

직접변조 방식을 이용한 광통신시스템의 성능분석

김정태*, 이영우, 허창우

목원대학교

Performance Analyses of Optical Communication Using Intensity Modulation Direct Detection Method

Jung-Tae Kim, Yung-Woo Lee, Chang-Woo Hur

Mokwon University

E-mail : jtkim5068@hanmail.net

요 약

본 논문에서는 이동통신 환경 하에서의 광통신 접목기술을 사용하여 광PCS 시스템의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하여 수치적으로 분석하였다. 광섬유가 제공할 수 있는 막대한 대역폭을 효율적으로 활용하기 위하여, 광 수신기는 보다 많은 정보를 송신할 수 있도록 충분히 빠른 변조 속도를 요구하며, 광수신기는 수신되는 고속의 광 신호를 전기적 신호로 충분히 검파시킬 수 있는 능력을 가져야한다. 수십 기가 bps 이상의 초고속광통신시스템을 구현하기 위해서는 광섬유의 분산 효과에 의한 펄스폭의 증가를 억제할 수 있는 기술이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 광섬유의 chirping의 영향을 고려하여 시스템의 성능을 직접 변조 방식을 사용하여 수치적 시뮬레이션을 통하여 신호 대 잡음 비를 유도하여 시스템의 성능을 비교 분석 하였다.

1. 서 론

지금까지는 많은 기업들이 외부 정보의 획득을 주목적으로 인터넷의 도입을 추진하였으나, 이제는 보다 구체적으로 본사 지사, 또는 본사와 관련된 협력업체나 이동중인 원격 사용자들과의 원활한 정보교류를

초고속 멀티미디어 정보통신 서비스를 구축하기 위한 광통신 기술이 발전되고 있다. 초고속 정보통신망에서는 다양화, 개인화, 복잡화, 인간화를 지향하는 사용자의 정보통신 서비스 요구를 충족시켜야 하며, 이를 위해 음성, 저속 데이터, 정지 영상 등 협대역 서비스 뿐만 아니라, 고속 데이터, 고품질의 동영상과 같은 다양한 광대역 서비스를 경제적이고, 효율적으로 수용, 처리할 수 있어야 한다. 광통신이 육지에서나 대륙간 통신에서 선호되는 신호 전달 방법이 된 가장 큰 이유는 단일 모드의 광섬유가 제공할 수 있는 막대한 대역폭, 저손실 기술의 등의 기술적 발전에 기인한다. 단일 모드 광섬유의 저손실 영역인 1200~1700

nm에서 이용 가능한 광 대역폭은 20THz가 넘는다. 이론적으로는 현재의 수 Gbps 광통신 시스

템 용량의 수천 배에 해당된다. 따라서, 수 많은 가입자들의 음성, 데이터, 영상 정보 등이 통합된 멀티미디어 서비스를 수용할 수 있는 차세대 광대역 통신망의 근간이 바로 광통신 기술이다. 이와 같이 거의 무한한 대역폭과 함께, 실리카 광섬유의 낮은 신호 손실은 광대역 신호를 재생하지 않아도 장거리 전송을 가능케 한다. 현재의 광섬유가 제공하는 대역폭을 보다 효율적으로 활용하기 위해, 광섬유의 특성 및 전기적 정보를 광정보로 변환하여 광섬유 전송로를 통하여 송신하는 광송신기와 수신된 광정보를 다시 전기적 정보로 변환하여 정보를 복원하는 기술 광전 변환 기술을 위한 소자의 설계 기술과 시스템 통합 기술이 필요로 하게 된다.[1]

II. 광통신 시스템의 개념

정보를 원격지까지 전송하기 위해서는 정보를 말, 글, 그림 등으로 1차 변환하고 이를 다시 전기, 빛 등으로 2차 변환하여 목적지까지 전송한 다음 원래의 말, 글, 그림 등으로 역변환하는 과정을 거친다. 광통신은 말, 그림, 글 등으로 표현된 정보를 원격지까지 전송하기 위해 2차 변환시 광신호로

변환하고 이를 원격지까지 전송하는 것을 말한다. 원격지에서는 이를 다시 원래의 정보를 복원한다. 광통신을 위해서는 정보를 광신호로 변환하여야 하나 현재의 기술로는 직접 광신호로 변환하지 않고 일단 전기신호로 변환한 다음 전기 신호를 광신호로 변환하는 2단계를 거친다. 광신호의 전송을 위해서는 광섬유가 사용되는데 광섬유는 유리 혹은 플라스틱으로 만들어진다. 광섬유는 중앙의 코어 부분과 코어를 둘러싼 클래드 부분으로 구성되며 이를 제킷이 둘러싸고 있다. 광섬유의 종류에는 다중 모드 계층 굴절을 광섬유, 다중 모드 경사 굴절을 광섬유, 단일 모드 광섬유 등이 있는데 단일 모드 광섬유가 가장 특성이 좋다. 코어 부분의 굴절률은 클래드 부분의 굴절률보다 크고 빛은 코어와 클래드 사이의 경계면에서 전반사 현상을 일으켜 코어를 따라 진행한다. 광원으로는 발광 다이오드나 레이저 등이 사용된다. 광통신은 도청이 매우 어렵고, 잡음에 강한 특성을 갖는다. 또한, 광섬유를 이용하지 않고 레이저를 이용하는 무선 광통신 기술이 개발 상용화되고 있다. 전기통신에서도 전기신호를 전송하는데 전선을 사용하는 유선통신과 전기신호가 공간을 전파하여 전송되는 무선통신으로 구분하듯이 광통신에서도 유선 광통신과 무선 광통신으로 구분한다면, 예전의 봉화에 의한 광통신은 무선 광통신에 해당되고 오늘날의 광섬유에 의한 광통신은 유선 광통신이 될 것이다. 물론 LAN에서 적외선을 이용한 통신 그리고 장거리 구간에 레이저를 이용한 통신 등도 유무선의 구분에 의하면 무선 광통신이 될 것이다. 광통신이 어떻게 이루어지는지 살펴보자. 우선 전송하고자 하는 정보는 전기신호로 변환되고 전기신호는 레이저, 포토다이오드 등에 입력되어 빛으로 변환된다. 전송하는 정보가 음성이라면 일반 전기통신에서와 같이 펄스부호화 변조(PCM)과정을 거치므로 광전기 변환장치에 입력되는 신호는 1,0의 2진신호이다. 광전기 변환장치, 즉 레이저, 포토다이오드 등은 1,0의 2진 신호를 받아 빛의 강약으로 바꾼다. 빛의 강약으로 바뀐 신호는 광전송 매체, 즉 광섬유를 통해 원격지까지 전송되고 수신측에서는 역변환 과정을 거쳐 본래의 음성을 회복하게 된다. 음성 정보가 아닌 텍스트, 화상, 비디오 등도 마찬가지다. 따라서 현재 이루어지고 있는 광통신은 정보, 전기 신호, 광신호, 전기신호 정보의 순서로 이루어진다. 광신호를 전기신호로 변환해 주는 장치도 중요하지만, 만일 광섬유의 개발이 뒤따라 주지 않았다면, 오늘날과 같은 광통신은 이루어질 수 없었을 것이다.[2]

III. 이동통신시스템

이동 통신 시스템에는 여러 가지 방식이 있지만, 우리나라에서 세계 최초로 사용화에 성공한 CDMA(Code Division Multiple Access) 방식 이동통신 시스템에 대해 알아보기로 하자. 이동통신 시스템은 크게 이동 단말기, 기지국 그리고, 이동 전

화교환국으로 구성되어 있다. 이동 단말기는 우리가 흔히 말하는 휴대폰 또는 이동전화를 말한다. 이동단말기는 이동 전화 서비스 개시 이래 배터리 기술과 저전력 소자 기술 발전으로 인해 점점 크기가 작아지고 있으며, 무게 또한 가벼워지고 있다. 이동 전화 교환국은 각 기지국과 일반적으로 다수의 E1/T1 급 전송로를 통하여 연결되어 있으며, 여러 기지국에서 전달된 이동 단말기의 통화 요구를 처리하여 연결하고 통화가 끝날 때까지 계속 유지한다. 기지국은 이동 단말기와 이동 교환전화국 사이에 CDMA 모뎀을 거쳐 무선 주파수로 송출하거나 받아들이는 역할을 담당한다.

IV. 시스템 해석 및 시뮬레이션 결과

4.1. 광 송신기

광 송신기의 역할은 전기적인 입력 신호를 광신호로 변환한 다음 통신 채널인 광섬유에 입사시키는 것이다. 광 송신기의 핵심 부품은 광원으로서 광통신 시스템에 사용되는 광원은 반도체 레이저이다. 반도체 레이저의 장점은 소형, 고효율성, 신뢰도, 용이한 파장 선택도, 광섬유 코어 사이즈에 적합한 방사면적, 상대적으로 높은 주파수에서 직접 변조가 가능하다. 레이저 다이오드의 앞면에 있는 렌즈는 이저로 부터 방사되는 빛을 광섬유에 접속시키는 역할을 한다. 렌즈와 커넥터 틱 레 사이에 광 절연기를 삽입하여 레이저 캐비티로 반사되어 들어오는 빛으로 인해 레이저 다이오드 출력 광의 위상 변화에 의한 시스템 잡음 발생을 막아준다. 레이저 다이오드는 전자와 정공의 결합에 의해 활성층 내에서 자연적으로 방출되는 빛을 다이오드에 형성된 광 공진기에 의해 코히런트하게 유도 방출되는 빛을 광 공진기 내의 활성 영역에서 증폭시켜 일정한 파장의 빛을 방출하는 소자로서, 방출 효율이 커 높은 출력 이득을 얻을 수 있으며, 선폭이 좁아 광섬유에서 분산이 적고, 직접 변조에 의한 짧은 펄스 생성이 가능하다.

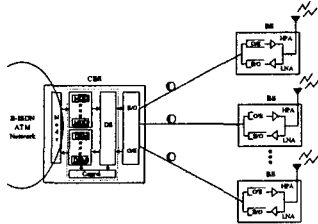
4.2. 광 수신기

광 수신기의 역할은 광통신 시스템을 통하여 전송되어 온 광 신호를 다시 전기적인 신호로 변환시켜 데이터를 복구하는 특징을 가지고 있다. 수신되는 광 신호는 광 검출기에서 전기적 신호로 변환된 다음 전치 증폭기와 주 증폭기에 의해 신호 처리하기 충분한 크기의 신호로 증폭된다. 등화기는 시스템을 통과하여 오는 동안 여러가지 비선형 효과들로 왜곡된 신호를 보정하는 역할을 하며, 필터는 신호대 잡음비를 높이는 역할을 한다. 광 수신기의 주된 광 소자는 광 검출기로서 광전효과에 의해 광 신호를 전기적 신호로 변환시킨다.

4.3. 시스템의 구성도 및 시뮬레이션 모델

본 논문에서는 직접 변조 방식에 의한 이동통신과 광통신의 개념을 접목한 광 PCS 시스템의 성능

을 비교 분석하였다.(그림1)은 여기서 제시되고 있는 시스템의 구성이다. 광통신 시스템에서의 레이저 다이오드의 처평, 광선로의 분산 영향을 고려한 각 component에서의 출력 값을 시뮬레이션을 통하여 유도하였다.



(그림1) 시스템의 구성도

• 시뮬레이션 모델

입력 신호의 파형으로 OOK(On-Off Keying)의 입력 형태로 LD(Laser Diode)에 입력되었을 때, 일반적인 LD의 rate equation을 풀어 그때의

<표1> 시뮬레이션에 사용된 파라미터 값

Notation	Definition	Value
Γ	mode confinement factor	0.4
n_0	electron density at transparency	10^{18} cm^{-3}
τ_p	photon lifetime	3 ps
τ_n	electron lifetime	1 ns
β	spontaneous emission factor	3×10^{-5}
q	electron charge	$1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
V_a	active volume	$1.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3$
α	linewidth enhancement factor	5
v_g	group velocity	$8.5 \times 10^8 \text{ cm/s}$
a_0	gain coefficient	$2.5 \times 10^{16} \text{ cm}^2$
η_0	total quantum efficiency	0.4
ϵ	gain suppression factor	10^{-17} cm^3
η	photodetector quantum efficiency	0.8
λ_0	dark current	$6.25 \times 10^{10} \text{ /s}$
D	fiber dispersion constant	-17 ps/km/nm

출력값을 다음의 식으로부터 유도할 수 있다.[6]

$$\frac{dp(t)}{dt} = \Gamma G(t)(n(t) - n_0)p(t) - \frac{p(t)}{\tau_p} + \frac{\beta \Gamma n(t)}{\tau_s} \quad (1)$$

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{I_p(t)}{qV_a} - G(t)(n(t) - n_0)p(t) - \frac{n(t)}{\tau_p} \quad (2)$$

$$\frac{d\phi(t)}{dt} = \frac{\alpha}{2} (\Gamma v_g a_0 (n(t) - n_0) - \frac{1}{\tau_p}) \quad (3)$$

$$G(t) = \frac{v_g a_0}{1 + \epsilon p(t)} \quad (4)$$

여기서, 주어진 함수의 값들은 시뮬레이션 값들은 <표1>에 나타나 있다. 여기서, G(t)는 saturable gain 계수 값을 정의한다.

LD로부터 생성되는 NRZ 전류의 파형은 현재의 비트와 이전의 비트의 값에 따라 다음의 식에 의해서 유도될 수 있다. 여기서, I_{bias} 는 LD에 공급되는 바이어스 전류이며, I_m 은 변조 전류를 표시한다. 또한 변조 전류의 상승,하강 시간을 인가한 경우의 예이다.

$$I_p(t) = \begin{cases} I_{bias} + I_m(1 - e^{-(t-t_0)/\tau}) & \text{if current bit = 1, previous bit = 0} \\ I_{bias} + I_m e^{-(t-t_0)/\tau} & \text{if current bit = 0, previous bit = 1} \\ I_{bias} & \text{if current bit = 0, previous bit = 0} \\ I_{bias} + I_m & \text{if current bit = 1, previous bit = 1} \end{cases} \quad (5)$$

위의 식으로부터 우리는 LD의 광 출력 값을 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$p(t) = \frac{p(t) V_a \eta_0 h \nu}{2 \Gamma \tau_p} \quad (6)$$

또한, 여기서 $\Delta v(t)$ 는 instantaneous chirp의 주파수를 표시한다. 여기서, η_0 는 LD의 differential quantum efficiency를 나타낸다.

$$\Delta v(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (7)$$

$$\Delta v(t) = \left\{ \frac{1}{p(t)} \frac{dp(t)}{dt} + \left[\frac{\epsilon}{\tau_p} - \frac{\beta \Gamma n(t)}{\tau_s p(t)} \right] \right\}$$

위의 식을 조합하여 풀면 다음의 식으로 간략화할 수 있다. 여기서, 첫째항은 transient chirp을 둘째항은 adiabatic chirp을 나타낸다. dispersive single mode fiber를 사용하였을 경우, 주파수 영역에서 파이버의 출력에서의 전계를 구해보면 다음의 식으로 유도될 수 있다.

$$S_{fiber}(f) = H_{fiber}(f) S_c(f) \quad (8)$$

여기서 $H_{fiber}(f)$ 는 파이버의 전달 함수를 나타낸다. 따라서, single mode fiber의 등가 baseband transfer function을 사용하여 파이버의 출력값을 구할 수 있다.

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{p(t)} e^{j\phi(t)} e^{-j2\pi f t} dt \quad (9)$$

여기서, l 은 파이버의 길이, λ 는 파장, c 는 빛의 속도를 나타낸다. 따라서, 이렇게 수신단의 PD(Photodetector)에서의 수신된 전류는 다음의 관계식에 의해서 구할 수 있다.

$$i(t) = \frac{\eta \lambda}{hc} P_{PT}(t) + \lambda_0 \quad (10)$$

여기서, η 는 PD의 quantum efficiency를 λ_0 는 dark current를 PFP(t)는 SFP(t)로부터 다음의 식에 의해 구할 수 있다.

$$P_{RP}(t) = S_{RP}(t) S^*_{RP}(t) \quad (11)$$

여기서, 수신된 전류는 Gaussian shaped frequency response의 특성을 가진 필터에 의해 신호를 수신하며, 다음의 관계식으로 유도될 수 있다.

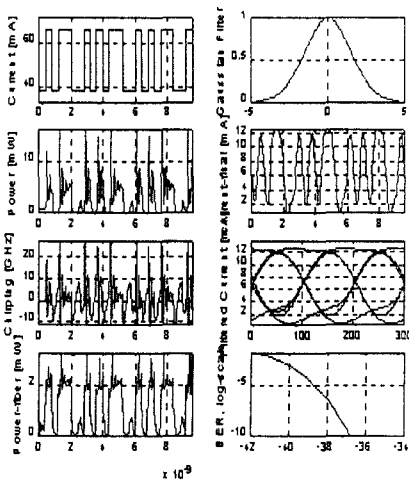
$$H_R(F) = e^{-\pi \left(\frac{f}{2\Delta R}\right)^2} \quad (12)$$

여기서, $f_R=0.75/T$ 이고, T는 비트의 주기이다. 여기에서 사용된 필터는 eye opening을 최대 하기 위해 수신 단의 잡음을 최소화하기 위해 선택되어진다. 다음의 (그림2)는 위의 식들을 사용하여 시뮬레이션 한 결과이다. 입력의 OOK 데이터는 18 비트의 이진 코드를 LD에 주입하였을 경우, LD의 chirping을 고려한 경우의 출력을 보이고 있다. 또한 파이버를 통과한 후의 전계의 값으로부터 출력 파워를 구할 수 있고, 광적인 신호를 PD에서 Gaussian filter를 사용하여 전기적인 신호로 변환시킨다. 이때, 입력에 대한 출력의 BER(Bit per Error)를 구하여 시스템의 전체적인 성능 평가를 구할 수 있다. 또한 시스템의 오류를 측정하기 위해 eye opening을 구하여 보았다.

비를 유도하여 시스템의 성능을 비교 분석하였다.

참고 문헌

[1] Thomas K.Fong, "Linewidth-Insensitive Coherent AM Optical Links", Journal of Lightwave Technology, Vol, 12, No.3, March 1994, pp.526-534.
 [2] David M. Cuter, "Dynamic Range Requirements for Optical Transmitters in Fiber-Fed Microcellular Networks", IEEE Photonics Technology Letters, Vol.7, No.5, May 1995, pp.564-566.



(a) 송신부의 파형 (b) Gaussian filter의 파형
 (c) LD의 출력 파형 (d) 수신부의 파형
 (e) Chirping을 고려한 출력 파형 (f) eye opening
 (g) 광섬유를 통과한 수신부의 파형 (h) BER의 관계도
 (그림2) 시뮬레이션의 결과 값

IV. 결론

본 논문에서는 이동 통신 환경하에서의 광통신 접목 기술을 사용하여 광 PCS 시스템의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션으로 부터 분석하였다. 또한, 논문에서는 광섬유의 chirping 영향을 고려하여 시스템의 성능을 직접 변조 방식을 사용하여 신호대 잡음