 드롭되고 나머지 신호는 광증폭기 모듈을 통과한다. 또한, 드롭된 신호와 같은 파장의 신호를 광증폭기 모듈에 애드할 수도 있다. 이와 같이 애드되거나 통과하는 신호는 폴드백(fold-back) 형태로 연결된 후 8번 단자에서 다중화된다. 이와 같이 다중화된 신호들은 광 대역통과 필터(OBPF 1은 하향 신호용, OBPF 2는 상향 신호용)에 입력되어 역방향으로 진행되는 신호들을 억제함으로써 상대 강도 잡음이 발생하는 것을 막는다.

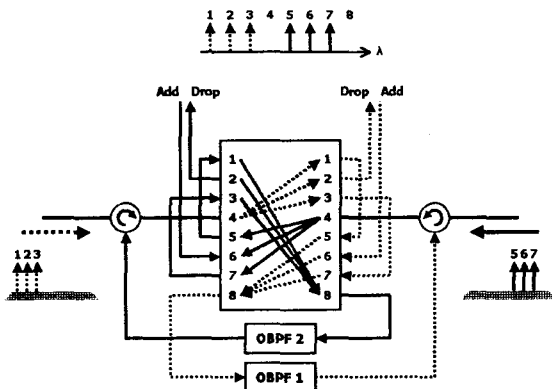


그림 1. 대역통과필터를 이용하는 양방향 애드/드롭 다중화기

하지만 이처럼 상대 강도 잡음을 제거하기 위해 광 대역통과필터를 이용하는 경우, 두 개의 대역을

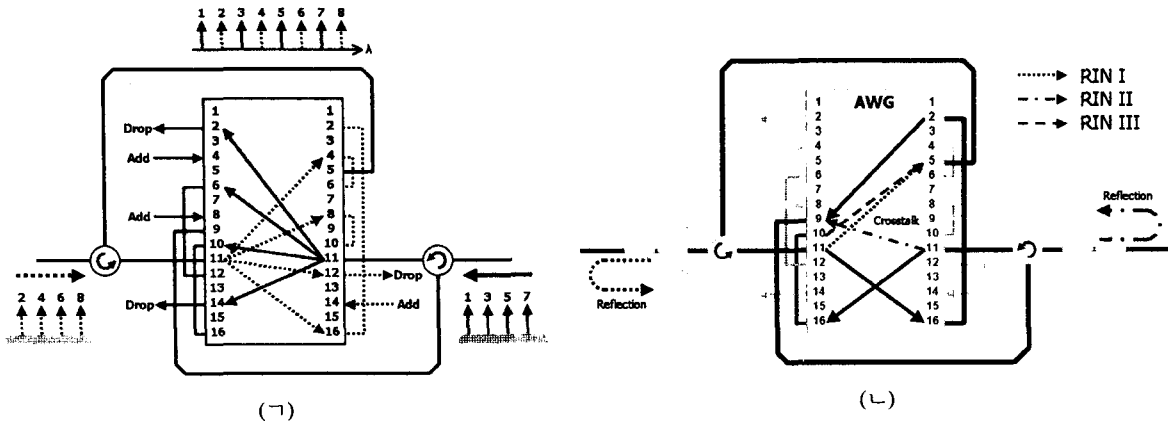


그림 2. 파장 엇갈림 방식 양방향 애드/드롭 다중화기
 (a) 다중화기의 구조 (b) 제안된 다중화기에서 발생할 수 있는 상대 강도 잡음

분리하기 위해 보호 파장 대역(guard band)이 필요하게 되며 따라서 파장 이용 효율이 감소하게 된다. 또한 대역통과필터의 중심 파장이나 통과 대역폭이 최적의 값에서 벗어나면 신호의 크기가 감소하거나 신호 대역으로 새어 들어오는 도파열 격자의 누화가 커지는 등의 문제점이 생긴다. 그림 2(a)에서는 양방향으로 진행되는 광신호를 파장 엇갈림 방식으로 배치하여 앞서 기술한 문제점을 해결하였다⁽⁵⁾. 이 때 상향 신호와 하향 신호는 200 GHz 간격이 되도록 엇갈리게 배치하였다(1, 3, 5, 7번 채널은 하향 신호, 2, 4, 6, 8번 채널은 상향 신호). 상향 신호와 하향 신호가 100 GHz가 되도록 배치하면 각 방향으로 7개씩의 채널을 수용할 수 있다. 그림 2(b)은 이러한 B-ADM 모듈에서 Rayleigh 역산란과 반사에 의해 발생할 수 있는 상대 강도 잡음의 경로를 나타낸 것이다. 제안한 파장 엇갈림 방식 양방향 애드/드롭 광증폭기 모듈에서는 모두 세 가지의 상대 강도 잡음 경로가 발생한다. 따라서 별도의 광 대역통과필터를 사용하지 않으면서도 양방향 광통신을 가능케 할 수 있다. 만약 B-ADM에 이용되는 도파열 격자의 특성이 이상적이라면 이러한 상대 강도 잡음은 발생하지 않는다. 실험에서 이용한 도파열 격자의 누화는 -29 dB로, 파장을 엇갈리게 배치하면 상대 강도 잡음이 최소한 도파열 격자의 누화량만큼 억제된다.

III. 양방향 WDM 자기 치유 광통신망

이러한 파장 엇갈림 방식 양방향 애드/드롭 광증폭기 모듈을 이용하여 두 가닥의 광섬유를 이용하는 양방향 자기 치유 환형 광통신망을 구성하였다. 각각의 광섬유로는 양방향 신호가 전송되는데, 그림에서 왼쪽에 보이는 환형망은 정상 동작 상태(working state)에서 이용되며, 바깥쪽의 환형망은 장애가 발생했을 때(protection state) 자기 치유 기능 구현을 위해 이용된다. 그림 3(a)은 구현한 광통신망에서 이용된 노드의 구조이다. 이는 B-ADM 하나, 두 개의 2 × 2 광스위치, 그리고 광선로 및 B-ADM의 손실을 보상하기 위한 세 개의 EDFA(working ring에 두 개, protection ring에 하나)로 구성된다. 실험에서는 1 : 99 광결합기와 제어 회로를 이용하여 장애 발생 시 광의 영역에서 통신 장애를 자동으로 복구할 수 있는 기능을 구현하였다. 이 때 1 : 99 광결합기를 통해 working ring의 신호 유무를 항상 감시하고, 광선로 실패 등에 의해 통신이 두절되는 경우에는 제어 회로가 스위치의 상태를 전환한다. 실험에서는 약 8 ms의 스위칭 시간을 갖는 기계적 스위치를 이용하였다. 그림 3(b)은 구현한 양방향 WDM 자기 치유 환형 광통신망의 구성도이다. 일반 단일 모드 광섬유를 이용하였으며 각 노드 사이의 간격은 40 km이다. 시계 방향과 반시계 방향으로 전송할 2.5 Gb/s 신호를 생성하기 위해 두 개의 외부 변조기를 이용하였다.

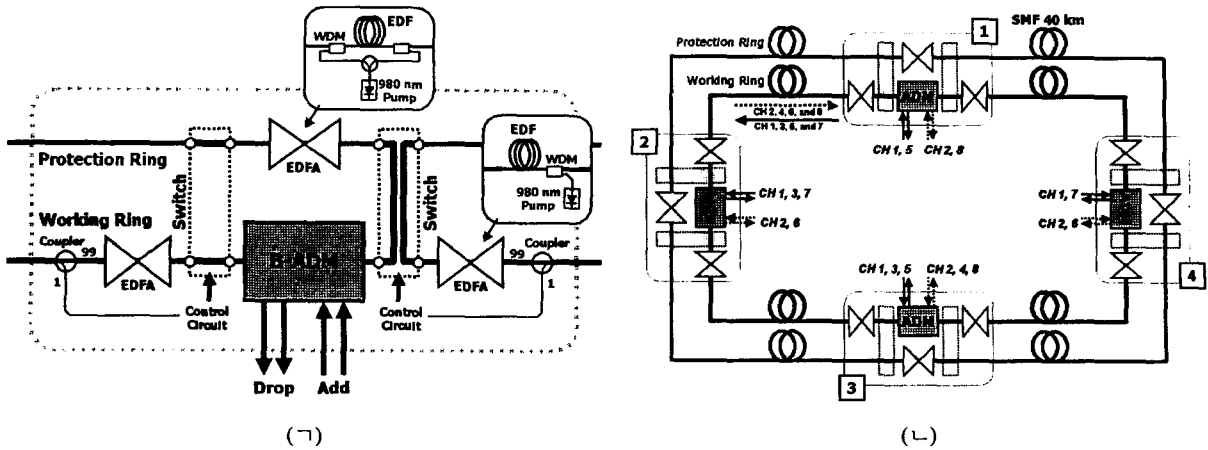


그림 3. 두 가닥의 광섬유를 이용하는 양방향 WDM 자기 치유 환형 광통신망
(A) 노드의 구조 (B) 양방향 WDM 자기 치유 환형망의 구성

모두 8 개의 채널을 전송하였으며 2, 4, 6, 8번 채널(각각 1549.32 nm, 1552.52 nm, 1555.75 nm, 1558.98 nm)은 시계 방향으로 전송하였고, 1, 3, 5, 7번 채널(각각 1547.72 nm, 1550.92 nm, 1554.13 nm, 1557.36 nm)은 반시계 방향으로 전송하였다. 이 때 3번 노드에서 애드하는 신호 가운데에서 3번 채널과 4번 채널 신호는 광통신망의 성능을 확인하기 위하여 각각 120 km, 160 km를 전송하였다. 광선로에 장애가 발생하면 이들 두 채널은 working fiber와 protection fiber를 거쳐 각각 200 km와 240 km를 전송하게 된다. 또, 애드/드롭하는 신호는 네 개의 노드가 full-mesh connectivity를 만족하도록 파장을 할당하였다. 보기를 들자면, 그림에서처럼 1번 채널과 5번 채널이 1번 노드에서 수신(드롭)되면, 드롭된 신호와 동일한 파장을 갖는 새로운 1번 채널과 5번 채널 신호를 그 노드에서 송신(애드)하는 것이다.

양방향 전송과 애드/드롭의 성능을 확인하기 위하여 각 노드에서 드롭하는 모든 신호에 대한 비트 오류율을 측정하였다. 그림 4(A)은 정상 동작 상태에서 시계 방향으로 전송한 신호들에 대해 측정한 비트 오류율 곡선이다. 예를 들어, 그림에서 "노드 3-2-1-4-3"은 신호가 3번 노드에서 애드된 후, 2번, 1번, 4번 노드를 경유하여 3번 노드에서 드롭되었음을 나타낸다. 이 때 10^{-9} 의 비트 오류율에서 측정된 최대 파워 페널티는 0.5 dB 이하였다. 반시계 방향으로 전송한 신호들에 대해서도 유사한 결과가 나타났다. 자기

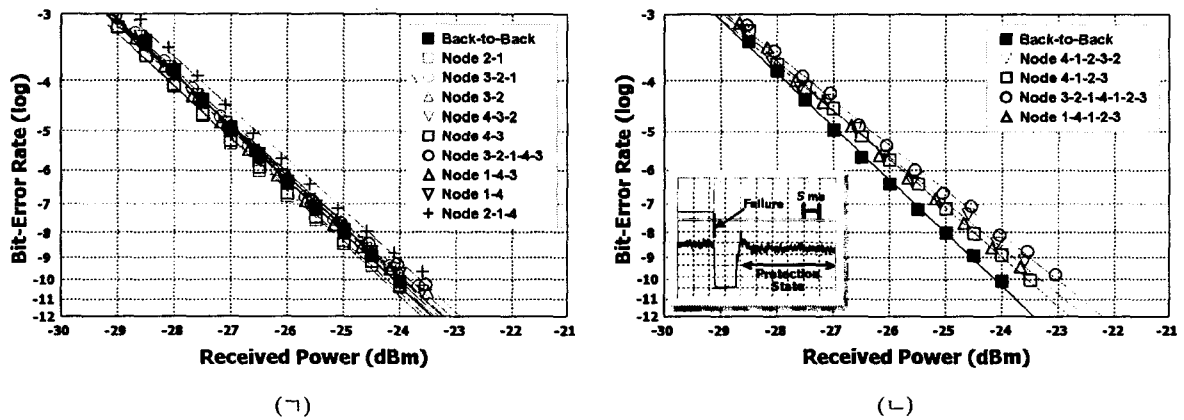


그림 4. 수신된 신호의 비트 오류율 곡선
(A) 정상 동작 상태에서의 비트 오류율 곡선 (B) 복구된 신호의 비트 오류율 곡선. 사각형 속은 제안된 통신망의 자기 치유 특성.

치유 특성을 확인하기 위해 스위치를 이용하여 3번 노드와 4번 노드 사이에서 전송 장애를 발생시켰다. 그림 4(L)은 복구가 완료된 이후 시계 방향으로 전송한 신호들에 대해 측정된 비트 오류 곡선이다. 이때 최장 거리를 전송한 신호는 working ring과 protection ring의 광선로를 거쳐 총 240 km를 전송하였으리, 복구된 신호에 대한 최대 파워 페널티는 약 1.1 dB이었다. 그림 4(L)의 안쪽 상자는 제안된 광통신망의 자기 치유 특성을 나타낸다. 이는 광선로에 장애가 발생했을 때, 그 구간을 경유하여 이웃 노드에서 트립된 광신호의 크기를 측정함으로써 확인하였다. 측정된 복구 시간은 10 ms 미만이었으며, 이는 광스위치의 스위칭 시간에 의해 결정되었다.

자기 치유 환형망은 단일 장애에 대해서만 복구 기능을 수행한다. 따라서, 통신망의 장애가 복구되면 통신망을 원래의 상태로 전환시켜 주어야 한다. 최근 “브리지와 스위치” 방식으로 스위치를 제어하여 광의 영역에서 자동 “복귀(retrieval)”를 구현한 논문이 발표된 바 있다⁽⁶⁾. 하지만 그러한 자동 복귀 방식은 네 개의 광섬유를 이용한 양방향 자기 치유 환형 광통신망에만 적용 가능하며, 또한 추가로 많은 광소자를 필요로 하는 단점이 있었다.

본 논문에서는 간단하면서도 유연한 새로운 방식의 자동 복귀 방법을 제안하고 시연한다. 장애가 복구되고 나면 장애가 발생했던 광선로와 이웃한 스위치, EDFA에 의해 폐경로가 만들어진다. 정상적인 상태에서는 EDFA가 포화 영역에서 동작하기 때문에 이들의 비포화 이득은 동작시의 이득에 비해 크다. 따라서 장애 복구 이후 새로이 생성된 폐경로의 루프 이득이 1보다 커지게 되어 레이저 발진이 유지된다. 따라서 각 노드에 있는 광수신기로 입사되는 광 출력이 크게 증가하게 되고, 이를 감시함으로써 통신망을 장애 복구 상태에서 정상 상태로 복구시킬 수 있다. 그림 5는 제안된 광통신망의 복구(restoration) 및 복귀(retrieval) 특성을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이, 복구와 복귀가 모두 10 ms 이내에 이루어진다. 이는 노드 내 스위치의 스위칭 시간이 약 8 ms 정도이기 때문이다. 제안된 자동 복귀 방법은 통신망의 구조를 거의 바꾸지 않고도 네 개의 광섬유를 이용하는 양방향 자기 치유 환형망이나 두 개의 광섬유를 이용하는 단방향 자기 치유 환형망에 적용할 수 있으므로 경제적이며 또한 유연한 특성을 갖는다.

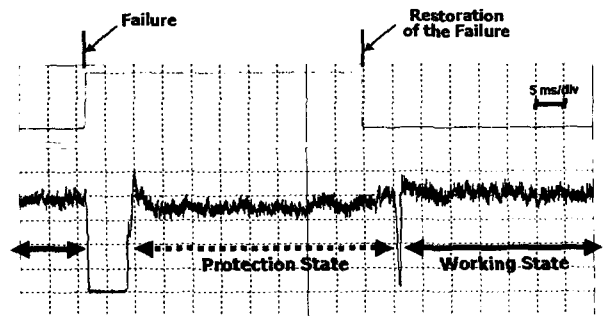


그림 5. 제안된 광통신망의 자기 치유 및 자동 복귀 특성

IV. 요약

본 논문에서는 하나의 광섬유 상에서 양방향으로 신호를 전송할 수 있는 양방향 애드/드롭 다중화기와 이를 이용한 양방향 자기 치유 환형 광통신망을 제안, 시연하였다. 제안한 양방향 애드/드롭 다중화기는 단지 하나의 $N \times N$ 다중화기만을 이용하므로 경제적이며, 광 대역통과필터를 이용하거나 파장을 엇갈리게 할당하는 방법을 이용하여 상대 강도 잡음을 효과적으로 억제할 수 있었다. 또한 시연된 양방향 자기 치유 환형망은 장애에 대한 복구 및 자동 복귀 기능을 수행하였다. 총 240 km를 전송한 경우, 10^9 비트 오류에서의 파워 페널티는 1.1 dB 이내였으며, 장애 복구 및 자동 복귀에 걸린 시간은 10 ms 이내였다. 이러한 장애 복구 및 자동 복귀 기능을 구현하는 데 걸리는 시간은 노드 내 스위치의 스위칭 시간에 의해 결정되므로 빠른 장애 복구 및 자동 복귀를 구현할 수 있다.

참고 문헌

1. Hitoshi Obara, Hiroji Masuda, and Kazuo Aida, "Transmission over a 200-km single-fiber bidirectional ring network with reconfigurable WDM add/drop repeaters," *European Conference on Optical Communications (ECOC) '97*, paper TH1A3, pp. 9-12, Sep. 1997.
2. Keang-Po Ho, Shien-Kuei Liaw, and Chinlon Lin, "Performance of an eight-wavelength bidirectional WDM add/drop multiplexer with 80-Gbit/s capacity," *Optical Fiber Communication Conference (OFC) '97*, paper TuR1, 1997.
3. C. H. Kim, Chang-Hee Lee, and Y. C. Chung, "Bidirectional WDM self-healing ring network based on simple bidirectional add/drop amplifier module," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 9, pp. 1340-1342, 1998.
4. J. L. Gimlett and N. K. Cheung, "Effects of phase-to-noise conversion by multiple reflection on gigabit-per-second DFB laser transmission systems," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 7, no. 6, pp. 888-895, 1989.
5. J.-W. Park and C.-H. Lee, "Wavelength interleaved bidirectional add/drop amplifier module," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 12, no. 2, pp. 326-328, 2000.
6. Tetsuya Miyazaki and Shu Yamamoto, "A proposal of the optical switch circuit architecture with Bridge & Switch function for WDM four-fiber ring network," *Third Optoelectronics and Communications Conference (OECC '98)*, paper 16A4-4, pp. 440-441, 1998.