초고속 대용량 광전송 기술

김근영, 이용기, 송길호
KT 통신망 연구소 광전송망 연구팀

Ultra high speed and high capacity optical transmission techniques

Geun-Young Kim, Yong-Gi Lee, Kil-Ho Song
Optical Technology Division, Telecommunications Network Laboratory, KT

Abstract - ADSL, Metro Ethernet등 가입자에게 넓은 대역폭을 할당하는 기술이 서비스 영역에 적용되고 있음에 따라 이를 원활히 수용할 수 있는 초고속 대용량 기간망 구축기술이 필요하다. 현재 사용되는 기술로는 2.5Gbps 또는 10Gbps의 전송속도를 갖는 수 십 채널을 각각 파장이 다른 광반송파(optical carrier)에 실어 광학적으로 다중화한 뒤 한 가닥의 광섬유를 통해 전송시키는 파장분할 다중화(Wavelength Division Multiplexing: WDM) 기술이 있다. 본 논문에서는 채널 당 전송 속도를 40Gbps로 증가시키거나, 증폭기 이득 대역폭을 확장시켜 채널 수를 증가시켜 수 THz의 전송용량을 수 천 km 전송시키는데 필요한 라만 광증폭기 기술, FEC 기술, 변조포맷, 분산관리(Dispersion management)기술 등의 핵심기술을 소개한다

1. 서 론

통신사업자가 갖고 있는 인프라의 전송용량을 증가시키는 방법으로 네트웍을 확장 시키지 않고 새로운 기술을 사용하여 전송용량을 증가시키는 것이 바람직하다. 본 논문에서는 파장분할다중화(WDM) 기술을 사용하여 초고속 대용량 기간망을 구축하는데 필요한 핵심기술 중 채널속도 고속화에 따른 변조포맷, 라만 증폭, FEC, 분산관리 기술에 대해 소개한다.

2. 본 론

2.1 변조포맷

스펙트럼 효율은 채널간격에 대한 채널속도의 비로 정의되는 양으로 스펙트럼 공간에서의 밀도에 해당된다. 즉 이용 가능한 대역폭이 데이터에 의해 얼마나 사용 되었는지의 척도이다. 채널 간격이 25GHz이고 채널 속도가 10Gbit/s일 경우와 채널 간격이 100GHz이고 채널 속도가 40Gbit/s인 경우의 스펙트럼 효율은 0.4bit/s/Hz로 동일하다. 따라서, 스펙트럼 효율을 증가시키기 위해서는 채널 간격을 줄이거나 채널속도를 증가시켜야 된다. 그림 1은 최근 학회에 발표된 테라급 전송실험 결과를 스펙트럼 효율 측면에서 나타낸 것이다. 전송용량을 증가시키기 위해서는 증폭기의 이득 대역폭을 확장시켜 더 많은 채널을 수용하거나, 스펙트럼 효율을 증가(그림에서 직선의 기울기를 증가)시켜야 됨을 알 수 있다. 스펙트럼 효율을 향상시키기 위해서 RZ(Return to Zero)[1], CS-RZ(Carrier Suppressed RZ)[2], Optical Duobinary[3], Optical SSB(Single Side Band)[4], VSB(Vestigal Side Band)-like filtering[5], Polarization Division Multiplexing(PDM)/ Demultiplexing[6]등 새로운 방식의 변조포맷이나 필터링 기술에 대한 연구가 필요하다.

RZ 변조포맷은 "1" 비트를 나타내는 광펄스가 타임슬롯보다 짧은 즉, 펄스 지속시간이 비트간격 보다 짧은 펄스이다. RZ 펄스는 NRZ에 비해 수신기에서 더 큰 아이 열림을 얻을 수 있으므로 수신감도를 향상시킬 수 있지만, 같은 peak 파워일 경우 NRZ에 비해 광신호대잡음비(OSNR)값은 3dB 떨어진다. RZ 펄스는 넓은 스펙트럼으로 인해 분산에 영향을 많이 받지만, 채널간 상효작용 시간이 NRZ 보다 짧아 XPM에 의한 영향을 적게 받는다. 또한 광섬유 내에서 적당한 조건이 맞을 경우 펄스압축이 일어나 펄스 퍼짐을 방지할 수 있지만, RZ 펄스를 생성하기 위해서는 두 개의 변조기가 필요하고 넓은 대역폭을 갖는 수신기가 필요하다는 단점이 있다.

CS-RZ 변조포맷은 RZ 포맷과 동일하지만 변조기의 동작점을 V_π에 위치시키고 구동주파수와 진폭을 각각 fc/2, $2V_\pi$로 변조기를 구동하므로 비트간에 위상이 180° 만큼 차이가 발생하여 광반송파 성분이 없어지고 스펙트럼이 RZ에 비해 줄어든다.

이와 같이 광신호의 대역폭을 최소화하여 스펙트럼 효율을 증가시키는 방법 중 변조된 광신호의 대역폭을 최소화함으로써 다중화할 수 있는 채널의 수를 늘이는 대표적인 또 다른 방법이 Optical Duobinary 포맷이다. Optical Duobinary 코딩은 변조된 광신호의 대역폭을 줄여 스펙트럼 효율을 증가시키고, 분산이나 비선형에 의한 전송신호 왜곡을 최소화 시킬 수 있는 멀티레벨의 변조 방식이다. Optical duobinary 포맷은 3레벨로 코딩을 하지만 변조된 광신호는 위상이 부호화된 것을 제외하고는 기존의 이진 신호와 동일하므로 NRZ 수신기를 그대로 사용할 수 있는 장점이 있다.

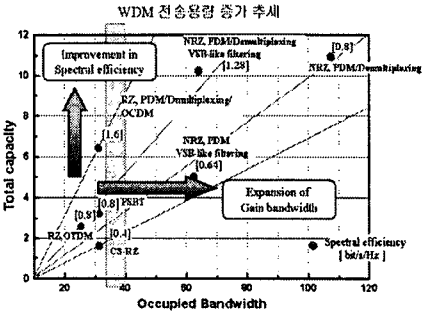

그림 1 WDM 전송용량 증가 추세

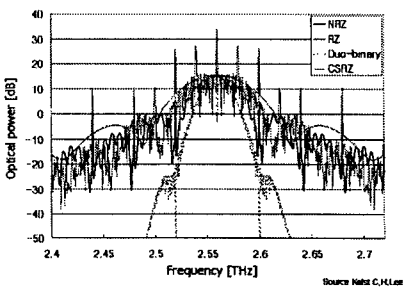

그림 2 변조 포맷에 따른 스펙트럼

Optical SSB는 강도 변조된 광신호 스펙트럼의 한 쪽 대역만을 이용하여 전송하므로 WDM의 채널간격을 좁게 가져갈 수 있고, 분산 효과를 억제할 수 있지만 송신기를 구현하는데 어려움이 있다.

PDM 방식은 두 수직한 편광을 갖는 광신호가 서로 간섭을 하지 않는 특성을 이용하여 채널 간격을 좁게 유지하여 가장 쉽게 스펙트럼 효율을 증가시킬 수 있는 방법이지만 편광상태를 일정하게 유지해야 되므로 실제 필드에 적용하기는 어려운 기술이다.

2.2 라만 증폭기술

광수신기에 입력되는 광신호의 세기가 충분히 클 경우, 전송속도가 2.5Gbit/s에서 10Gbit/s, 40Gbit/s로 4배 증가할 경우 원하는 BER(10^{-9}@10G, 10^{-12}@10G, 10^{-15}@40G)를 얻기 위해 필요한 OSNR은 각각 20dB, 26dB, 33dB로 약 6dB씩 증가한다. 40G 전송에 필요한 OSNR을 얻기 위해서는 입력광신호의 세기를 증가시켜야 되지만, 비선형에 의한 신호 왜곡으로 인해 입력 광신호 세기 증가에는 한계가 있으므로 연결할 수 있는 증폭기 개수가 한정된다. 따라서, 장거리 40G 전송을 위해서는 라만 증폭기술을 이용하여 OSNR에 영향을 미치는 잡음지수를 낮추어 필요한 OSNR 마진을 확보할 필요 있다. 광증폭 매개체로 어븀도핑된 광섬유를 사용하는 EDFA와 달리 광선로 자체를 이득 매질로 사용하는 라만 증폭은 빛이 분자진동에 의해 산란되는 유도 라만 산란 현상을 이용한 것으로 펌프 파장에서 약 12~13THz(100nm) 떨어진 곳에 최대 이득을 나타낸다. 라만 증폭기는 다른 광대역 증폭기에 비해 펌핑 광원의 파장 선택만으로 10THz 이상의 넓고 유연성 있는 이득 대역폭을 얻는 것이 가능하고, 낮은 잡음지수 제공에 따른 OSNR 마진 확보를 통해 전송거리를 증가시키거나, 전송속도를 증가시키는 것을 가능하게 한다.

상용화되고 있는 라만 증폭기의 이득은 15~20dB 정도로서 현재 WDM 시스템의 80~100km 스팬 거리를 전송시키기에는 이득이 부족하므로 주로 EDFA와 같이 사용되어 3~5dB 정도의 OSNR을 향상 시킨다. 라만 증폭기를 사용하여 OSNR에 대한 5dB 마진을 얻을 경우 그림 3에서 볼 수 있듯이 사용 증폭기 수가 동일한 경우는 광선로에 입력되는 광세기를 3dBm으로 낮출 수 있고, 8dBm으로 입력 광세기를 유지하면 40G 전송 시 다단 연결할 수 있는 증폭기의 개수가 19개로 증가되므로 장거리 고속 전송이 가능해진다.

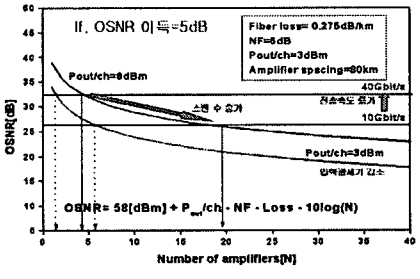

그림 3 OSNR 마진 확보에 따른 효과

광선로를 광증폭 매개체로 사용하는 distributed 라만 증폭기에 대한 연구가 진행 중이다. 특히 넓은 대역에 걸쳐 평탄한 높은 이득을 갖는 라만 증폭기를 구현하기 위해서는 고출력 펌프광원의 선택, 광증폭 매개체 선택, 펌핑 방법 등이 중요하다. 라만 이득은 근본적으로 비선형 현상이므로 광증폭 매개체인 광섬유의 유효단면적이 작을수록 펌핑 효율이 증가하여 이득이 커지지만, 원래 신호와 동일한 파장을 갖고 동일한 방향으로 진행하는 이중 레일리 후방 산란도 광섬유 코어의 크기가 작을수록 크게 일어나므로 라만 증폭이득과 광섬유 코어 크기 사이에는 trade-off가 있다. 차세대 광섬유인 G.655_B 타입의 경우 기존 G.652 광섬유인 SMF에 비해 작은 코어를 갖고 있으므로 라만 증폭에 유리하지만, 현재 필드에 포설된 광섬유가 대부분 SMF이므로 분산보상 목적으로 사용되는 분산보상 광섬유를 라만 이득 매개체로 사용하는 연구가 진행중이다. 해결해야 될 과제로는 라만 이득의 편광의존성, 높은 이득을 얻기 위한 고출력 펌핑 LD, 이득 ripple 제거, 이중 레일리 후방 산란 감소 등이 있다.

2.3 FEC 기술.

WDM 전송에 적용된 FEC는 redundancy 비트를 두어 전송시 발생하는 에러를 교정하는 오류정정부호 방식으로 초장거리 전송에 따른 광신호대 잡음비 저하, 분산 및 비선형 현상으로 인한 신호의 왜곡현상을 수용할 수 있는 BER 마진을 확보하는 방법으로 해저 전송시스템에서는 오래 전부터 사용되는 방식이다. SONET/SDH 시스템이 성능 감시를 위해 사용하는 BIP-8 에러 모니터링 방법은(B1, B2 바이트) 전송된 신호의 실제 비트 에러율을 운영자에게 보여 주는 반면, FEC는 감지된 에러율 이외에 FEC 기능이 적용된 후 정정된 에러율을 보여 줌으로써 전송된 신호에 실제 얼마만큼의 성능저하가 발생했는지 알 수 있게 해준다. FEC 코딩 방법으로는 전송신호의 프레임 내에 사용하지 않은 비트를 에러 감지와 정정을 위해 이용함으로써 원래 신호와 동일한 bit rate를 갖는 in band FEC(weak FEC)와 원래 신호 이외에 6%~23% 정도의 redundancy를 두어 bit rate를 확장시키는 out of band FEC(strong FEC)의 두 가지 방법이 있다.

Out of band FEC를 사용할 경우 redundancy 비트 첨가로 인한 전송속도가 증가(신호 대역폭 증가)에 따른 수신기의 대역폭 증가가 필요하다. 수신기의 대역폭 증가는 잡음의 증가로 인한 전기신호대 잡음비(Q)의 저하를 가져온다. RS(255, 239) 코딩방식을 사용하는 경우 대역폭 증가로 인한 Q 저하는 0.3dB이다.

현재 상용 시스템 및 ITU-T G.975에서는 오류정정 부호 방식으로 약 7%의 redundancy 비트를 사용하는 Reed Soloman(255,239) 코딩 방법을 권고하고 있지만, 일부 시스템 밴드들은 SONET/SDH 오버헤드의 사용하지 않는 비트를 활용할 수 있는 BCH 코딩 방법을 고려하고 있으며, 또한 높은 코딩 이득을 얻기 위해 여러 가지 코딩 방법을 concatenation 시키는 방법도 연구되고 있다.

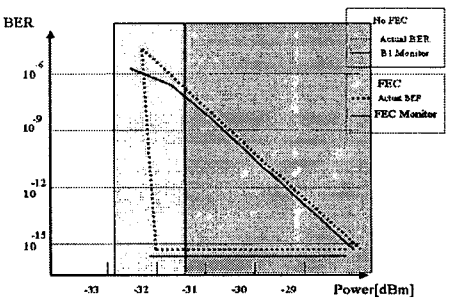

그림 4 FEC를 이용한 성능감시

2.4 분산관리(dispersion management) 방법

색분산은 광섬유를 진행하는 광신호의 파장에 따른 전파속도가 달라져 펄스 퍼짐이 유발되는 현상이고, 편광모드 분산은 광섬유의 복굴절 차로 인해 광신호의 편광상태에 따라 전파속도가 달라져 펄스 퍼짐이 발생하는 현상이다.

채널속도가 고속화 될 경우 분산에 대해 시스템이

갖는 여유는 chirp이 없는 송신기를 사용할 경우 2.5G의 경우 16,000ps/nm, 10G의 경우 1000ps/nm, 40G의 경우는 60ps/nm로 급격히 감소하므로 전송시 반드시 색분산에 대한 보상이 필요하다. 흔히 사용되는 분산보상광섬유는 여러 파장을 동시에 보상할 수 있는 장점은 있지만, 광선로가 갖는 분산기울기를 정확히 보상하지 못하므로 수십~수백 채널이 여러 단의 DCF를 거칠 경우 최종 수신단에서 채널별로 겪는 분산값이 달라지므로 망을 정확히 설계하기 위해서는 분산기울기에 대한 보상도 필요하다.

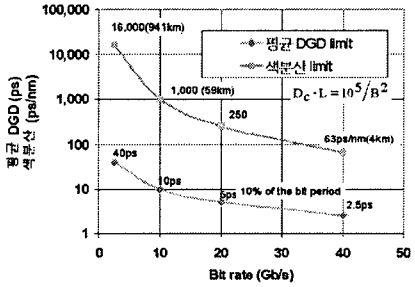

그림 5 전송속도별 색분산과 편광모드 분산 허용치

편광모드분산과 달리 채널 당 속도가 증가할 경우 색분산에 의한 영향을 줄이기 위해 단순히 광섬유의 분산값을 매우 낮게 가져가는 것은 어렵다. 왜냐하면, 라만 증폭기를 사용하지 않을 경우 전송속도가 증가됨에 따라 광수신기는 더욱 높은 OSNR을 요구하고 그에 따라 광선로에 입력되는 광신호의 세기는 더욱 커져야 되므로 광선로가 갖는 분산값이 작으면 비선형에 의한 전송성능 저하가 나타날 수 있기 때문이다. 따라서, 초고속 대용량 전송을 하기 위해 광선로는 적절한 분산값을 가져야 하고 그에 따른 분산보상과 분산기울기 보상, 즉 분산관리가 반드시 필요하게 된다.

분산관리 방법의 기본 원리는 비선형에 의한 신호 왜곡을 줄이기 위해 스팬간의 로컬 분산은 크게 하고, 전송로의 총 분산값은 줄여 분산에 의한 패널티를 감소시키는 것이다. 흔히 사용되는 방법으로는 광선로와 반대의 분산값을 갖는 분산보상광섬유를 주기적으로 사용하는 방법과, 광선로 자체를 서로 다른 유효 단면적과 반대의 분산값을 갖는 광섬유를 사용하여 하이브리드 형으로 만드는 방법이 있다. 전자의 경우 분산기울기 보상이 필요하고, 후자의 경우 망이 재구성되거나 보호 절체시 시스템이 분산에 대한 충분한 마진을 가져야 되므로 기포설된 광선로에는 적용하기 어려운 단점이 있지만 라만 증폭효율을 높일 수 있는 장점을 갖고 있다.

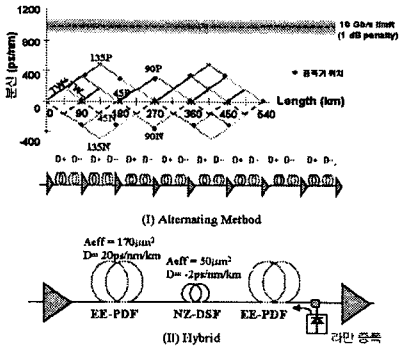

그림 6 분산관리 방법

초고속 대용량 WDM 장치가 설치된 선로의 일부 구간이 지장이전이나 새로운 광케이블로 대개체될 경우, OXC의 도입으로 파장단위 회선분배나 절체가 이루어져 광경로가 유동적으로 변할 경우, 채널 속도가 40Gbit/s 이상으로 고속화되어 온도에 따른 광섬유의 미세한 분산값 변화가 시스템의 허용 분산값에 영향을 주는 경우, 채널 단위의 분산관리가 필요하며 이를 위해서는 가변 분산보상법이 필요하다.

3. 결 론

본 논문에서는 WDM 기반 초고속 대용량 광전송망 구축에 필요한 광전송 기술인 변조포맷, 라만 증폭, FEC, 분산관리기술 동향을 살펴보았다. 이러한 기술을 이용한 수 십 테라급의 전송이 실험실 수준에서는 이미 가능하지만, 직접 기간망을 구축하는데 적용하기에는 시기적으로 이르다는 견해가 지배적이다. 그러므로, 통신사업자 측면에서는 초고속 대용량 광전송 기술에 대한 충분한 이해를 갖고 사업적용 영역에 따른 경세성을 파악하고 사용자 요구사항을 정립하는 것이 바람직하다.

[참 고 문 헌]

[1] Fabrizio Forghieri, "RZ versus NRZ in nonlinear WDM system", IEEE *Photon. Technol. Lett.*, vol.9, no. 7, pp. 1035, 1997

[2] Akihide Sano et al, "Performance Evaluation of Prechirped RZ and CS-RZ Formats in high speed transmission systems with dispersion management", *J. Lighitwave Technol.*, vol. 19, no. 12, pp. 1864, 2001

[3] Takashi Ono, "Characteristics of optical duobinary 냥뭔 in Terabit/s capacity, high-spectral efficiency WDM systems", J. Lightwave Technol., vol. 16, no. 5, pp. 788, 1998

[4] Ken-ichi Kitayama, "Highly spectrum efficient OFDM/PDM wireless networks by using Optical SSB modulation", *J. Lighitwave Technol.*, vol. 16, no. 6, pp. 969, 1998

[5] R. Noe et al , "Crosstalk detection schemes for polarization divisiom multiplex transmission", *J. Lighitwave Technol.*, vol. 19, no. 10, pp. 1469, 2001