

광 이중 측파대 변조 방식과 16 QAM 신호를 이용한 부반송파/파장 분할 다중화 시스템의 성능 분석에 대한 연구

Investigation of Performance Limitations of SCM/WDM Systems Using Optical DSB Modulation and 16 QAM Signals

김경수 · 이재훈 · 정지채

Kyoung-Soo Kim · Jae-Hoon Lee · Ji-Chai Jeong

요 약

본 논문에서는 광 이중 측파대역 변조 방식과 16 QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 신호를 이용한 부반송파/파장 분할 다중화 시스템의 성능을 부반송파 채널 간격, 누화 전력량(crosstalk power), BER(Bit-Error Rate) 특성을 통해 연구하고 있다. 광 전송 링크에서 분산 특성과 자기 위상 변조, 상호 위상 변조와 같은 비선형 현상을 고려하였을 때 BER 특성을 살펴보았다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과, 부반송파/파장 분할 다중화 시스템의 성능을 결정짓는 주도적인 인자는 마흐-젠더 변조기의 비선형 특성과 부반송파 채널 간격으로 관찰되었다. 광섬유의 분산에 의한 영향만 고려했을 때는 전송거리가 증가함에 따라 높은 주파수에 있는 부반송파 채널의 BER 성능이 나빠졌으나, 분산과 비선형 효과를 함께 고려되었을 경우 광섬유에 입사하는 전력이 클 때 높은 주파수에 있는 부반송파 채널에서 약간의 BER 성능 향상을 확인할 수 있었다.

Abstract

In this paper, we investigate the performance limitations of SubCarrier Multiplexed(SCM) WDM systems using optical Double-Side Band(DSB) modulated 16 QAM signals. The Bit-Error Rate(BER) performance is evaluated under various optical transmission links including the effects of the dispersion and fiber nonlinearities such as SPM(Self-Phase Modulation) and XPM(cross-phase modulation). After simulation of SCM-WDM systems, the dominant factors determining the entire system performance are appeared to be the nonlinearity of MZ(Mach-Zehnder) modulator and the SCM channel spacing. The BER performance of subcarrier channels in the higher frequencies was degraded with the large dispersion effect only, however, the performance was improved a little with a combined effect of fiber dispersion and nonlinear effect when the high fiber launching power was applied.

Key words : Optical DSB, QAM, Sub-Carrier Multiplexing, WDM

I. 서 론

최근 사용자들의 데이터 이용량이 급증함에 따라 늘어나는 대역폭에 대한 요구를 충족시키고자 FTTH(Fiber-To-The-Home) 기술이 많은 관심을 받고

있다^[1]. 그 중에서도 WDM-PON(Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network)은 가입자 별로 파장을 독립적으로 할당하여 전송로를 구성하는 방식으로 전송 프로토콜에 관계없이 전송이 가능하고, 전용선 수준의 대역폭 제공, 전송속도의 제한이 없

「본 연구는 한국학술진흥재단이 주관하는 2008년도 「BK21 사업」의 「고려대학교 소프트웨어 산학연 공동사업단」의 지원에 의하여 수행되었습니다.」

고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과(Department of Computer and Radio Communications Engineering, Korea University)

· 논문 번호 : 20081022-131

· 수정완료일자 : 2008년 12월 9일

며, 서비스 품질을 보장하고, 보안성이 뛰어난 차세대 FTTH 기술로 평가를 받고 있다. 이러한 WDM-PON 기술은 부반송파 다중화(SubCarrier Multiplexing: SCM) 기술과 결합하여 더 많은 사용자를 수용하고 대역폭의 효율을 높일 수 있는데^[2], 최근에는 단일 측파 대역 광 변조 방식(Optical Single Side-Band: OSSB)을 사용하는 부반송파/파장 분할 다중화 시스템(SCM/WDM system)에 대한 연구가 많이 이루어졌다^{[3]~[5]}. 이러한 단일 측파 대역 변조 방식을 사용하면 광섬유에서 일어나는 분산 특성에 의한 파워 페이딩(power fading) 특성에 대한 영향을 줄일 수 있는 장점이 있지만 송신부에서의 구현의 복잡도와 가격 효율성에서 문제점을 가질 수 있다.

본 논문에서는 광 이중 측파 대역 변조 방식과 16 QAM(Quadrature Amplitude Modulation) 신호를 이용한 부반송파/파장 분할 다중화 시스템의 성능을 부반송파 채널 간격, 누화 전력량, BER 특성을 통해 연구하였다. 광 전송 링크에서 분산 특성과 자기 위상 변조, 상호 위상 변조와 같은 비선형 현상을 고려하였을 때 BER 특성을 살펴봄으로써 부반송파/파장 분할 다중화 시스템의 성능을 결정 짓는 주도적인 요소를 찾아가 시도하였다.

II. 부반송파/파장 분할 다중화 시스템의 모델링 및 구성

부반송파/파장 분할 다중화 시스템의 시뮬레이션을 위하여 연구실에서 자체적으로 개발한 시뮬레이션 툴(photonics CAD)이 사용되었다. 사용된 시뮬레이션 툴은 시스템을 이루는 각 소자들이 정확한 수학적 모델링으로 구현되어 있으며, 시뮬레이션은 각 소자들을 실제 시스템 구조에 따라서 연결함으로써 이루어졌다^{[6],[7]}. 광섬유 채널에 대한 모델링에서 광신호가 비선형성, 분산 특성, 손실 특성을 갖는 단일 모드 광섬유 안에서 전파되는 것을 표현하기 위해서 식 (1)과 같은 비선형 슈뢰딩거 방정식(non-linear Schrödinger equation)이 사용되었는데, 느리게 변화하는 전기장 펄스 포락선은 다음과 같이 나타낼 수 있다^[8].

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\beta_1 \frac{\partial A}{\partial t} - \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} - \frac{\alpha}{2} A + i\gamma |A|^2 A \quad (1)$$

여기서 A 는 느리게 변화는 포락선 함수의 크기이며, β_1 은 역 군속도, β_2 와 β_3 은 각각 1차, 2차 군속도 분산, α 은 흡수 계수, 그리고 N_2 가 비선형 계수, A_{eff} 가 광섬유 코어의 유효 면적일 때 $r(=N_2 \overline{\omega}/cA_{eff})$ 은 비선형성 계수를 나타낸다. 펄스 포락선 A 는 $|A|^2$ 가 광 전력을 나타낼 수 있도록 표준화(normalize) 되었다. 비선형 슈뢰딩거 방정식은 Split-Step Fourier Method(SSFM)을 이용하여 해를 구할 수 있다^[8]. 이중 전극 구조(dual-electrode)를 고려한 송신부의 마흐-젠더(Mach-Zehnder) 외부 변조기의 광 세기 전달 함수(optical intensity transfer function)는 식 (2)와 같이 모델링 되었다.

$$\frac{P_{opt,out}(t)}{P_{opt,in}} = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \pi \frac{2u(t)}{V_\pi} \right) \quad (2)$$

여기서 $P_{opt,in}(=E^2_{in})$ 변조에 인가되는 입력 광 전력이고, $P_{opt,out}$ 은 변조기의 출력 광 전력, V_π 는 변조기의 스위칭 전압(switching voltage)의 크기, 그리고 $u(t)$ 는 입력 전기 신호를 나타낸다. 광 변조지수(Optical Modulation Index: OMI) m 은 다음과 같이 정의된다.

$$m = \frac{2V_{pp}}{V_\pi} \times 100 (\%) \quad (3)$$

여기서 V_{pp} 는 마흐-젠더 변조기의 각 전극으로 인가되는 peak-to-peak voltage이고, 시뮬레이션에서 사용되는 총 광 변조지수(total OMI)는 모든 부반송파 신호들의 광 변조지수의 합이다. 그림 1은 부반송파/파장 분할 다중화 시스템의 전송 특성을 평가하기 위한 시뮬레이션 구성도를 보여준다. 시뮬레이션에 사용된 상세한 매개변수들은 표 1에 제시하였다. 16 또는 32 채널 SCM 신호의 총 광 변조지수는 비교를 위해서 100 %, 250 %가 사용되었고, 광섬유에서의 분산, 자기 위상 변조, 상호 위상 변조 효과를 동시에 관찰하기 위해서 2개의 파장을 갖는 WDM 시스템이 사용되었다. 수신부에서 광 펄스는 4차 베셀-토슨(Bessel-Thomson) 필터에 통과된 후 BER을 계산하게 되는데, QAM 변/복조기는 참고문헌 [9]의 방법을, 수신된 QAM 심볼의 BER 계산은 참고문헌 [10]의 방법을 따랐고, 회로 잡음은 $10 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 가 사용되었다^[1].

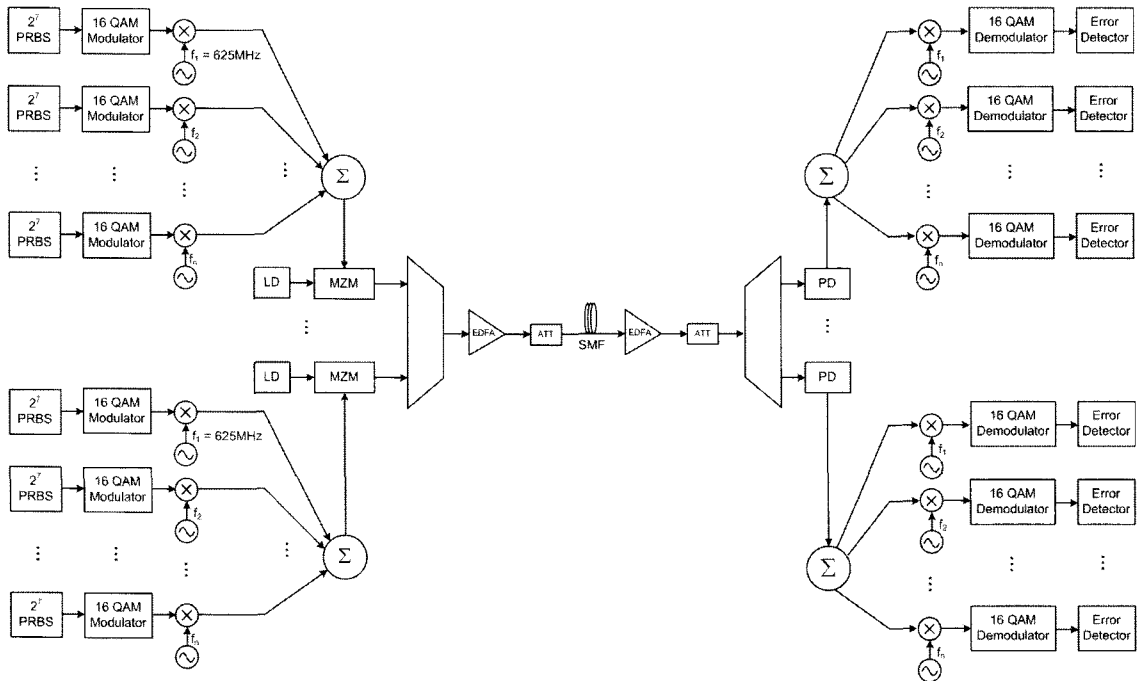


그림 1. 시뮬레이션에 사용된 SCM-WDM 시스템 다이어그램
 Fig. 1. Schematic diagram of SCM-WDM system used in the simulation.

III. 시뮬레이션 및 결과 분석

하나의 파장을 가진 부반송파 다중화 시스템의 성능을 분석하기 위하여 1,550 nm의 파장을 갖는 부반송파 다중화 시스템을 구성하고 광섬유에서의 분산 효과만을 고려하였을 때, 분산과 자기 위상 변조 효과를 같이 고려하였을 때 전송 특성을 조사하였다. 광섬유에서 분산에 대한 영향은 광섬유에 입사하는 전력을 0 dBm으로 고정하고, 비선형 인자는 제외한 뒤, 전송 거리를 0 km부터 80 km까지 증가시키면서 평가하였다. 분산과 자기 위상 변조의 결합 효과는 80 km의 단일 모드 광섬유로 전송한 뒤에 광섬유에 입사하는 전력을 0 dBm부터 12 dBm까지 변화시키면서 관찰하였다.

그림 2는 한 개의 반송파를 갖는 부반송파 다중화 시스템에서 서로 다른 광변조지수 값과 전송 거리, 반송파 주파수에 따른 10^{-9} BER에서의 수신 감도 비교를 나타낸다. 한 개의 부반송파 신호가 갖는 광변조지수는 6.25%, 25%, 100%로 바뀌어 인가되었으며, 16 QAM 변조 방법이 사용되었다. 광섬유에서는 전송 거리에 따라서 분산 효과만 고려되었는데

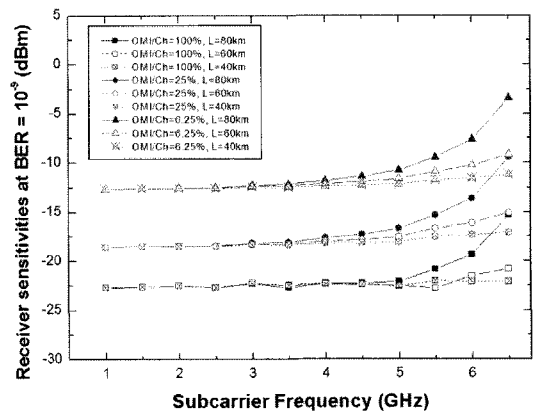


그림 2. 한 개의 반송파를 갖는 SCM 시스템에서 서로 다른 OMI 값과 전송 거리에 따른 10^{-9} BER에서의 수신 감도 비교

Fig. 2. Comparison of the receiver sensitivities at 10^{-9} BER for single subcarrier signals as a function of subcarrier frequency with different OMI values and transmission distances.

일정한 전송거리에서 보다 더 큰 광 변조지수는 복조된 QAM 신호의 아이 열림(eye-opening)을 더 크게 해주기 때문에 더 나은 수신감도를 얻을 수 있다.

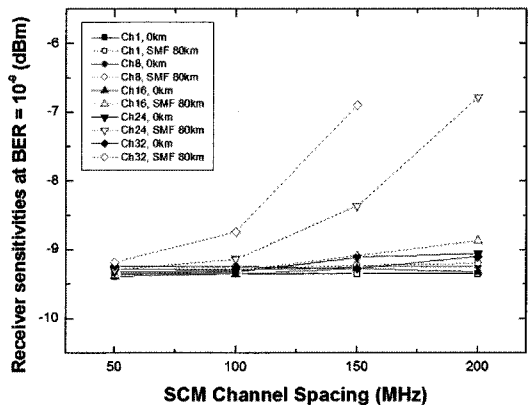
표 1. SCM/WDM 시스템 시뮬레이션에 쓰인 인자들
Table 1. Parameters used in the simulation of SCM-WDM systems.

PRBS length per channel	2 ⁷
Modulation type	16 QAM
Data rate per channel	100 Mbit/s
Roll-off factor of transceiver filter	1
1 st sub-carrier frequency	625 MHz
SCM channel allocation	50, 100, 150, 200 MHz spacing with 16 and 32 channels
WDM channel spacing	50 GHz spacing
Lasing wavelength	1,550 nm
Output power of laser diode	3 dBm
Fiber dispersion coefficient(=D)	17 ps/nm/km
Fiber dispersion slope	0.05936 ps/nm ² /km
Fiber attenuation coefficient	0.22 dB/km
Fiber effective core area	78 μm ²
Fiber nonlinear index coefficient	1.3×10 ⁻²⁰ m ² /W
Fiber length	0~80 km
Fiber launching power	0~12 dBm
Responsivity of the PD	0.85 A/W
Receiver equivalent thermal noise	10 pA/Hz

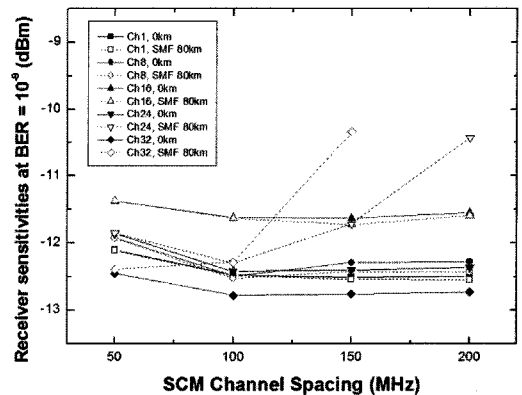
하지만 광 변조지수가 증가함에 따라서 수신감도가 선형적으로 증가하지는 않았는데, 이는 마흐-젠더 변조기의 비선형적인 전달함수 때문이다. 동일한 광 변조지수 하에서는 전송거리를 증가시킴에 따라서 광섬유에서의 분산에 의한 파워 페널티(power penalty)가 발생하여 수신 감도가 저하되었다^[11]. 이러한 결과를 종합해 볼 때 4 GHz 이하의 대역에서 부반송 파들의 주파수를 잘 배열하면 80 km까지 성능 열화 없이 전송이 가능함을 알 수 있다.

부반송 파 다중화 시스템에서 채널 간격이 BER 성능에 주는 영향을 알아보기 위해서 한 개의 파장에서 100 %, 250 %의 광 변조지수를 갖는 32 SCM 신호에 대한 시뮬레이션을 실행하였다. 각 부반송 파 신호에 QAM 변조를 하기 전의 이전 진호를 랜덤하

게 지연시킴으로써 100 %보다 큰 광 변조지수를 갖는 신호를 마흐-젠더 변조기에 인가할 수 있었고, V_{π} 가 4 V일 때 250 %의 총 광 변조지수로 마흐-젠더 변조기를 완전히 구동시킬 수 있었다. 50 MHz, 100 MHz, 150 MHz, 200 MHz 의 서로 다른 채널 간격에서 10⁻⁹ BER에서의 수신 감도를 계산하였고, 총 광 변조지수가 100 %일 때의, 250 %일 때의 결과가 그림 3(a), 3(b)에 각각 도시되었다. 총 광 변조지수가 100 %일 때에는 마흐-젠더 변조기에 인가되는 전기 신호의 크기가 V_{π} 값에 비해 상대적으로 작아서 변조기



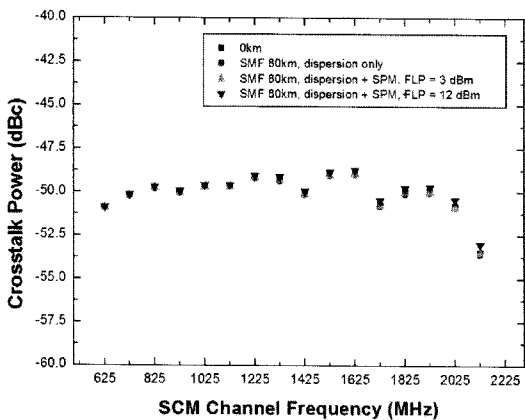
(a) 총 광변조지수=100 %일 때
(a) Total OMI=100 %



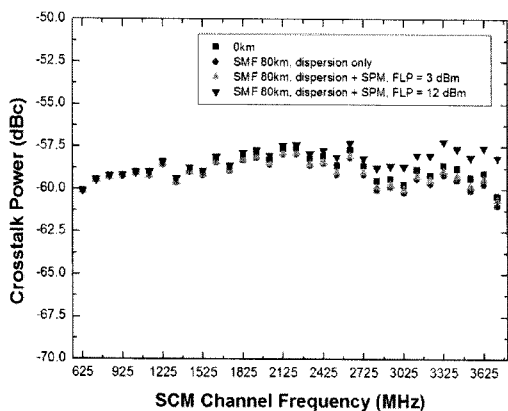
(b) 총 광변조지수=250 %일 때
(b) Total OMI=250 %

그림 3. 32 채널 SCM 시스템에서 서로 다른 SCM 채널 간격에 따른 10⁻⁹ BER에서의 수신 감도 비교

Fig. 3. Comparison of the receiver sensitivities at 10⁻⁹ BER for 32 channel SCM signals with different SCM channel spacing.



(a) 16 채널 SCM 시스템
(a) 16 channel SCM systems



(b) 32 채널 SCM 시스템
(b) 32 channel SCM systems

그림 4. 총 광변조지수=250 %일 때 각 SCM 채널로 주입되는 누화 전력량의 계산값

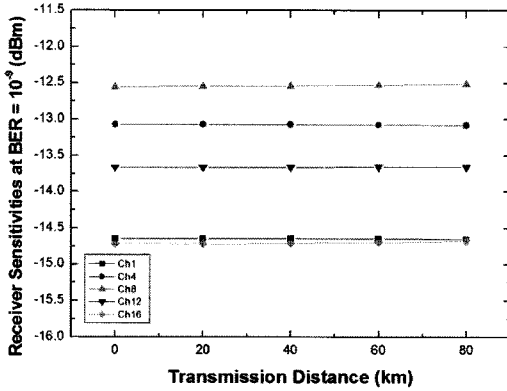
Fig. 4. Calculated crosstalk power into each SCM channel with a total OMI=250 %.

에서 비선형 특성이 많이 발생하지 않아서 광섬유를 연결하지 않았을 경우(=0 km) 채널 간격에 따라서 수신감도의 변화가 거의 없지만, 광섬유의 분산 효과를 고려한 경우(=80 km) 높은 주파수에 있는 채널이 분산의 영향을 더욱 많이 받아서 수신감도가 나빠지는 것을 확인하였다. 총 광 변조지수가 250 %일 때에는 변조기의 비선형 특성에 의해 발생하는 상호 변조(intermodulation) 성분들 때문에 채널 별로 성능이 다르게 나타나며, 가운데 채널이 이러한 영향을 가장 많이 받게 되어서 성능이 가장 나빠게 나타난다. 마찬가지로 광섬유의 분산 효과를 고려했을 경

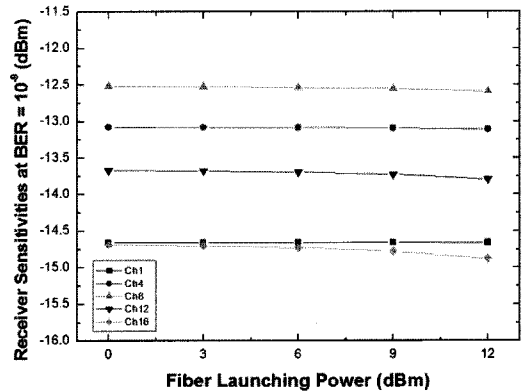
우, 높은 주파수에 있는 채널에서 BER 성능 저하를 확인할 수 있었고 채널 간격을 넓힐수록 성능이 향상되었는데, 100 MHz 이상의 채널 간격에서는 그 차이가 크지 않았다. 따라서 본 논문에서 이후에 다루는 부반송파 다중화 시스템의 시뮬레이션에서는 100 MHz의 채널 간격을 사용하였다.

그림 4(a)와 4(b)는 각각 16 채널과 32 채널을 갖는 부반송파 다중화 시스템의 각 채널당 누화 전력량을 보여준다. 수신부의 광다이오드 이후에 얻어진 전력 스펙트럼을 사용하였으며, 원하는 채널을 없앤 후에 그 채널로 들어오는 누화 전력량을 계산하였다. 누화 전력량을 계산하는 대역폭은 QAM 신호의 복조 대역(demodulation bandwidth)으로 정하였으며, 누화 전력량의 양과 평균 광 반송파 전력 간의 비율을 dBc의 단위로 정의하였다. 광섬유를 연결하지 않았을 경우, 80 km 단일 모드 광섬유에서 분산만 고려하였을 경우, 80 km 단일 모드 광섬유에서 분산 효과와 자기 위상 변조 효과를 고려하였을 경우 광섬유에 입사하는 전력이 3 dBm, 12 dBm일 때의 채널별 누화 전력량을 계산하였는데, 16 채널 시스템의 경우 4가지 경우에 대하여 계산된 값이 큰 차이를 보이지 않았고 그 값은 -53 ~ -48 dBc의 범위를 가졌다. 32 채널의 경우에는 -60 ~ -56 dBc의 값을 가져서 누화 전력량에 대한 영향이 16 채널의 경우보다는 작음을 알 수 있다. 두 경우 모두 가운데 채널에서 가장 높은 누화 전력량을 보였는데, 이는 마호-젠더 변조기로부터 발생하는 2차, 3차 상호 변조 왜곡(inter-modulation distortion)에 의한 영향이 가운데 채널에 가장 영향을 많이 끼치기 때문이다. 32 채널 시스템의 경우 광섬유에 입사하는 전력이 12 dBm일 때 2 GHz 이상의 대역에서 누화 전력량이 증가한 것을 볼 수 있는데, 이것은 2차 비선형 왜곡 성분의 영향이다.

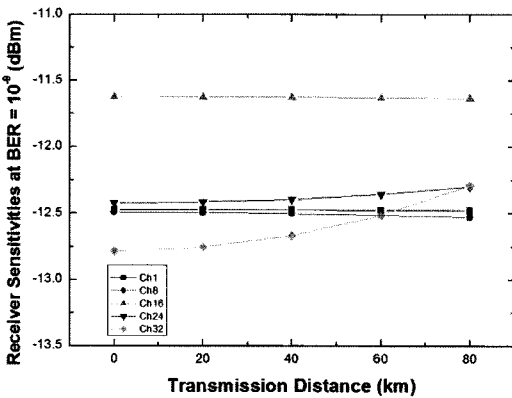
다음으로 한 개의 파장을 갖는 부반송파 다중화 시스템에서 광섬유에서 서로 다른 인자를 고려하였을 때의 BER 특성을 관찰하였다. 그림 5(a)와 4(b)는 각각 16 채널과 32 채널을 갖는 부반송파 다중화 시스템에서 전송거리를 증가시키면서 광섬유에서 분산에 의한 영향이 증가함에 따라서 변화하는 각 채널당 BER 특성을 보여준다. 광섬유 전송 링크에서는 분산에 의한 영향만을 고려하기 위해서 크기 손실은 EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier)에 의해서



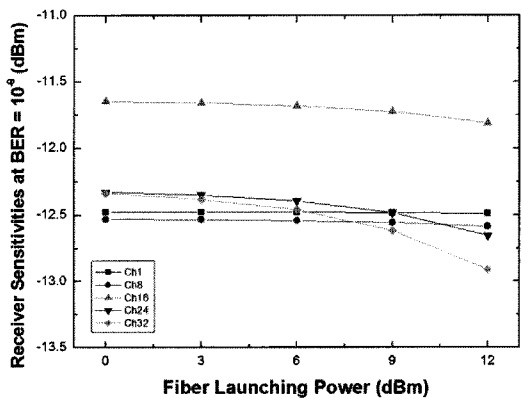
(a) 16 채널 SCM 시스템
(a) 16 channel SCM systems



(a) 16 채널 SCM 시스템
(a) 16 channel SCM systems



(b) 32 채널 SCM 시스템
(b) 32 channel SCM systems



(b) 32 채널 SCM 시스템
(b) 32 channel SCM systems

그림 5. 총 광변조지수=250 %일 때 광섬유의 분산 효과로 인한 10^{-9} BER에서의 수신 감도 변화
Fig. 5. Receiver sensitivities at 10^{-9} BER due to the fiber dispersion effect with a total OMI=250 %.

그림 6. 총 광변조지수=250 %일 때 80 km SMF 전송 후 광섬유의 분산 효과와 자기 위상 변조 효과로 인한 10^{-9} BER에서의 수신 감도 변화
Fig. 6. Receiver sensitivities at 10^{-9} BER due to the fiber dispersion and SPM effect after transmission over an 80 km SMF with a total OMI=250 %.

보상해 주었다. 두 경우 모두 가운데 채널에서 가장 성능이 나빠게 나타났으며, 이는 앞서 확인하였던 바와 같이 마흐-젠더 변조기에서 발생하는 상호 변조 왜곡 때문이다. 16 채널 시스템의 경우에는 마지막 채널이, 32 채널 시스템의 경우에는 24번 32번 채널의 수신감도가 전송거리가 증가함에 따라 나빠졌는데, 이는 높은 주파수에 있는 채널의 신호가 광섬유 내에서 분산의 영향을 더 받기 때문에 펄스 퍼짐 현상이 더욱 발생해서 신호의 BER 특성이 나빠지기 때문이다. 그림 6(a)와 6(b)는 각각 16 채널과 32 채널을 갖는 부반송파 다중화 시스템에서 80 km 단일 모드 광섬유 전송 후 광섬유에서 분산과 자기 위상 변

조의 결합 효과에 의해 변화하는 각 채널당 BER 특성을 보여준다. 광섬유에 입사하는 전력은 0 dBm에서 12 dBm까지 변화시켰는데, 두 경우에서 모두 높은 주파수에 있는 채널에서는 광섬유에 6 dBm 이상의 전력이 인가되었을 때 수신감도가 향상되었다. 16 채널 시스템의 경우 16번 채널에서, 32 채널 시스템의 경우 24번과 32번 채널에서 이러한 현상이 두드러지게 나타났는데, 이는 광섬유의 자기 변조 효과가 펄스 압축 효과를 불러오는 것에서 유추할 수 있다^[12]. 즉, 높은 주파수의 채널의 신호는 더욱 좁은

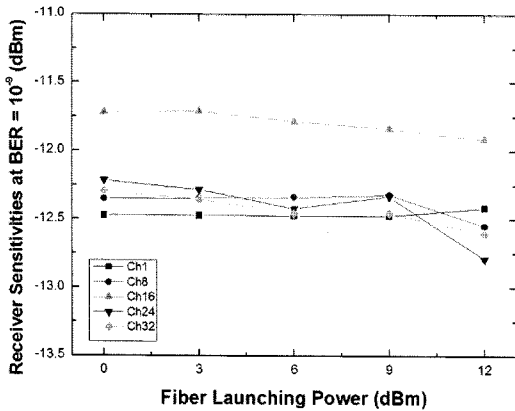


그림 7. 32 채널 SCM-2 채널 WDM 시스템에서 총 광변조지수=250 %일 때 80 km SMF 전송 후 광섬유의 분산 효과와 자기 위상 변조 효과로 인한 10^{-9} BER에서의 수신 감도 변화

Fig. 7. Receiver sensitivities at 10^{-9} BER due to the fiber dispersion, SPM and XPM effect after transmission over an 80 km SMF for 32 SCM-2 WDM systems with a total OMI=250 %.

펄스들로 구성되어 있어서 낮은 주파수의 신호에 비해서 상호 변조 효과를 더욱 많이 받아서 펄스 압축 효과가 BER 성능 향상을 가져오는 것으로 해석할 수 있다.

그림 7은 두 개의 파장을 갖는 부반송파/파장 분할 다중화 시스템에서 광섬유에서의 분산, 자기 변조 효과, 상호 변조 효과를 모두 고려했을 때 광섬유에 입사하는 전력의 양을 증가시킴에 따른 BER 성능 변화를 보여준다. 두 개의 파장은 50 GHz 간격으로 설정하였으며, 첫번째 파장 채널의 32개의 부반송파 채널 신호들에 대한 결과 값을 도시하였다. 그림 6(b)의 경우와 마찬가지로 광섬유에 입사하는 전력이 증가할수록 높은 주파수의 채널에서 계산된 10^{-9} BER에서의 수신 감도가 향상되었는데, 이는 32개의 부반송파들이 다중화된 채널의 대역폭이 50 GHz의 WDM 채널 간격에 비해서는 상대적으로 매우 작기 때문이다. 따라서 시스템이 상호 위상 변조 효과로부터의 받는 영향이 작아서 자기 위상 변조의 영향이 주도적인 영향을 미치게 되고 그림 6에서 확인한 바와 같이 높은 주파수에 있는 부반송파 채널에서 광섬유에 입사하는 전력이 증가함에 따라 BER 성능이 향상되었다.

IV. 결론

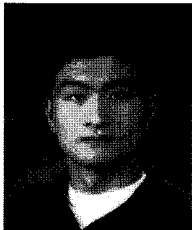
본 논문에서는 광 이중 측파대 변조 방법과 16 QAM 신호를 사용한 부반송파/파장 분할 다중화 시스템을 모델링하고 그 전송 특성을 분석하였다. 한 개의, 또는 두 개의 파장을 갖는 부반송파/파장 분할 다중화 시스템에서 부반송파 채널 간격, 누화 전력량, BER 성능의 인자에 대하여 전송 특성을 분석하였는데, 시스템의 성능을 결정 짓는 가장 중요한 인자는 마호-젠더 변조기의 비선형 특성과 부반송파 채널 간격으로 관찰되었다. 광섬유의 분산에 의한 영향만 고려했을 때는 높은 주파수에 있는 채널의 성능이 나빠졌으며 분산과 비선형 효과를 함께 고려되었을 경우 6 dBm 이상의 높은 광 전력이 인가되었을 때 높은 주파수에 있는 채널에서 약간의 성능 향상을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] S. J. Park, C. H. Lee, K. T. Jeong, H. J. Park, J. G. Ahn, and K. H. Song, "Fiber-to-the-home services based on wavelength-division-multiplexing passive optical network", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 22, no. 11, pp. 2582-2591, Nov. 2004.
- [2] R. Hui, B. Zhu, R. Huang, C. T. Allen, K. R. Demarest, and D. Richards, "Subcarrier multiplexing for high-speed optical transmission", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 20, no. 3, pp. 417-427, Mar. 2002.
- [3] W. H. Chen, W. I. Way, "Multichannel single-sideband SCM/DWDM transmission systems", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 22, no. 7, pp. 1679-1693, Jul. 2004.
- [4] P. Laurencio, S. O. Simoes, and M. C. R. Medeiros, "Simulation of intermodulation distortion in fiber-radio links employing OSSB", in *Proc. 27th The International Conference on "Computer as a tool" (EUROCON 2005)*, Serbia & Montenegro, Belgrade, pp. 1365-1368, Nov. 2005.
- [5] P. Laurencio, S. O. Simoes, and M. C. R. Medeiros, "Impact of the combined effect of RIN and inter-

- modulation distortion on OSSB/SCM systems", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 24, no. 11, pp. 4250-4262, Nov. 2006.
- [6] J. Lee, S. K. Kim, Y. Kim, O. Mizuhara, G. Lyu, S.-S. Kang, J.-H. Song, and J. Jeong, "Performance evaluation and prediction using eye margin characteristics for optical transmission systems", *Opt. Commun.*, vol. 193, no. 1-6, pp. 113-120, Jun. 2001.
- [7] S. K. Kim, O. Mizuhara, Y. K. Park, L. D. Tzeng, Y. S. Kim, and J. Jeong, "Theoretical and experimental study of 10-Gb/s transmission performance using 1.55 μm LiNbO₃-based transmitters with adjustable extinction ratio and chirp", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 8, pp. 1320-1325, Aug. 1999.
- [8] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, pp. 28-59, 1989.
- [9] F. Xiong, *Digital Modulation Techniques*, Artech House, pp. 411-458, 2000.
- [10] J. G. Proakis, M. Salehi, *Communication Systems Engineering*, Prentice Hall, pp. 405-435, 2002.
- [11] J. M. Fuster, J. Marti, J. L. Corral, V. Polo, and F. Ramos, "Generalized study of dispersion-induced power penalty mitigation techniques in millimeter-wave fiber-optic links", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 18, no. 7, pp. 933-940, Jul. 2000.
- [12] F. Ramos, J. Marti, V. Polo, and J. M. Fuster, "Dispersion-tolerant data transmission based on the use of fiber-induced self-phase modulation in microwave optical links", *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 27, no. 1, pp. 1-4, Oct. 2005.

김 경 수



2001년 2월: 고려대학교 전기전자 전파공학부 (공학사)
 2005년 3월~현재: 고려대학교 전 파공학과 석·박사통합과정
 [주 관심분야] 초고속 광통신 네트 워크, 부반송파/파장 분할 다중 화 기술, Optical-MIMO 기술

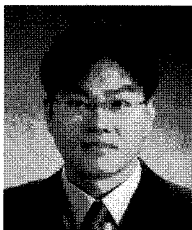
정 지 채



1980년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)
 1982년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)
 1988년 2월: 미국 Carnegie-Mellon University (공학박사)
 1982년~1985년: 한국과학기술연구원 연구원

1988년~1993년: AT&T Bell Lab. 연구원
 1993년~1995년: 포항공과대학교 교수
 1995년~현재: 고려대학교 정보통신대학 컴퓨터·통신공학부 교수
 [주 관심분야] 초고속 광 네트워크, 광 변조 방식 기술, 생체신호처리

이 재 훈



1997년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학사)
 1999년 2월: 한국과학기술원 전기공학과 (공학석사)
 2003년 2월: 고려대학교 전파공학과 (공학박사)
 2003년~2008년: 삼성전자통신연구소 연구원

2008년~현재: 고려대학교 정보통신대학 컴퓨터·통신공학부 교수
 [주 관심분야] Radio-Over-Fiber 시스템, 유무선통합 시스템