

논문 2006-43TC-3-4

OSSB 변조의 비선형성을 고려한 OFDM MMoF 시스템의 성능

(Performance of OFDM MMoF System considering Nonlinearity of
OSSB Modulation)

김 창 중*, 이 호 경*

(Chang-Joong Kim and Ho-Kyoung Lee)

요 약

Millimeter over Fiber (MMoF) 기법은 저손실로 장거리에 신호를 전송하기 위하여 밀리미터 대역의 신호를 광학적으로 변조하여 광섬유에 실어서 전송하는 기법이다. 이때 광학적 변조 기법으로는 색 분산(chromatic dispersion)이 적고 대역폭 효율이 뛰어난 광학적 단측파대 변조(Optical Single sideband; OSSB) 방식이 주로 사용된다. OSSB를 사용하는 MMoF 시스템의 광학 연결부는 비선형 증폭기로 취급될 수 있으며, 그것의 AM/AM 특성 함수는 제 1차 제 1종 베셀 함수이다. 본 논문에서는 이를 고려한 OFDM MMoF 시스템의 성능을 알아보았다. 우리는 OFDM MMoF 시스템의 비선형 왜곡 잡음 전력을 추정하여 이론적인 비트 오류율(Bit Error Rate; BER)을 분석하였으며, 모의실험을 통해 이를 검증하였다.

Abstract

Millimeter over Fiber (MMoF) technique modulates millimeter wave signal optically to transmit it through an optical fiber for long distances with small loss. MMoF system usually uses optical single sideband (OSSB) modulation scheme to reduce fiber chromatic dispersion and obtain high bandwidth efficiency. The optical link of MMoF system using OSSB is treated as a nonlinear amplifier, and the AM/AM characteristic function of the amplifier is a Bessel function of the first kind of order 1. In this paper, we investigate the performance of OFDM MMoF system considering nonlinearity of OSSB modulation. We estimate a power of the nonlinear distortion noise to analyze the theoretical bit error rate(BER), and perform a simulation to verify the theoretical BER.

Keywords : OFDM, nonlinearity, optical modulation, OSSB, MMoF

I. 서 론

MMoF 기법은 저손실로 장거리에 밀리미터 대역 신호를 전송하기 위한 기법이다. MMoF 기법을 사용하여 구성된 MMoF 시스템은 밀리미터 대역 신호를 전자-광학적으로 변조(electro-optic modulation)하여 광섬유

에 실어 보낸 뒤 다시 광 검출기(photo detector; PD)를 통해 복원해 내는 광학 연결부와 이렇게 복원된 밀리미터 대역 신호를 안테나로 송수신하는 무선 연결부로 구성되어 있다^[1].

MMoF 시스템의 광학 연결부에서는 밀리미터 대역 신호를 광섬유에 전송하기 위하여 대개 OSSB 전송 방식을 사용한다. OSSB 기법은 Mach-Zehnder 변조기를 사용하여 밀리미터 대역의 신호를 광학적으로 변조하는 방식인데 광섬유에서 발생하는 색 퍼짐에 강하고, 주파수 대역폭 효율이 우수하다는 장점을 가지고 있다^[2]. 그러나 OSSB 방식은 손쉽게 단측파대(single sideband; SSB) 변조의 효과를 얻기 위하여 위상 변조

* 정회원, 홍익대학교 전자전기공학부
(Dept. of Electronic and Electrical Engineering,
Hong-Ik University)

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음
(IITA-2005-C1090-0502-0029)

접수일자: 2006년1월31일, 수정완료일: 2006년3월14일

를 사용하기 때문에 비선형 특성을 가지게 된다는 단점이 있다. 이러한 비선형 특성을 피하기 위해서는 정진폭 특성을 가지는 신호를 사용하는 것이 가장 좋으나, 정진폭 신호를 사용할 수 없을 경우에는, OSSB 변조기로 입력되는 신호의 전력을 되도록 줄여야 한다. 그러나 입력 신호의 전력을 지나치게 줄이면 채널 잡음의 영향에 취약하게 된다. 그러므로 입력 전력은 비선형 왜곡과 채널 잡음의 영향을 고려하여 신중하게 선택되어야 한다.

MMoF 시스템의 무선 연결부는 채널의 다중 경로 현상에 의한 페이딩과 인접 심볼간 간섭(inter-symbol interference; ISI)이 존재하는 환경이다. 이 중 ISI 문제는 고속 대용량 전송을 방해하는 주된 요인으로 꼽히고 있다. 따라서 최근에는 OFDM 변조 방식이 주목을 받고 있다. OFDM을 사용할 경우 채널의 지연 확산 시간이 보호 구간의 크기보다 작으면, 이론적으로 ISI에 의한 성능 열화를 완전히 막을 수 있기 때문이다. 그러나 OFDM은 다중 부반송파의 사용으로 인하여 신호의 포락선이 소자의 선형 동작 범위를 벗어나는 경우가 많아 단일 반송파 변조 기법에 비해 비선형 왜곡에 취약하다는 단점을 가지고 있다^[3].

본 논문에서는 OSSB의 비선형성으로 인한 OFDM의 성능 열화에 대하여 알아보려 한다. 본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서는 일반적인 MMoF 시스템 광학 연결부 모형을 제시하고 그것의 복소 기저대역 표현을 얻는다. III장에서는 II장에서 얻은 광학 연결부 모형을 사용하여 OFDM MMoF 시스템의 모형을 구성하고 광학 연결부 블록의 비선형성에 의한 시스템의 성능을 분석한 후, IV장에서 결론을 맺는다.

II. MMoF의 광학 연결부 모형

MMoF 시스템의 광학 연결부는 그림 1과 같은 구조를 가지고 있다.

그림 1에서 밀리미터파 대역의 전기적 신호 $s(t) = \rho(t)\text{Re}\{e^{j(\omega_m t + \phi(t))}\}$ 는 OSSB 변조기에 의해

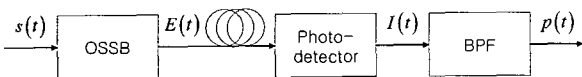


그림 1. MMoF 시스템의 광학 연결부 블록도
Fig. 1. Block diagram of optical link of MMoF system.

광신호 $E(t)$ 로 변환된다. 여기서 OSSB 블록은 참고문헌^[3]의 OSSB 방식을 사용하였으며, 변조기의 스위칭 전압과 변조 지수와 레이저 다이오드의 주파수는 각각 $V_\pi = \pi$, $x = 1/2\pi$, ω_o 로 설정하였다. 이 때, 광신호 $E(t)$ 는 식 (1)과 같이 표현된다^[2].

$$E(t) = \exp(j\omega_o t) \exp\left(j \frac{\hat{s}(t)}{2}\right) \cos\left(\frac{s(t)}{2} - \frac{\pi}{4}\right) \quad (1)$$

식 (1)에서 $\hat{s}(t)$ 는 $s(t)$ 의 힐버트 변환이다. 광섬유의 길이에 따른 색 퍼짐(chromatic dispersion) 현상을 무시하면 광 검출기(photo-detector; PD)에서 얻어지는 전기 신호 $I(t)$ 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$I(t) = |E(t)|^2 = \frac{1}{2} [1 - \sin(s(t))] \quad (2)$$

$I(t)$ 는 대역 통과 여파기(Band Pass Filter; BPF)를 통해 밀리미터파 대역의 전기적 신호 $p(t)$ 로 환원된다.

$$p(t) = 2J_1(\rho(t)) \text{Re}\{e^{j(\omega_m t + \phi(t))}\} \quad (3)$$

식 (3)을 사용하면, $s(t)$ 와 $p(t)$ 의 복소 기저대역 신호는 각각 $\tilde{s}(t) = \rho(t)e^{j\phi(t)}$, $\tilde{p}(t) = 2J_1(\rho(t))e^{j\phi(t)}$ 이 됨을 알 수 있다. 따라서 광학 연결부의 등가적 복소 기저대역 모형은 그림 2와 같이 입력과 출력이 각각 $\tilde{s}(t)$ 와 $\tilde{p}(t)$ 인 복소 기저대역 비선형 증폭기로 표현된다.

이 때 비선형 증폭기는 식 (4)와 같은 AM/AM 특성만으로 표현된다.

$$f(\rho) = 2J_1(\rho) \quad (4)$$

또한 입력 백-오프(Input Back-Off; IBO)는 식 (5)와 같이 정의 된다.

$$\text{IBO} = \frac{|V_{I, \text{sat}}|^2}{E[|\tilde{s}(t)|^2]} \quad (5)$$

여기서 입력 포화 전압 $V_{I, \text{sat}}$ 은 OSSB의 특성상 $V_\pi/2$ 가 된다.

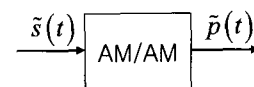


그림 2. 그림 1의 등가적 복소 기저대역 모형
Fig. 2. Equivalent complex baseband model of Fig. 1.

III. MMoF OFDM 시스템의 성능

OFDM의 부반송파 개수가 N 개이고, 심볼 시간이 T_s 라고 하면, 그림 3의 표본 시간(sampling time)은 $T_a = T_s / N$ 이 된다. 따라서 T_s 동안 k 번째 부반송파로 전송되는 복소 신호를 $x[k]$ 라고 하면, $s[k]$ 는 식 (6)과 같이 표현된다^[4].

$$s[k] = \tilde{s}(kT_a) = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] e^{j\omega_k m T_a} \quad (6)$$

여기서 $\omega_k = k/T_s$ 이다. $x[k]$ 가 iid(independent and identically distributed) 확률 변수라고 하고, N 이 충분히 큰 값이라고 하면, 중심 극한 정리에 의해 $\tilde{s}(t)$ 는 평균이 0인 복소 가우시안 확률 과정이 된다. 따라서 Bussgang 정리^[5]에 의해, $\tilde{p}(t)$ 는 식 (7)과 같이 입력 신호와 관련이 있는 항과 입력 신호와 무관한 항의 합으로 표현되고,

$$\tilde{p}(t) = \alpha \tilde{s}(t) + n_d(t) \quad (7)$$

$\tilde{r}(t)$ 는 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\tilde{r}(t) = \tilde{p}(t) + \tilde{n}(t) = \alpha \tilde{s}(t) + n_d(t) + \tilde{n}(t) \quad (8)$$

따라서 $y[k]$ 는 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} y[k] &= \sum_{m=0}^{N-1} \tilde{r}(mT_a) e^{-j(2\pi/N)mk} \\ &= \alpha x[k] \\ &\quad + \sum_{m=0}^{N-1} [n_d(mT_a) + \tilde{n}(mT_a) e^{-j(2\pi/N)mk}] \\ &= \alpha x[k] + e_{n_d}[k] + e_n[k] \\ &= \alpha x[k] + e_{n_i}[k] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 $e_n[k]$ 는 가우시안 잡음의 선형 변환 결과이기 때문에 가우시안 확률 변수가 되고, $e_{n_d}[k]$ 도 중심 극한 정리에 의해 가우시안 확률 변수가 된다. 따라서 수신기에 의한 잡음 $e_n[k]$ 가 전혀 없는 경우에도 $y[k]$ 는 마치 가우시안 잡음 채널을 통과한 것 같은 형태를 가지게 된다. 그림 4는 수신기의 잡음 $n(t)$ 가 전혀 없을 때, 서로 다른 IBO에 대하여 $y[k]$ 의 성상도를 그린 것이다. 식 (9)를 통해 예측했던 바와 같이 수신기의 잡음이 전혀 없는데

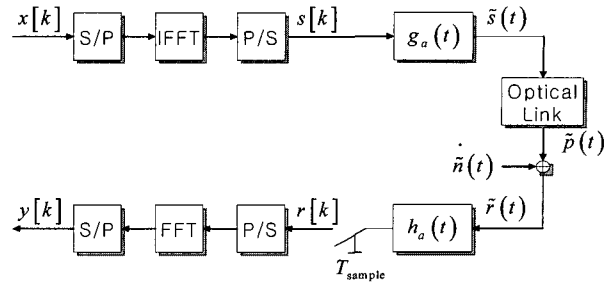


그림 3. MMoF OFDM 시스템의 블록도
Fig. 3. Block diagram of MMoF OFDM system.

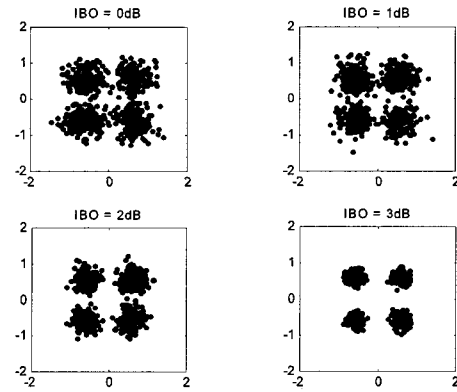


그림 4. 비선형 왜곡 잡음의 영향을 받은 신호 성상 (부반송파 개수 = 64, $N_0 = 0$)

Fig. 4. Signal constellation perturbed by nonlinear distortion noise (# of subcarriers= 64, $N_0 = 0$).

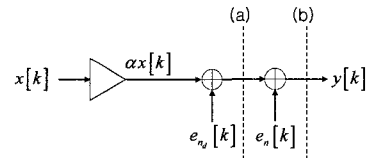


그림 5. 그림 3의 등가적 모형
Fig. 5. Equivalent model of Fig. 3.

도 불구하고 비선형 왜곡 잡음의 영향으로 마치 가우시안 잡음 환경에서 신호를 수신한 것 같은 효과가 나타나는 것을 볼 수 있다.

따라서 성능 분석을 위해 SNR에 대한 용어들을 보다 세분화할 필요가 있다. 이를 위하여 그림 3을 그림 5와 같이 등가적 모형으로 표현하였다.

그림 5의 (a) 위치에서 측정된 SNR을 $\gamma_{nl,k}$ 라고 하고, (b) 위치에서 측정된 SNR을 $\gamma_{app,k}$ 라고 하면, 다음과 같은 식을 얻게 된다^[6].

$$\begin{aligned} \gamma_{nl,k} &= \frac{|\alpha|^2 \mathbb{E}[|x[k]|^2]}{\mathbb{E}[|e_{n_i}[k]|^2]} \\ \gamma_{app,k} &= \frac{|\alpha|^2 \mathbb{E}[|x[k]|^2] + \mathbb{E}[|e_{n_d}[k]|^2]}{\mathbb{E}[|e_n[k]|^2]} \end{aligned} \quad (10)$$

그런데 식 (9)에서 실제 유효 신호 성분은 $\alpha x[k]$ 이고 전체 잡음 성분은 $e_{n_i}[k]$ 이다. 또한 $e_{n_d}[k]$ 와 $e_n[k]$ 는 서로 독립적이다. 따라서 BER 성능에 실제적으로 영향을 주는 유효적 SNR $\gamma_{eff,k}$ 은 식 (11)과 같이 정의되어야 한다^[6].

$$\gamma_{eff,k} = \frac{|\alpha|^2 E\{|x[k]|^2\}}{E\{|e_n[k]|^2\} + E\{|e_{n_d}[k]|^2\}} \quad (11)$$

식 (10)을 식 (11)에 대입하여 $\gamma_{eff,k}$ 를 계산하면 식 (12)와 같은 결과를 얻을 수 있다^[6].

$$\gamma_{eff,k} = (\gamma_{app,k}^{-1} + (1 + \gamma_{app,k}^{-1})\gamma_{nl,k}^{-1})^{-1} \quad (12)$$

식 (12)를 살펴보면, $\gamma_{app,k}$ 가 무한히 커질 때, $\gamma_{eff,k}$ 는 $\gamma_{nl,k}$ 에 수렴함을 알 수 있다. 즉 비선형 왜곡은 $\gamma_{app,k}$ 를 아무리 높여도 제거되지 않기 때문에 오류층(error floor) 현상이 발생하게 된다는 것을 알 수 있다.

$x[k]$ 가 복소 기저 대역 QPSK 신호이고, 그레이 매핑을 사용하여 전송되었다고 하면, 비트 오류(Bit Error Rate: BER)은 식 (13)과 같이 구해진다.

$$P_b = \frac{1}{N} \sum_k^{N-1} Q(\sqrt{\gamma_{eff,k}}) \quad (13)$$

식 (12)를 식 (13)에 대입하고 $E_b/N_0 = \gamma_{app,k}/n_{bit}$ 임을 이용하면, 주어진 E_b/N_0 에 대한 이론적 BER을 계산할 수 있다. 여기서 n_{bit} 는 심볼 당 비트의 개수로써 QPSK의 경우에는 2가 된다. 따라서 $\gamma_{nl,k}$ 만 얻을 수

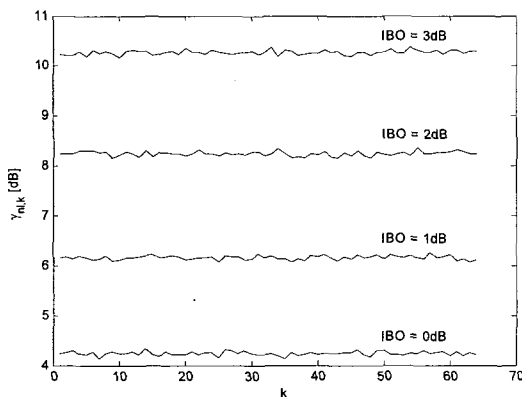


그림 6. 서로 다른 IBO에서 추정된 $\gamma_{nl,k}$
Fig. 6. $\gamma_{nl,k}$ estimated for different IBO.

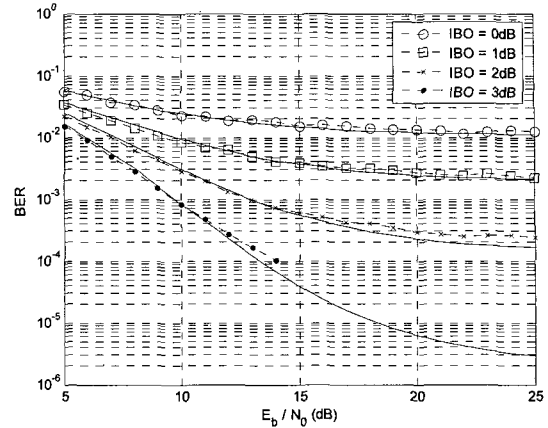


그림 7. OFDM MMoF 시스템의 BER 성능
Fig. 7. BER performance of OFDM MMoF system.

있으면, 주어진 E_b/N_0 에 대한 이론적 BER의 계산이 가능하다. 본 논문에서는 모의실험을 통하여 $\gamma_{nl,k}$ 를 추정하여 P_b 를 계산하였다. 한편, 참고문헌^[6]에서는 $\gamma_{nl,k}$ 를 정확하게 계산할 수 있는 방법을 소개하고 있다.

그림 6은 그림 5의 정상도로부터 추정된 $\gamma_{nl,k}$ 이다. 여기서 하나의 $\gamma_{nl,k}$ 를 추정하기 위해 사용된 OFDM 심볼의 개수는 총 10000개이다. 보다 정밀한 추정을 위해서는 표본의 개수를 더욱 늘려야 할 필요가 있다.

그림 6을 보면 IBO가 높을수록 $\gamma_{nl,k}$ 가 높아지며, $\gamma_{nl,k}$ 는 부반송파 색인 k 의 영향을 거의 받지 않는다는 사실을 알 수 있다. 이와 같이 추정된 $\gamma_{nl,k}$ 을 이용하여 OFDM MMoF 시스템의 성능을 분석하면, 그림 7과 같은 결과를 얻을 수 있다.

그림 7에서 실선은 추정된 $\gamma_{nl,k}$ 을 식 (13)에 대입하여 얻은 이론적인 BER이고, 점선은 모의실험을 통해 얻은 실험적인 BER이다. 위의 그림을 보면 식 (9)에서 예측했던 바와 같이 $\gamma_{nl,k}$ 로 인하여 오류층 현상이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 위의 그래프를 활용하여 주어진 E_b/N_0 에 대하여 요구되는 BER을 만족시키기 위해 IBO를 어느 정도로 설정해야 할지 결정할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 OSSB 변조 방식의 비선형성에 따른 OFDM MMoF 시스템의 BER 성능을 분석하고 그 결과를 모의실험으로 검증하였다.

그 결과 OSSB 변조 방식과 PD를 포함하는 광학 연결부는 AM/AM 특성 함수가 제 1차 베셀 함수로 표현되는 비선형 증폭기로 취급될 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 비선형 증폭기에 의한 왜곡 잡음을 모의실험으로 추정하여 OFDM MMoF 시스템의 이론적인 BER을 분석하였다. 또한 모의실험을 통하여 이를 검증하였다. 이 결과는 채널 잡음의 전력 밀도가 N_0 라고 할 때, 요구되는 BER을 만족시키기 위하여 OSSB에 입력되는 밀리미터 대역 신호의 전력수준을 결정하는 데에 사용할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] C. Yun, T.-S. Cho, S. Sung, and K. Kim, "Performance analysis of MMoF systems considering laser phase noise under Rician fading", *IEEE MTT-S Digest*, pp. 412-416, Texas, USA, June 2004.
 [2] M. Siebe, J. Conradi, and D. E. Dodds, "Optical single sideband transmission at 10 Gb/s using only electrical dispersion compensation", *J. Lightwave technol.*, pp. 1742-1749, vol. 17, no. 10, Oct 1999.

[3] R. van Nee, R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Artech House, 2000.
 [4] L. J. Cimini, "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing", *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-33, no. 7, Jul 1985.
 [5] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, McGrawHill, 1991
 [6] P. Banelli, S. Cacopard, "Theoretical analysis and performance of OFDM signals in nonlinear AWGN channels", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, no. 3, pp. 430-441, Mar 2000.

저 자 소 개



김 창 중(정회원)
 2000년 홍익대학교 전자전기 공학부 학사졸업(공학사).
 2002년 홍익대학교 대학원 전파공학과 석사 졸업 (공학석사)
 2002년 홍익대학교 대학원 전파통신공학과 박사과정 재학

<주관심분야 : 통신, 전송이론, 부호이론>



이 호 경(정회원)
 1981년 서울대학교 전자공학과 졸업 (공학사).
 1987년 Northrop Univ. 전자공학과 졸업 (공학석사).
 1994년 USC 전기공학과 졸업 (공학박사).

<주관심분야 : 채널 코딩, TCM, Turbo TCM, 이동통신, 위성통신>