

## Beat-frequency-locking 기술을 이용한 12.5 GHz 채널간격 양방향 초고밀도 WDM 광채널 전송

이재승<sup>+</sup> · 김상엽

광운대학교 전자공학과

☎ 139-701 서울시 노원구 월계동 447-1

서경희

성신여자대학교 컴퓨터정보학부

☎ 136-742 서울시 성북구 동선동 3가 249-1

(2003년 3월 11일 받음, 2003년 7월 18일 수정본 받음)

본 논문에서는 0.8 bit/s/Hz의 높은 대역효율을 얻을 수 있는 12.5 GHz 채널 간격의 양방향 초고밀도 파장분할다중화(UD-WDM: ultra-dense wavelength division multiplexing) 광채널을 80 km의 단일 모드 광섬유로 전송하였다. 초고밀도 WDM 시스템에서 요구되는 광채널 주파수의 안정화를 위해 BFL(beat-frequency-locking) 기술을 이용하였으며, 실험을 통하여  $\pm 200$  MHz 이내로 광채널을 안정화 시킬 수 있음을 보였다. 특히, 다수개의 비트 주파수 변별과 높은 주파수 변별력을 확보하기 위하여 RF 스펙트럼 분석기를 이용하였다. BFL 기술이 적용된 채널간격 12.5 GHz 양방향 광채널의 전송 패널티는 단방향 전송과 비교시 단지 0.3 dB이었다.

주제어 : beat-frequency-locking, bidirectional transmission system, ultra-dense wavelength division multiplexing.

### I. 서 론

증가하는 멀티미디어 관련 정보량을 충족시키기 위해서 WDM 광전송방식은 이미 세계적인 기술적 추세가 되었으며, 더욱이 최근에는 광증폭기의 한정된 이득대역 내에서 더욱 높은 대역효율을 얻기 위한 방법이 다양하게 연구되고 있다. 이에 대한 새로운 접근법으로 초고밀도 WDM 방식이 주목을 받고 있다. 일반적으로 초고밀도 WDM 시스템은 10 Gbps 이하의 전송속도를 갖는 광채널에 대해 채널간격을 25 GHz 보다 좁게 배치하는 것으로, 특히 관련소자의 대량생산에 따른 가격적인 측면과 광섬유 분산문제 등에 있어 유리한 장점을 갖고 있다. 한편, 높은 대역효율을 얻기 위한 수단으로 양방향 전송기술과 초고밀도 WDM 기술을 접목한 방식도 활발히 연구되고 있다. 특히, 채널 인터리빙 방식의 양방향 전송기술은 단방향 전송에 비하여 광섬유 비선형 현상을 억제할 수 있다는 장점을 갖고 있다.<sup>[1-3]</sup> 따라서, 최근에는 10 Gbps 채널속도에서 채널 간격을 25 GHz까지 줄인 채널 인터리빙 방식의 양방향 초고밀도 WDM 논문도 발표되었다.<sup>[3]</sup> 하지만, 이러한 양방향 시스템에서 채널간격을 더욱 줄이기 위해서는 양쪽 노드에서 광채널의 주파수 안정화 및 정렬기술이 중요해진다.

본 논문에서는 BFL 기술을 사용하여 처음으로 대역효율 0.8 bit/s/Hz를 갖도록 10 Gbps 채널을 12.5 GHz의 채널간격으로 정렬한다. 이미 BFL 기술을 통하여 두 노드사이의 채널간격을 안정화시켜 초고밀도 양방향 전송 시스템에서 문제가 되는 광섬유 비선형현상인 SBS(stimulated Brillouin scattering)를

억제할 수 있었다.<sup>[2]</sup> 그러나 비트 주파수를 변별하기 위하여 사용된 기존의 RF 필터방식<sup>[2]</sup>은 충분한 주파수 응답특성 곡선을 갖지 못하므로 대략  $\pm 1$  GHz 정도의 채널 정렬오차를 가진다. 특히, 최근 주목 받고 있는 채널간격 12.5 GHz 이하급의 초고밀도 WDM 방식에서는 채널간 간섭을 최소화 할 수 있는 초정밀 채널간격 안정화 기술이 필수적이다. 따라서 수 MHz 정도의 높은 주파수 해상도를 갖는 RF 스펙트럼 분석기를 이용하면 정렬오차를 수백 MHz 이하로 유지할 수 있다는 장점이 있다. 본 논문에서는 장비형태의 RF 스펙트럼 분석기를 이용하였으나 경제성을 고려하여 스펙트럼분석이 가능한 등가회로를 제작하여 사용할 수도 있다.

12.5 GHz 이하의 채널 간격으로 다수개의 광채널을 사용하는 초고밀도 WDM 전송방식에서 채널 정렬을 위해서는 기존의 wavelength locker를 사용할 수도 있지만 광원의 개수만큼 소자가 필요하며 또한  $\pm 2$  GHz 정도의 비교적 큰 오차를 가지므로 wavelength locker의 적용은 어렵게 된다. 한편, 더욱 정확한 wavelength locker의 사용 역시 시스템 비용측면에서 불리하다.<sup>[4]</sup> 이와는 달리, BFL 방식은 다중화된 광신호에서 직접 비트 주파수를 추출하여 다수개의 광원을 안정화시키는 방식이므로 비용 측면에서도 유리하다.

### II. 실험

그림 1은 실험 구성도를 보여준다. East와 West 노드에는 각각 25 GHz 채널간격으로 4개의 DFB(distributed feedback) 레이저 다이오드가 있으며 West 노드의 채널은 짝수 번호를, East 노드의 채널은 홀수 번호를 할당하였다. East와 West 노드

<sup>+</sup>E-mail: jslee@daisy.kwangwoon.ac.kr

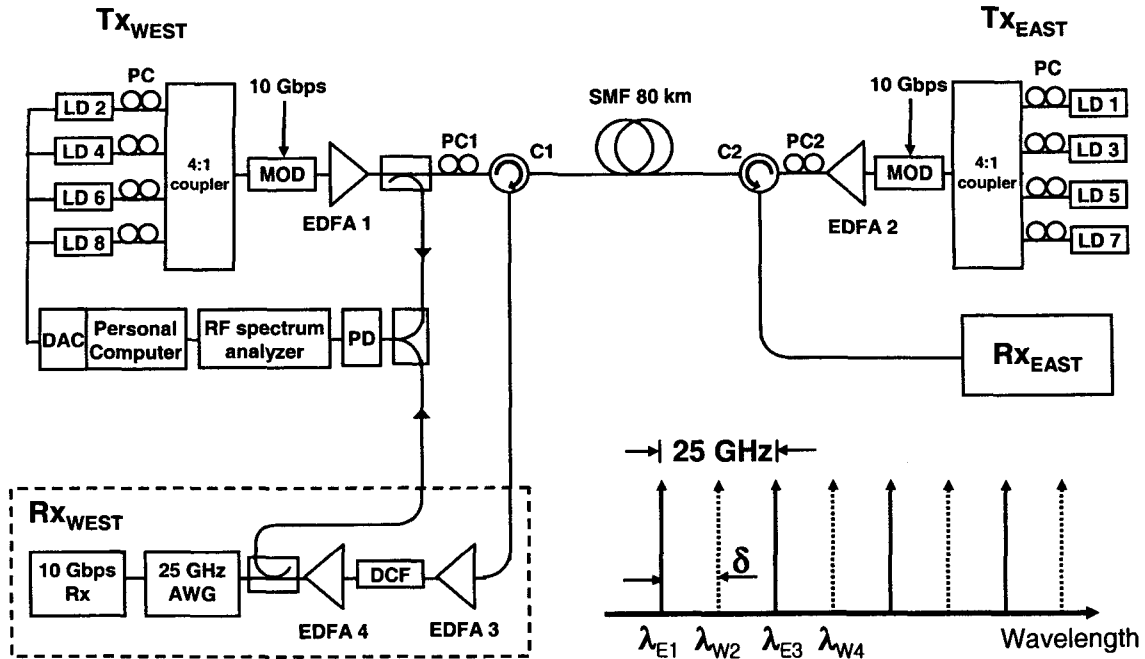


그림 1. 실험 구성도. LD: laser diode. MOD: LiNbO<sub>3</sub> modulator. EDFA: Erbium-doped fiber amplifier. PC: polarization controller. C: optical circulator. SMF: single-mode fiber. PD: photodiode. DAC: digital-to-analog converter. DCF: dispersion-compensating fiber. AWG: arrayed-waveguide grating.

의 채널 배치도와 두 노드 사이의 채널간격으로 정의되는 상대 채널간 주파수 편차( $\delta$ )는 그림 1의 삽입그림에 나타내었다. 이때, East 노드의 첫 번째 채널의 파장은 1553.43 nm이었다.

각각의 노드에서 4개의 DFB 레이저 다이오드 출력들은 4×1 광결합기를 이용하여 다중화되었으며 LiNbO<sub>3</sub> 외부변조기에 의해 10 Gbps NRZ(PRBS: 2<sup>31</sup>-1)로 변조되었다. 변조된 광채널들은 광증폭기에 의해 증폭된 후 80 km의 단일모드 광섬유(SMF: single-mode fiber)로 인가되었다. SBS에 의한 영향을 최대한 억제하기 위하여, SMF로 인가된 채널당 파워는 양방향 모두 -3 dBm으로 하였다. 그리고 두 개의 광서큘레이터를 이용하여 짝수 채널과 홀수 채널을 분리하였으며, SMF의 분산은 분산보상 광섬유에 의해 보상되었다. 그 후 3 dB 대역폭이 0.12 nm인 25 GHz 채널 간격을 갖는 배열 도파로 격자(AWG: arrayed-waveguide grating)를 이용하여 수신채널을 역다중화 하였다. 또한, 서로 다른 방향의 채널간 편광 간섭정도를 측정하기 위해 EDFA1과 EDFA2 출력단에 편광조절기를 사용하였다. 실험에 사용된 SMF의 손실은 16.7 dB이었으며 분산보상 광섬유의 손실은 12.5 dB이었다.

3개의 광결합기를 이용하여 West 노드에서의 짝수 채널은 수신된 홀수 채널과 결합된 후 9 GHz의 3 dB 대역폭을 갖는 PIN 타입의 포토 다이오드에 의해 광검출된다. 이때 포토 다이오드의 입력 광파워는 -6 dBm이었다. 포토 다이오드에 의해 생성된 비트 주파수 신호들은 바로 RF 스펙트럼 분석기에 인가되고, 개인용 컴퓨터는 이 비트 주파수 신호들을 처리하여 레이저 다이오드의 온도 제어를 통해 파장을 제어한다. 실험을 위해서 홀수 채널은 이미 주파수가 안정화 되어 있는 기준 광채널로 가정하였다. 정렬과정은 홀수 채널을 기준으로 단파장

쪽 짝수 채널부터 하나씩 순서대로 정렬하였다. 우선,  $i$ 번째 짝수 채널( $i=2, 4, 6, 8$ )의 파장을 감소시켜 이미 정렬되어 있는  $i-1$ 번째 홀수 채널과의 비트 주파수를 얻는다. 이로부터  $i-1$ 과  $i$ 번째 채널과의  $\delta$ 를 알 수 있는데, 여기서 다시  $i$ 번째 채널의 파장제어를 통해 우리가 원하는  $\delta$ 값으로 위치시킬 수 있다.

### III. 결과 및 토의

그림 2는 West 노드에 수신된 홀수 채널의 광스펙트럼을 보여준다. 실험에서 사용한 광스펙트럼 분석기는 0.07 nm의 광학해상도를 갖는다. 그림 3은  $\delta$ 를 변화시켰을 경우 채널 5번에 대한 비트 오류를 보여준다.

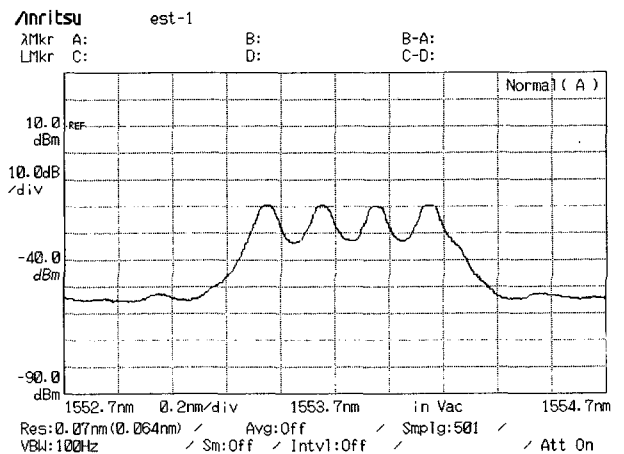


그림 2. West 노드에서 수신된 광스펙트럼.

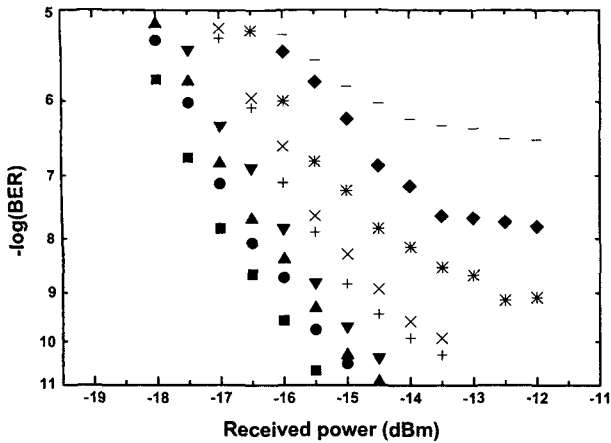


그림 3. 채널 5번의 BER 특성. ▲:  $\delta=12.5$ -GHz. ▼:  $\delta=11.5$ -GHz. ◆:  $\delta=10.8$ -GHz. +:  $\delta=9$ -GHz. x:  $\delta=7$ -GHz. \*:  $\delta=5$ -GHz. -:  $\delta=0$ -GHz. ■: back-to-back ( $\delta=12.5$ -GHz). ●: 단방향 전송.

채널 인터리빙 방식의 양방향 광전송 시스템에서, 전송 광섬유에 의한 역방향 산란은 전송 성능을 결정짓는 주요 요소 중 하나이다. 실험에서, 수신된 채널과 상대편 노드 채널에 의한 역방향 산란파워와의 X-talk 레벨은 17 dB이었다. 그리고 역다중화를 위해 사용된 0.12 nm의 3 dB 대역폭을 갖는 AWG로 이러한 역방향 산란채널을 제거하여 전송특성 저하를 최대한 억제하였다. 그 결과 모든 채널의  $\delta$ 가 12.5 GHz로 고정되었을 경우,  $10^{-9}$ 의 비트 오류에서 페널티는 단방향 전송과 비교시 단지 0.3 dB의 차이를 가짐을 알 수 있다. 그러나  $\delta$  값이 12.5 GHz 보다 적을 경우에는 페널티가 증가하는데, 이는  $\delta$  값이 적은 경우 AWG가 수신채널과 근접한 역방향 산란성분을 제거하지 못하기 때문이다. 한편, 단방향 전송시 0.5 dB 정도의 페널티는 광섬유 비선형 현상과 광변조기의 처핑특성에 의한 것이다.

일반적인 양방향 전송시스템에서 광섬유에 대한 입력파워가 대략 +10 dBm 이상일 경우에는 SBS 현상이 문제가 될 수 있다. 즉, 상대편 노드 채널에 의한 SBS 파워성분과 수신채널이 함께 광수신기로 인가되어 전송특성이 저하된다. 따라서, 실험에서는 수신시 SBS에 의한 X-talk 문제가 생기지 않도록 채널당 파워를 -3 dBm으로 낮게 하여 전송하였다. 그러나  $\delta=10.8$  GHz에서 비트 오류 그래프가  $10^{-8}$  근처에서 플로어를 보임을 알 수 있다. 이는 -3 dBm의 송신파워에서 발생한 미약한 SBS 성분이라도 수신된 채널의 주파수 대역과 정확히 중복될 경우에는 수신 채널이 크게 왜곡된다는 것을 의미한다. 따라서, 10.8 GHz를 중심으로 대략  $\pm 250$  MHz 이내의  $\delta$  값은 피해야만 한다. 하지만,  $\delta=12.5$  GHz는 SBS 현상이 일어나는 영역과 너무 근접하기 때문에,  $\pm 2$  GHz 정도의 정확도를 갖는 wavelength locker의 사용은 심각한 특성 저하를 불러올 수 있다.

그림 4는  $\delta=12.5$  GHz에서 7개의 비트 주파수신호에 대한 정렬전과 정렬후의 스펙트럼 사진이며, 정렬후의 상대채널 간격오차는  $\pm 50$  MHz 이내임을 알 수 있다.

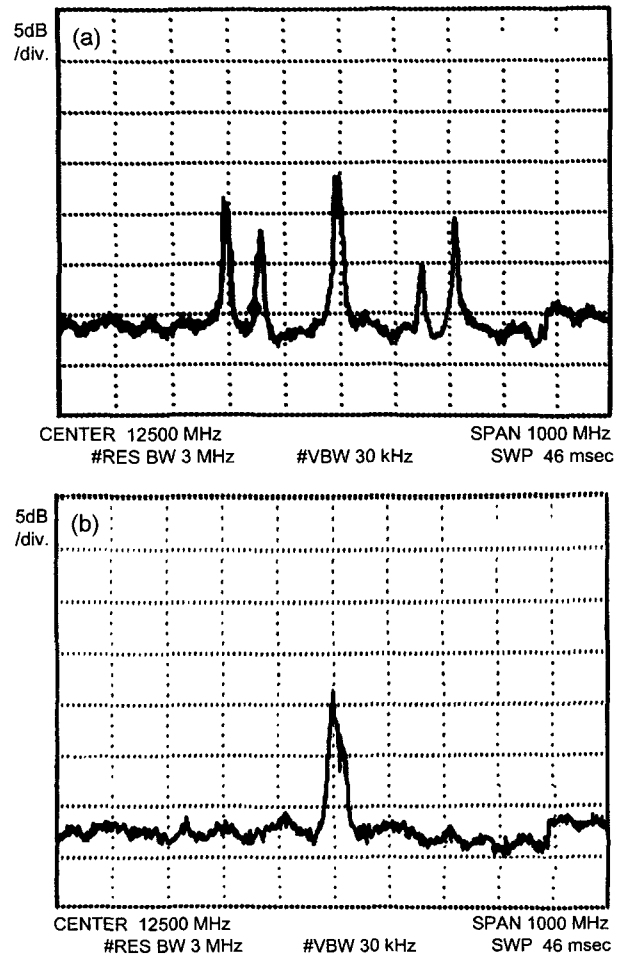


그림 4.  $\delta=12.5$ -GHz에서의 비트 주파수 신호. (a) 정렬 전, (b) 정렬 후.

하지만 레이저 다이오드 주변의 온도 변화와 회로 잡음 등으로 인해 정렬 후에도 채널 주파수는 대략  $\pm 100$  MHz 정도로 천천히 변하게 된다. 그러므로 지속적으로 비트 주파수의 분포를 모니터링하고 만약 채널 오차가 커지면 이를 제어하게 된다. 실험에서는  $\pm 100$  MHz를 최대 허용 오차로 정하였으며 비트 주파수가 이 범위를 벗어나게 되면, 레이저 다이오드의 파장을 제어하여 모든 채널의  $\delta$ 를 다시 12.5 GHz에 위치시키도록 하였다. 비트 주파수를 정렬하는 과정에서, 해당 채널의 비트 주파수를 인지하기 위해서 레이저 다이오드의 발진 주파수를 순차적으로 200 MHz 까지 변화시킨다. 결과적으로, 실제  $\delta$ 의 오차는 최대  $\pm 200$  MHz가 된다. 하지만, 오차가 200 MHz까지 증가하더라도  $\delta$  값이 12.5 GHz임을 고려하면 전송 페널티는 무시할만하다.

실험에서는 모든 홀수 채널을 기준채널로 가정하고 수동으로 이들의 채널 주파수를 고정시켰지만, West 노드에서 East 노드로 제어채널을 보내는 방법 등을 이용한다면 홀수 채널도 같이 제어할 수 있게 된다. 따라서 기준 채널을 위한 더욱 정확한 wavelength locker<sup>[4]</sup>의 사용량을 줄일 수 있으므로 시스템 비용도 크게 낮출 수 있다.

그림 5는  $\delta=12.5$ 와 7 GHz에 대해서, 편광상태가 가장 좋

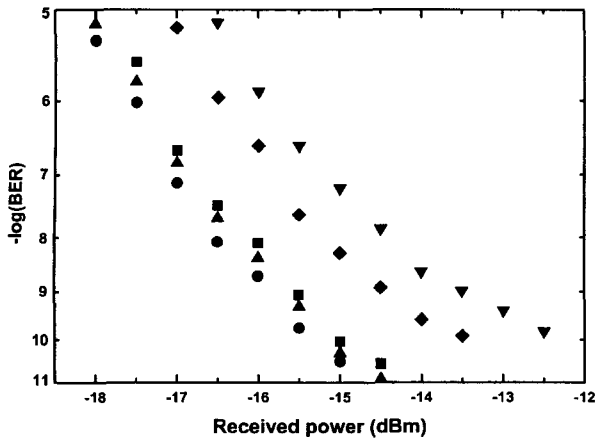


그림 5. 최적과 최악의 편광상태일 때 측정된 BER 특성. ▲ :  $\delta=12.5$ -GHz, best case. ◆ :  $\delta=7$ -GHz, best case. ■ :  $\delta=12.5$ -GHz, worst case. ▼ :  $\delta=7$ -GHz, worst case. ● : 단방향 전송.

을 때와 안 좋을 때의 비트 오류율을 비교한 것이다.  $\delta=12.5$  GHz 경우, 페널티 차이는 0.2 dB 이하지만,  $\delta=7$  GHz일 경우에는 페널티 차는 약 1 dB까지 증가함을 알 수 있다. 즉,  $\delta=12.5$  GHz의 경우에는 EDFA1과 EDFA2의 출력단에 편광 조절기가 필요하지 않음을 알 수 있다.

한편, Multi-wavelength meter 를 이용해서 초고밀도 WDM 채널들을 정렬하는 방법도 가능하다.<sup>[5]</sup> 그러나 이 방식에서 측정 오차를 줄이기 위해서는 스캐닝 마다 1초 정도의 긴 시간과 70 GHz 정도의 큰 채널 간격이 요구된다.<sup>[5]</sup> 반면에 RF 스펙트럼 분석기나 이와 동등한 회로의 경우는 스캐닝 당 수십 ms 정도로 매우 속도가 빠르며, multi-wavelength meter 보다 높은 해상도를 제공하므로 12.5 GHz 이하의 좁은 채널 간격에도 이용이 가능하다는 장점이 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 BFL 기술을 이용해서 채널간격 12.5 GHz의 채널 인터리빙된 양방향 초고밀도 WDM 채널들을  $\pm 200$  MHz 이내의 오차로 안정화 시켰다. 또한, RF 스펙트럼 분석기를 이용하여 다수의 비트 주파수 신호를 쉽고 정확하게 변별 및 제어할 수 있었다. 실험을 통하여, 성공적으로  $8 \times 10$  Gbps의 양방향 초고밀도 WDM 채널을 SMF 80 km 전송하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2001-041-E00186).

#### 참고문헌

- [1] M. Sumida, H. Maeda, and T. Imai, "Ten-repeated bidirectional WDM transmission of eight channels at 10 Gbit/s using single-wavelength-band-operating bidirectional amplifiers," *Electron. Lett.*, vol. 37, pp. 850-852, 2001.
- [2] Y. S. Ahn, S. Y. Kim, S. H. Han, J. S. Lee, S. S. Lee, and W. S. Seo, "Bidirectional DWDM transmission using a beat-frequency-locking method," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, pp. 899-901, 2001.
- [3] S. Radic, S. Chandrasekhar, A. Srivastava, H. Kim, L. Nelson, S. Liang, K. Tai, and N. Copner, "Dense interleaved bidirectional transmission over  $5 \times 80$  km of nonzero dispersion-shifted fiber," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 218-220, 2002.
- [4] <http://www.fiberspace.net/>
- [5] T. Ono and Y. Yano, "Key technologies for terabit/second WDM systems with high spectral efficiency of over 1 bit/s/Hz," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 34, pp. 2080-2088, 1998.

### 12.5-GHz interleaved bidirectional ultra-dense WDM transmission using the beat-frequency-locking method

Jae-Seung Lee<sup>†</sup> and Sang-Yuep Kim

Dept. of Electronic Engineering, Kwangwoon University, Wolgye-dong 447-1, Nowon-Gu, Seoul 139-701, KOREA

<sup>†</sup>E-mail: jslee@daisy.kwangwoon.ac.kr

Kyung-Hee Seo

Dept. of Computer Science, Sungshin Women's Univ., DongSun-Dong 3 Ka 249-1, Sungbuk-Gu, Seoul 136-742, KOREA

(Received March 11, 2003, Revised manuscript July 18, 2003)

We present a 12.5-GHz interleaved bidirectional ultra-dense wavelength-division-multiplexing transmission over a conventional single mode fiber of 80 km achieving spectral efficiency as high as 0.8-bit/s/Hz. The beat-frequency-locking method is used to stabilize the channel frequency within  $\pm 200$  MHz error. To facilitate the identification of multiple beat frequency signals, we use a radio-frequency spectrum analyzer. The bidirectional transmission penalty is about 0.3 dB compared with the unidirectional transmission over the same fiber.

OCIS Codes : 060.0060, 060.2330, 060.2360, 060.4510.