

WDM/SCM-PON의 상향 전송에서 헤테로다인 방식을 이용한 공간섭잡음 문제 극복방안 연구

정회원 전 유 찬*, 신 홍 석**, 종신회원 박 진 우*

Overcoming OBI Problem by Means of Heterodyne Detection in Upstream Transmission of WDM/SCM-PON

Youchan Jeon*, Hongseok Shin** *Regular Members*, Jinwoo Park *Lifelong Member*

요 약

WDM/SCM-PON에서 상향 전송을 할 때 다수의 ONU가 단일 광 채널을 공유하여 다수의 신호를 전송할 경우 수신부에서 잡음으로 작용하는 OBI가 발생하게 되어 전체 시스템의 성능을 악화시키기 때문에 OBI에 대한 문제 해결이 필수적인 과제이다. 본 논문은 SCM-PON에서 상향 전송을 할 때 발생하는 OBI를 헤테로다인 검출 방식으로 극복하는 새로운 방안을 제시하였다. 제안된 방식은 수신 광검출기 앞부분에 별도의 LD를 사용하여 heterodyne detection을 가능케 함으로써, OBI 성분을 검출신호와 구분되도록 하여 OBI로 인한 문제를 해결하는데 근거를 두고 있다. 또한, 가입자단에서 R-SOA를 사용함으로써 경제적인 저가형 ONU 구현을 가능케 하는 장점을 갖는다.

Key Words : PON, WDM, SCM, R-SOA, heterodyne detection

ABSTRACT

The performance of upstream transmission in SCM-PON is generally limited by the presence of OBI which is caused by the beating of two or more lasers. In this paper, we propose a novel approach for reducing OBI problem by using heterodyne detection with an additional LD as a local oscillator, resulting that the RF signal is shifted to the other spectral band. In addition, it is possible that the proposed method can provide the cost-effective solution thanks to the loop-back mechanism using R-SOA in ONU. The performance is superior when the spectral width of LD is smaller and the power difference between the transmission LD and the oscillation LD is bigger. System configuration and design consideration are discussed. Performance of the systems is evaluated by simulator called OptSim. It is expected to provide WDM/SCM-PON system not only cost-effective but also efficient in increasing the number of subscribers.

I. 서 론

최근 가입자망 분야는 더욱 다양해진 서비스 요구 및 대역폭의 증가수요로 인해 초고속 가입자망

이 아파트와 주택을 중심으로 적극적으로 도입되고 있다. 초고속 가입자망의 대표적인 기술로는 passive optical network (PON), active optical network (AON) 그리고 digital subscriber loop (DSL) 등이

* 본 연구는 the IR R&D program of MKE/IITA. [2008-F015-02, Research on Ubiquitous Mobility Management Methods for Higher Service Availability]와 서울시 Bell Lab in Seoul 프로젝트로 지원되었습니다.

* 고려대학교 전기전자전파공학과 통신네트워크 연구실 (ycjeon@korea.ac.kr), ** 삼성전자 DMC연구소
논문번호 : KICS2009-11-558, 접수일자 : 2009년 11월 3일, 최종논문접수일자 : 2010년 2월 10일

있다. 특히, PON 기술은 수송소자를 기본으로 구성되어 단순한 망구성과 통신망의 유지보수 비용을 절감할 수 있는 기술로 인정받고 있다¹⁾.

PON 기반의 초고속 광가입자망은 크게 time division multiplexing (TDM), subcarrier multiplexing (SCM) 그리고 wavelength division multiplexing (WDM)로 구분된다. TDM-PON은 하나의 파장을 여러 가입자가 동시에 공유하는 구조로써 전력 예산 산출, 채널의 보안성 문제, 상향 데이터 전송에서의 가입자들간의 충돌 문제를 해결해야 하고 각 가입자의 속도를 합한 만큼의 속도로 각 optical network unit (ONU)가 동작해야 하기 때문에 복잡한 media access control (MAC) 프로토콜이 필요하다. 이에 비해, 각각의 가입자에게 부반송파 다중방식을 이용하여 RF채널을 할당하는 SCM-PON은 TDM-PON에서 요구되는 정확한 동기화가 필요 없으며, 다른 가입자의 접속에 영향을 받지 않고, 오버헤드의 증가에 대한 부담이 없다는 점에서 TDM-PON에 비해 우위를 지니고 있다²⁾. 하지만, SCM-PON은 TDM-PON과는 달리 상향 전송 시 optical beat interference (OBI)라는 현상으로 인해 시스템 성능 저하를 유발시키는 단점이 있다. 현재 TDM-PON과 SCM-PON은 독립적인 상용화 PON 기술로 발전하고 있으나 PON 성능의 현격한 증가가 요구될 경우에 성능향상에 대한 경비규모의 급증으로 확장이 제한될 수 있다. 따라서, 각각의 가입자에게 하나의 전용파장을 할당해 주는 WDM-PON이 궁극적인 PON 기술로 대두되고 있다. WDM-PON은 ONU마다 상향과 하향 전송채널에 특정한 파장을 할당하여 optical line terminal (OLT)와 ONU간에 점대점 (point-to-point) 전송이 이루어지도록 하는 방식이다³⁾. 그러나, ONU의 수에 비례하여 파장의 수를 증가시켜야 하며, ONU의 수와 같은 수의 파장을 처리해야 하는 고가 및 고성능의 광파장 다중화/역다중화 장치가 필요하다. 또한, OLT와 ONU의 전송속도는 양쪽 부분에 위치하는 광 트랜시버 (transceiver)의 성능에 의하여 결정되므로, 가시적인 미래 시점에서 발생할 것으로 기대되는 가입자망 서비스 요구수준에 비하여 성능 대비 경제성이 미흡하다는 점이 지적될 수 있다.

본 논문에서는 WDM-PON에서 하나의 ONU에 하나의 특정파장을 할당하는 대신에, 각 파장에 SCM방식을 적용하여 다수의 radio frequency (RF) 채널을 구현함으로써, 경제적인 SCM 기반의 WDM-PON의 활용방안을 모색하고자 한다. 기존의

SCM-PON 또는 WDM/SCM-PON에서 상향 전송 시 여러 개의 ONU들이 하나의 파장과 광수신기를 공유함으로써 수신부에서 OBI 현상이 발생하게 되어 시스템 성능을 저하시키는 심각한 문제를 지니고 있다. 지금까지 WDM/SCM-PON에서 발생하는 OBI 문제를 개선하기 위해 변조지수를 이용한 방법, 위상 변조를 이용한 방법, clipping-tone 주파수를 이용한 방법, LED를 이용한 방법, 그리고 RF 조정신호를 이용한 방법 등이 제안되었다^{4)~8)}.

본 논문에서는 OBI로 인한 문제를 극복할 수 있을 뿐만 아니라, 수용 가능한 ONU를 증가시킬 수 있는 새로운 방안을 제시하고 제안된 방식에 대한 성능 분석을 하고자 한다. 2장에서는 기존의 WDM/SCM-PON과 OBI의 발생 원리를 파악하고 SCM-PON 또는 WDM/SCM-PON에서의 OBI의 영향을 살펴보았다. 3장에서는 헤테로다인 검출 방식을 이용하여 OBI 문제를 극복하고 가입자 수를 확장할 수 있는 방안을 제시하였다. 4장에서는 제안된 방식에 대한 모의실험을 통해 성능 분석을 하였고, 끝으로 5장에서는 제안된 방식에 대한 결론을 맺는다.

II. 기존의 WDM/SCM-PON 구조와 OBI 발생 원리

WDM/SCM-PON은 파장 분할 다중화 방식에 각 파장당 여러 개의 부반송파를 적용하여 WDM-PON보다 효율적으로 대역폭을 이용하고 최대 수용 가능한 가입자 수를 증가시킬 수 있는 전송방식이다. 그림 1은 일반적인 WDM/SCM-PON의 구조를 보여준다. OLT에서 부반송파, f_1, \dots, f_n 를 각 파장별로 전송하고 ONU에서는 할당된 파장의 부반송파 채널을 통해 데이터를 수신하게 된다. ONU는 할당된 부반송파 주파수와 파장을 이용하여 데이터를 보내고 각 ONU들로부터의 데이터는 할당된 파장

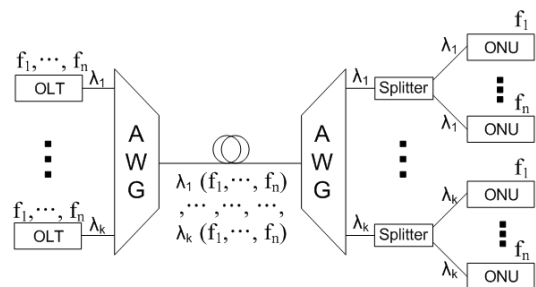


그림 1. 일반적인 WDM/SCM-PON 구조

별로 OLT에서 수신하게 된다. ONU로부터 OLT로 상향전송을 하는 경우 단일 LD를 사용하는 하향전송과는 달리 동일한 파장을 여러 ONU들이 공유하게 된다. 이와 같은 경우, ONU의 송신용 laser diode가 온도에 따른 민감도 (sensitivity)가 높고 각 ONU마다 상이한 전송 거리에 의한 분산 정도 차이로 인해, 수신 측 OLT에서는 완전히 일치하는 파장이 수신되기가 어렵다. 이로 인해 발생하는 OBI가 동일한 파장을 여러 ONU들이 공유하는 형태인 SCM-PON 또는 WDM/SCM-PON에서 신호 대역에 발생하게 되어 신호 대 잡음비를 크게 저하시키는 작용을 하게 된다.

OBI는 동일한 광 채널에 두 개 이상의 서로 다른 파장을 지닌 광원이 동시에 전송되어 square-law 특성을 지니는 광수신기 (PD)에 수신될 때 발생한다. 광신호의 세기 (intensity)가 전류 (photocurrent)에 비례하기 때문에 수신 과정에서 각각의 광신호의 파장 차이에 해당하는 cross-mixing 신호가 발생한다⁴⁾.

광수신기에 입력된 M개의 광 신호를 각각 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_M$ 라고 할 때, PD에 입사된 총 광 신호 ϵ 는 M개의 광 신호의 합과 동일하다. 그리고 PD에 의해 검출된 전류인 $i(t)$ 는 광 신호의 세기인 $I(t)$ 에 비례하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다⁹⁾.

$$i(t) = R \cdot I(t) = R \cdot L\{\epsilon^2(t)\} \quad (1)$$

여기서, ϵ 는 optical field이고 R 은 detector responsivity, L 은 low-pass operator를 의미한다. 상호 독립적인 single mode laser로부터의 M개의 광 신호 중에서 $\omega_{01}/2\pi, \omega_{02}/2\pi$ 의 주파수를 지니는 두 신호가 광수신기에 입사될 때, 광신호의 세기가 광 신호의 제곱에 비례하므로 식 (1)에 의해서 식 (2)를 유도할 수 있다.

$$I(t) = I_1(t) + I_2(t) + I_x(t) = I_1(t) + I_2(t) + 2\sqrt{I_1(t)I_2(t)} \cos[(\omega_{01} - \omega_{02})t + \psi_1(t) - \psi_2(t)] \cos\theta_{12} \quad (2)$$

여기서, I_1, I_2 은 각각 optical field의 세기, θ_{12} 은 두 field의 편광 각도 차이, I_x 은 beating 신호의 세기를 나타낸다. 그림 2는 OBI 현상을 도식화한 것으로 서로 다른 파장을 지닌 두 개의 광원이 광수

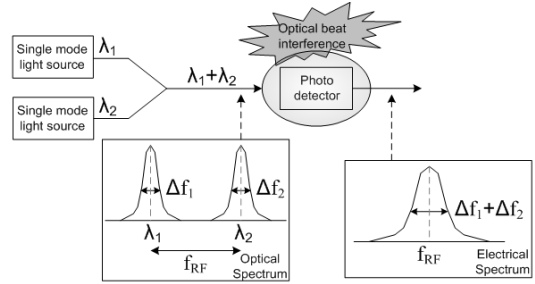


그림 2. OBI 발생 원리

신기로 동시에 수신될 때, 수신되기 전과 후의 스펙트럼을 보여준다. 두 개의 광원이 광수신기로 수신된 후 beating 신호는 두 광원의 파장 간의 차이인 f_{RF} 에서 발생하게 된다. Random process의 특성을 지닌 광 신호의 위상으로 인해 식 (2)의 auto-correlation을 이용하여 power spectral density (PSD)를 구할 수 있다. 그러므로 식 (2)의 PSD는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_I(f) = S_{I_1}(f) + S_{I_2}(f) + L\{4S_{\epsilon_1}(f) \otimes S_{\epsilon_2}(f)\} \cos^2\theta_{12} \quad (3)$$

$S_{I_1}(f), S_{I_2}(f)$ 은 $I_1(t), I_2(t)$ 의 PSD, $S_{\epsilon_1}(f), S_{\epsilon_2}(f)$ 은 optical field의 PSD, L 은 low-pass operator를 뜻한다. 식 (3)의 첫 번째와 두 번째 항은 각각의 광원에서 출력된 광 신호들의 PSD를 나타내고, 세 번째 항은 optical beating에 의해 생성된 스펙트럼을 나타낸다. 세 번째 항에서 보듯이 OBI의 전력 스펙트럼은 그림 2와 같이 각 광 신호의 전력 스펙트럼의 convolution이다. 즉, OBI로 인해 발생된 신호의 스펙트럼 폭은 두 광 신호의 스펙트럼 폭의 합과 동일하다. 그러므로, 기존의 WDM/SCM-PON에서 상향 전송시 검출된 신호대역에 OBI 신호가 발생되게 되는 경우 신호 검출이 어렵게 된다.

III. 제안된 WDM/SCM-PON 구조

본 논문에서는 기존의 WDM/SCM-PON이 지니고 있는 OBI 문제를 해결하기 위해서 헤테로다인 검출 방식을 이용하였다. 그림 3은 헤테로다인 검출 방식이 적용된 새로운 WDM/SCM-PON 구조를 보여주고 있다. 제안된 방식은 OLT로부터 하향 전송

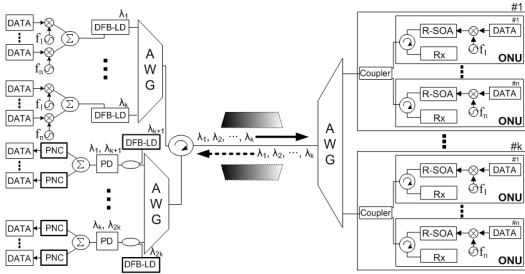
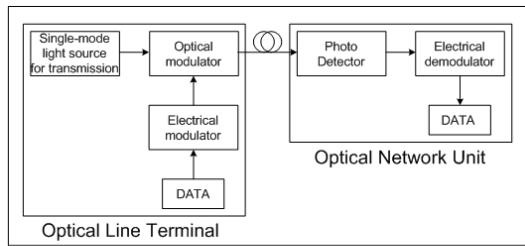


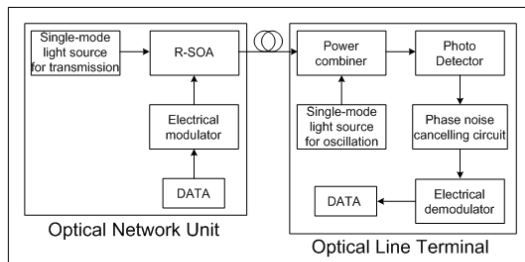
그림 3. 제안된 WDM/SCM-PON 구조

된 광 신호를 ONU에서 R-SOA를 이용하여 재변조시켜 상향 전송하는 기술을 사용하였다¹⁰⁾. R-SOA는 낮은 전류로 큰 이득을 얻을 수 있기 때문에 변조에 쓰이는 동작전류 값을 크게 줄일 수 있고, 입력신호의 파워가 낮아도 높은 이득을 제공할 수 있다. 또한, ONU단에 R-SOA를 변조기로 사용함으로써 별도의 light source가 필요 없고 시스템이 간단하면서 TO-can 형태의 package 제작이 가능하기 때문에 가입자를 위한 저가 시스템 구현이 가능하다¹¹⁾.

그림 4는 제안된 방식을 하향 전송과 상향 전송으로 나누어서 나타낸 블록다이어그램을 보여준다. 하향 전송 구조에서 송신부는 광원 (single-mode light source), 광변조기 (optical modulator), 전기변



(a)



(b)

그림 4. 제안된 방식의 하향 전송(a)과 상향 전송(b) 기술의 블록다이어그램

조기 (electrical modulator)로, 수신부는 광수신기 (photo detector), 전기복조기 (electrical demodulator)로 구성되어 있다. 상향 전송 구조에서는 송신부는 광원 (single-mode light source), 반사형 반도체 광증폭기 (reflective-semiconductor optical amplifier; R-SOA), 전기변조기 (electrical modulator)로, 수신부는 전력결합기 (optical power combiner), 광원 (single-mode light source), 광수신기, 위상잡음제거 회로 (phase noise cancelling circuit), 전기복조기 (electrical demodulator)로 이루어져있다. 하향 전송을 할 때는 전송하고자 하는 데이터를 전기변조기로 주파수 변환을 시키고 변조된 데이터를 이용하여 광원을 광변조기로 변조시킨 후 전송하게 된다. 이렇게 전송된 데이터는 수신부의 광수신기에서 수신하여 전기복조기로 복조시켜서 받고자 하는 데이터를 얻게 된다. 상향 전송의 경우는 OLT로부터 수신된 광원을 R-SOA를 이용하여 전기적으로 변조된 새로운 데이터로 재변조시켜서 전송하게 된다. 전송된 데이터를 광수신기에서 수신할 때, 발진용 광원(oscillation LD)을 새로 추가하여 송신용 광원 (transmission LD)와 발진용 광원이 동시에 수신되는 헤테로다인 검출 방식이 적용되도록 한다. 그림 5는 상향 전송을 할 때, 광수신기로 수신 되기 전의 광 스펙트럼을 보여준다. 여기서 f_{c1} 은 송신용 광원의 주파수, f_{c2} 는 발진용 광원의 주파수, f_d 는 송신용 광원과 발진용 광원의 주파수 간격을 가리킨다. 신호가 헤테로다인 검출 방식을 이용하여 광수신기로 수신 후 그림 6 (a)의 회로를 이용하여 광

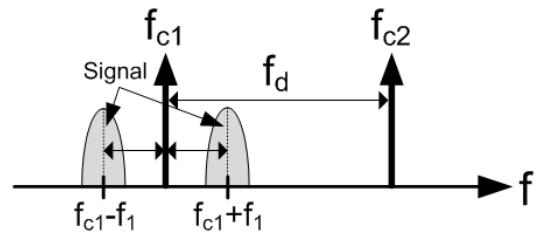


그림 5. 광검출기로 수신되기 전의 스펙트럼

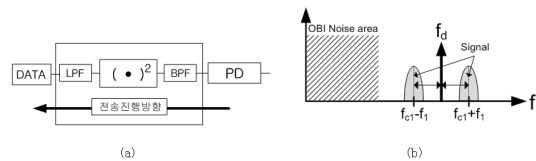


그림 6. 위상잡음제거회로 (a)와 광검출기로 수신된 신호의 스펙트럼 (b)

위상 잡음의 제거와 함께 데이터를 얻을 수 있다. 그림 6 (a)의 회로는 bandpass filter (BPF)를 이용하여 추출하고자 하는 주파수 영역을 filtering하고 그 신호를 envelope detection을 한 후 마지막으로 lowpass filter (LPF)를 이용하여 원하는 baseband 신호를 검출하는 역할을 한다[12]. 그림 6 (b)는 광 수신기로 수신된 신호의 스펙트럼을 보여준다. OBI 잡음 영역은 ONU의 송신용 laser diode의 온도에 대한 민감도와 각 ONU마다 상이한 전송 거리에 의한 분산 정도 차이로 완전히 일치하는 파장 수신이 어렵기 때문에 항상 존재하게 된다. 데이터를 가진 신호는 OBI 잡음 영역과 일정한 간격을 유지하도록 송신용 광원의 주파수와 발진용 광원의 주파수의 차이(f_d)만큼 떨어진 위치에 발생하게 된다.

IV. 모의실험을 통한 성능 분석

본 논문에서는 그림 3처럼 OLT 송신부의 LD, $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ 이 ONU의 R-SOA를 거쳐 OLT 수신부에 이를 때, OLT 수신부의 광수신기 앞에 새로운 LD, $\lambda_{k+1}, \dots, \lambda_{2k}$ 를 추가하여 동시에 수신되게 하는 헤테로다인 검출 방식을 이용함으로써 OBI로 인한 신호 검출 문제를 해결할 수 있는 새로운 방식을 제안하였다. 또한, 제안된 방식은 R-SOA를 이용한 Loop-back 방식을 이용하여 ONU에서 별도의 light source가 필요 없고 가입자들에게 저가의 모뎀 공급이 가능하다는 장점이 있다. 본 절에서는 OptSim 툴을 이용하여 제안된 방식의 성능을 분석하고자 한다. 제안된 방식의 성능에 영향을 미치는 요소인 송신용 광원의 linewidth와 파워, 그리고 OLT 수신부의 광수신기 앞에 추가되는 발진용 광원의 파워가 변함에 따라 변화하는 전송 성능을 분석하고 그 결과를 바탕으로 할당된 파장 별로 ONU의 수를 증가시키므로써 최대 수용 가능한 ONU 수를 분석하고자 한다.

우선 OLT의 송신용 광원과 발진용 광원간의 상관 관계를 알아보기 위해서 사용된 파라미터는 표 1과 같다. Data rate이 100 Mbps, 변조 방식 ASK, λ_1 의 파장 1553.73 nm, λ_{k+1} 의 파장 1553.65 nm, 전송 매체는 single-mode fiber이다. 그림 7은 λ_1 과 λ_{k+1} 의 파워의 차이에 따른 BER에 대한 결과이다. 결과에서 보여주듯이 λ_{k+1} 의 파워가 λ_1 의 파워보다 클수록 BER 특성이 향상됨을 알 수 있다. linewidth가 5, 10, 15 MHz 경우 송신용 광원과 발

표 1. 시뮬레이션 파라미터

| Parameter | Value |
|------------------------------|-------------------------|
| Data rate | 100 Mbps |
| Modulation index | 100 % |
| Modulation scheme | ASK |
| Wavelength of LD1 | 1553.73 nm (192.95 THz) |
| Wavelength of LD2 | 1553.65 nm (192.96 THz) |
| Responsivity of PD | 0.83 A/W |
| Distance between OLT and ONU | Max 25 km |

진용 광원 간의 파워 차이가 각각 21 dB, 15 dB, 0 dB 이상일 때 최대 성능을 보장할 수 있다. 그리고 10^{-9} 의 BER을 만족시키기 위해서는 광원의 linewidth가 5 MHz와 10 MHz일 때, 광원 간의 파워 차이가 각각 -12 dB, -7 dB 이상이어야 하고 광원의 linewidth가 15 MHz인 경우는 10^{-9} 의 BER을 만족시키지 못하였다. 그림 8은 광원의 linewidth에 따른 BER의 특성 결과를 보여준다. 광원간의 파워비는 그림 7의 결과에 의해서 광원의 linewidth가 10 MHz일 때, 최대 성능을 보장할 수 있는 15 dB로 설정하였다. 모의실험 결과 ONU의 수가 증가할수록 linewidth가 좁은 광원이 요구된다. ONU의 수가 5, 10, 15인 10^{-9} 의 BER을 만족시키기 위해서 각각 13, 7.5, 6 MHz의 linewidth가 요구되었다. 그림 9는 가입자 수의 증가에 따른 BER 특성을 보여준다. 사용된 파라미터는 표 1과 동일하다. 광원간의 파워비는 15 dB로 설정하였다. Linewidth가 10과 15 MHz인 경우 10^{-9} 의 BER을 만족시키기 위해서는 각각 최대 7과 4 가입자가

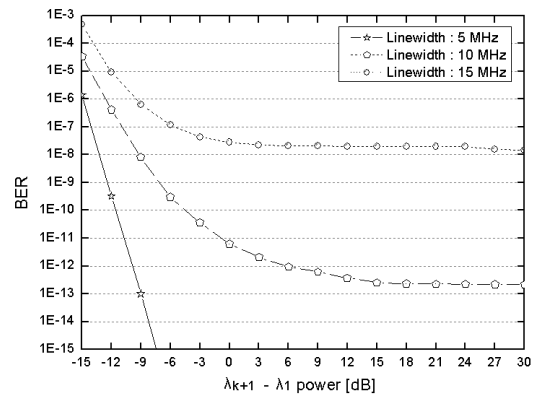


그림 7. 송신용 광원과 발진용 광원간의 파워비에 따른 BER

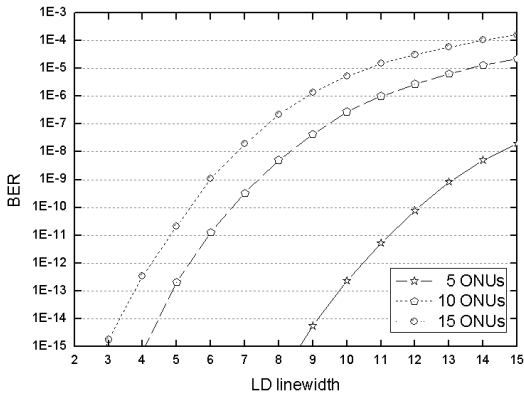


그림 8. 광원의 linewidth에 따른 BER

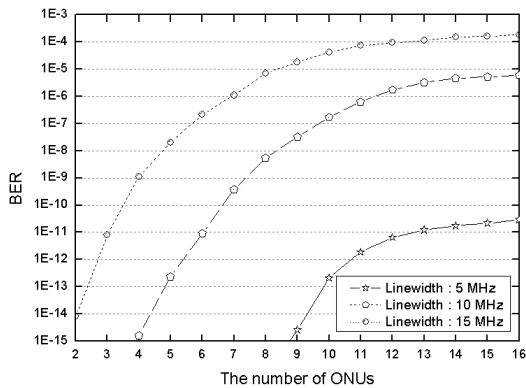


그림 9. ONU 수에 따른 BER

지 수용 가능하였고 linewidth가 5 MHz인 경우는 가입자 수에 상관 없이 10^{-9} 의 BER을 만족시켰다.

V. 결론

본 논문에서는 다수의 ONU가 단일 광 채널을 함께 공유하는 WDM/SCM-PON에서 상향 전송을 할 때 수신부에서 잡음으로 작용하는 OBI 신호들로 인한 시스템 성능 저하 문제를 개선하기 위해 헤테로다인 검출 방식을 이용한 WDM/SCM-PON 구조를 제안하였다. 제안된 방식은 광수신기 앞부분에 별도의 광원을 사용하여 heterodyne detection을 가능케 함으로써, OBI 성분을 검출신호와 구분되도록 하여 OBI로 인한 문제를 해결하는데 근거를 두고 있다. 결과적으로 OBI로 인한 신호 검출 문제를 해결하기 위해 제안된 헤테로다인 방식을 이용한 WDM/SCM-PON 구조에서 수용 가능한 가입자 수를 증가시키기 위해서는 송신용 광원과 발진용 광

원의 파워 차이가 크고 좁은 linewidth를 제공할 수 있어야 한다는 것을 모의 실험을 통해 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] K. S. Kim, "On the evolution of PON- based FTTH solutions," *Inform. Sci.*, Vol.149/1-2, pp. 21-30, Jan. 2003.
- [2] C. Sierens *et al.*, "Subcarrier multiple access for passive optical networks and comparison to other multiple access techniques," in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom 1991)*, pp.619-623, Dec. 1991.
- [3] F. T. An *et al.*, "Evolution, challenges and enabling technologies for future WDM-based optical networks," in *Proc. of Joint Conf. on Information Sciences (JCIS 2003)*, Sept. 2003.
- [4] N. K. Shankaranarayanan, S. D. Elby, and K. Y. Lau, "WDMA/subcarrier-FDMA light-wave networks: Limitations due to optical beat interference," *J. Lightw. Technol.*, Vol.9, No.7, pp.931-943, Jul. 1991.
- [5] M. M. Banat and M. Kavehrad, "Reduction of optical beat interference in SCM/WDMA networks using pseudorandom phase modulation," *J. Lightw. Technol.*, Vol.12, No.10, pp. 1863-1868, Oct. 1994.
- [6] S. L. Woodward, X. Lu, T. E. Darice, and G. E. Bodeep, "Reduction of optical-beat interference in subcarrier networks," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.8, No.5, pp.694-697, May 1996.
- [7] R. D. Feldman, K. Y. Liou, G. Raybon, and R. F. Austin, "Reduction of optical beat interference in a subcarrier multiple-access passive optical network through the use of an amplified light-emitting diode," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.8, No.1, pp.116-118, Jan. 1996.
- [8] H. D. Jung, Y. Y. Won, and S. K. Han, "Optical beat reduction in WDM-SCM access networks using modulated optical pulse train," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol.17, No.10, pp. 2215-2217, Oct. 2005.

[9] T. H. Wood and N. K. Shankaranarayanan, "Operation of a passive optical network with subcarrier multiplexing in the presence of optical beat interference," *J. Lightw. Technol.*, Vol.11, No.10, pp.1632-1640, Oct. 1993.

[10] H. Takesue and T. Sugie, "Wavelength channel data rewrite using saturated SOA modulator for WDM networks with centralized light sources," *J. Lightw. Technol.*, Vol.21, No.11, pp.2546-2556, Nov. 2003.

[11] J. J. Koponen and M. J. Soderlund, "A duplex WDM passive optical network with 1:16 power split using reflective SOA remodulator at ONU," in *Proc. Opt. Fiber Commun. (OFC 2004)*, Vol. 1, Paper MF 99, Feb. 2004.

[12] W. C. Kwong, P. R. Prucnal, and M. C. Teich, "Coherent subcarrier fiber-optic communication systems with phase-noise cancellation," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.42, No.6, pp.2208-2212, Jun. 1994.

전 유 찬 (Youchan Jeon)

정회원



2004년 2월 고려대학교 전자정보공학과 학사

2006년 2월 고려대학교 통신시스템학과 석사

2005년 11월~2008년 4월 지식경제부 산하 한국산업기술시험원 연구원

2007년 9월~현재 고려대학교 전자공학과 박사과정
<관심분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

신 흥 석 (Hongseok Shin)

정회원



1996년 2월 부산대학교 전자공학과

1998년 2월 코넬대학교 전자공학과 석사

1998년 3월~2001년 삼성전자 통신연구소 선임연구원

2001년~2002년 TyCom Lab,

Senior Member of Technical Staff

2002년~현재 삼성전자 DMC연구소 책임연구원
<관심분야> 전자공학, 통신공학, 광통신 공학

박 진 우 (Jinwoo Park)

종신회원



1979년 2월 고려대학교 전자공학과 학사

1987년 11월 버지니아공대 전기 전자공학 박사

1989년 3월~현재 고려대학교 전기전자전파공학과 교수

<관심분야> Optical networks, Wireless IP networks, IP mobility