

OFDM을 사용하는 무선 가시 광통신에서의 PAPR 저감 기법과 BER성능 개선

정희원 유 상 범*, 유 흥 균*

PAPR Reduction Technique and BER Performance Improvement in OFDM-based Wireless Visible Light Communication

Sang-Burm Ryu*, Heung-Gyoon Ryu* *Regular Members*

요 약

무선 광 통신 시스템에서 고속의 데이터를 전송하기 위한 방법으로 대역 효율이 높은 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 시스템이 연구되고 있다. OFDM 시스템은 PAPR(peak to average power ratio)이 높고 비선형 에러와 디바이스의 불균형으로 발생하는 ICI(inter channel interference)가 발생한다. 무선 광통신 시스템에서 LED(light emission diode)의 구동 전류에 의하여 구동되는 광 출력 파워는 비선형이며 전송 신호는 왜곡된다. 그러므로 비선형 LED 전달함수와 OFDM 신호에 의한 방사된 광 출력의 수신 성능에 대한 연구가 진행되었다. 비선형 왜곡에 의해 발생하는 효과는 기존의 무선 통신에서 사용되는 OFDM의 비선형 특성과 다르며 BER 성능을 저감시킨다. 본 연구에서는 최근 연구된 LED의 비선형성 전달함수를 적용하며, 비선형 왜곡과 Back-off에 의하여 수신기의 주파수영역에서 진폭 감쇄와 ICI를 발생시키므로, BER 성능을 개선시키기 위한 방법을 제안한다. 먼저 LED의 비선형 왜곡을 감소시키기 위한 새로운 PAPR저감 기법을 제안하며, 또한 수신 성능을 향상시키기 위하여 적응형 채널 추정 방식과 전송된 신호를 사용하여 SNR(signal to power ratio)을 개선하여 BER(bit error rate)을 개선하였다. 제안된 방법들을 시뮬레이션 결과를 통하여 확인한다.

Key words : visible light communication, PAPR, ICI, white LED, DFTS OFDM

ABSTRACT

OFDM systems are much studied for the recent high speed wireless optical communication system. OFDM system has basically high PAPR and ICI easily generated because of non-linearity and RF impairments. In the wireless optical communication system, optical output power driven by current of LED is not linear so that transmission signals are distorted. Therefore, research about reception performance of this nonlinear optical output emitted by non-linear LED transfer function and OFDM signal has been conducted. Nonlinear effect of LED is different from nonlinear effect of OFDM system in the conventional radio communication system, which degrades the BER performance. In this paper, we apply non-linear transfer function of recently studied LED into OFDM system. So, for reducing the PAPR and suppressing the ICI in frequency domain of receiver, we suggest a new PAPR reduction technique to reduce non-linear distortion of LED and an adaptive ICI suppression algorithm so that BER performance may be improved. Also, the proposed method is verified through simulation results.

* 충북대학교 전자정보대학 전자공학과 (ecomm@cbu.ac.kr)

논문번호 : KICS2010-08-394, 접수일자 : 2010년 8월 16일, 최종논문접수일자 : 2011년 3월 3일

1. 서 론

최근 LED를 사용한 무선 가시 광 통신 시스템을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 대표적인 연구분야로는 고효율 LED를 사용하며 다중 레벨 변조, CSK 그리고 QAM을 사용하는 DMT (discrete multi tone) 방식을 사용하여 100Mbit/s의 고속 통신을 하는 방법^[1]과 조명을 고려한 line coding 방식이 있다.

본 논문에서는 고속 통신을 위해 LED를 사용하여 고속 데이터 전송을 하기 위한 OFDM 통신 방식을 연구하였다. OFDM 통신 방식은 대역 효율이 높고 ISI에 강하여 고속 통신에 적합하지만, PAPR이 높아 ICI에 민감한 단점이 있다. 그러나 주파수 영역에서의 등화기 구조는 one-tap 방식으로 단순하다. 그러므로 가시 광 통신을 사용한 고속 데이터 전송 방식으로 많은 연구가 진행되고 있다. 가시 광 통신에 사용되는 OFDM 방식은 DMT이며 이 방식은 PAPR이 매우 높기 때문에 최근 LED의 광 출력 특성에 의한 비선형 에러에 관한 연구가 진행되고 있다. 또한 높은 PAPR로 인하여 송신 신호의 크기는 제한되고 채널 상황을 고려한 등화기 사용에 대한 연구도 진행되고 있다. 그러므로 PAPR을 저감하여 송신 광 출력의 선형성을 확보하고 제한된 송신 출력을 보상하기 위한 등화기 설계는 매우 중요하다.

본 연구에서는 LED를 사용한 가시 광 통신에서 발생하는 비선형 에러의 영향을 검토한다. 먼저 송신 시 LED의 비선형 전달 함수에 의하여 비선형 왜곡을 검토한다. 기존 연구로서 infrared, white, red LED의 3가지 종류에 따라서 비선형 왜곡 전달함수가 연구됐다^[2]. 연구 결과로서 비선형 왜곡은 구동 전류에 따라서 2차 다항식의 비선형 전달함수를 가지며 ICI의 영향으로 SNR 손실이 증가함을 나타내었다. [3]에서는 [2]의 실험 결과를 통하여 분석 모델을 정립하였다. [4]에서는 LED의 비선형 왜곡을 적용하여 대역 내 왜곡이 증가하므로 이에 대한 EVM을 검토하고 B/O (back-off)와 ZF(zero forcing) 등화기를 사용하여 BER 성능을 검토하였다. 그러나 [2]에서와 같은 구체적인 비선형 전달함수는 사용되지 않았다. 또한 비선형 왜곡을 줄이기 위한 B/O는 전송거리가 줄어드는 단점이 있다.

OFDM 시스템은 높은 PAPR문제를 보완하기 위한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 단순히 B/O를 하거나 일정한 크기 이상의 입력 신호를 자르는 클리핑 방식 등이 있다. 그러나 이러한 방법들은 전력 효율을 떨어뜨리거나 ACI(adjacent channel interference)가

발생하는 등의 문제를 갖는다. 한편, 위상을 조절하는 방식으로 SLM(selective mapping)과 PTS(partial transmit sequence)가 있다. 이러한 방식은 성능은 우수하지만 부가 정보(side information)가 필요하기 때문에 데이터 전송 효율이 떨어지는 문제가 있다^[5]. PAPR을 저감하는 또 다른 방법으로는 DFT 변환 기법이 있으며, DFT 변환 기법은 IFFT(inverse fast Fourier transform) 처리에 앞서 병렬 신호를 DFT 처리하는 방법으로 부가 정보 없이 큰 PAPR 저감 효과를 갖는 좋은 방법으로 논의되고 있다. 그러나 DFT확산하여 송신 신호의 PAPR을 감소시킬 수 있지만 주파수 영역에서의 데이터는 매우 큰 진폭 변화가 발생할 수 있다. 그러므로 수신기의 주파수 영역에서의 ICI의 영향으로 성능 저하가 2~3dB 이상 발생한다^[6].

OFDM 시스템에서 PAPR저감과 ICI 저감을 동시에 만족하기 위한 연구는 매우 중요하다. 기존의 방법은 ICI를 제거하기 위하여 데이터 변환 매핑 방법과 복소 공액 매핑 방법이 소개되었다^[7-10]. 기존의 매핑 방법을 통한 ICI 제거 기법은 PAPR이 매우 높기 때문에 PAPR과 ICI를 동시에 제거하기 위한 방법으로 DFT 확산 방법을 적용하고 대칭 데이터 변환 매핑 방법과 대칭 데이터 복소 공액 매핑 방법을 통해 PAPR과 ICI 제거를 개선시켰다^[11]. 이러한 방법들은 가시 광 통신에 사용되는 OFDM 시스템의 매핑 방법과 매우 유사하다. 또한 IFFT 후단에서 실수 값을 가져야 하므로 [11]과 유사한 방법이 적용 가능하다. 그러나 적용된 비선형 에러 모델은 모든 부반송파에 걸쳐 위상 변화가 발생하므로 클리핑이 발생하지 않더라도 ICI가 발생하여 SNR이 저하된다.

그러므로 본 논문에서는 가시 광 통신에서의 비선형 전달함수^[1]를 고려하고 DFT 확산 기법을 적용하고 새로운 부반송파 매핑 방식을 적용하여 PAPR과 ICI를 동시에 저감시키는 방법을 제안한다. 그리고 수신기에서 ICI를 억압하여 채널 추정함으로써 성능을 향상시키며 매핑 데이터를 사용한 diversity 효과를 통하여 SNR을 개선한다. 기존의 연구 결과에서는 매우 근거리에서 측정된 결과이므로 본 연구에서도 근거리만 고려하여 가시 광 채널 모델은 사용하지 않는다. 또한 64QAM에서 비선형 에러에 의한 BER 성능이 가장 열악함으로 제안된 기법을 통하여 성능이 개선됨을 보인다.

기존의 연구결과에서 B/O를 사용하면 LED는 수신 전력이 감소되므로 ZF 등화기를 사용하여 보상하여야 한다. [4]에서는 infrared LED를 사용하기 때문에 [1]의 결과와 비교하면 비선형 에러가 크지 않다. 그러나

본 논문에서는 white LED를 검토하므로 비선형 에러에 의한 ICI의 증가는 추정 성능을 저하 시킴으로 적응적 ICI 제거 기법을 사용하여 수신 성능이 개선됨을 보인다. 그리고 무선 가시 광 통신 시스템에서 사용되는 OFDM 시스템은 LED를 사용하여 신호를 전송하기 위하여 복소 공액 대칭 방식의 부 반송파 매핑을 사용한다. 또한 제안된 방법 역시 DFT 확산 전에 데이터를 복사하여 매핑한다. 그러므로 전송된 매핑 심볼을 원래의 신호로 복구하여, 제안된 방법의 알고리즘으로 다이버시티 효과를 얻을 수 있어서 수신 SNR이 개선된다.

II. LED 가시 광 통신 시스템에서의 비선형 특성

그림 1은 LED를 구동하기 위한 회로 도이다. OFDM 신호가 DAC를 거친 후에 LED를 구동하기 위해서는 전류로 변환 되어야 한다. 또한 LED는 0 이상의 값만이 전송 가능하므로 적절하게 DC 바이어스 되어야 한다. 여기서 바이어스 포인트는 최대 허용 순방향 전류와 진폭 왜곡과 클리핑을 고려하여 조절한다.

이상적인 LED의 입출력 전달함수는 출력 신호가 왜곡이 없다고 볼 수 있다. 그러나 실질적으로는 LED의 입출력 전달함수는 비선형이 존재한다. [1]에서는 3개의 서로 다른 LED 종류에 따라 다항식을 가지는 비선형 전달 함수는 다음과 같이 정의 하였다.

$$P_{out}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n [I(t) - I_{DC}]^n \quad (1)$$

여기서 P_{out} 은 출력 전력, t 는 시간, I 는 구동 전류이

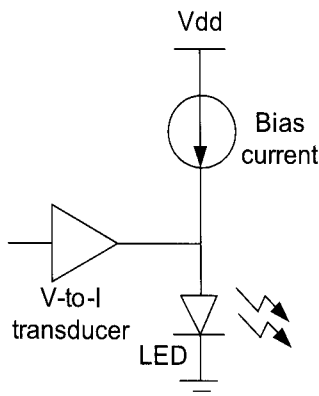


그림 1. LED 구동 회로.
Fig. 1. LED driver circuit.

며, I_{DC} 는 바이어스 전류이며 b_n 은 전달함수의 n 번째 항의 계수이다. 이와 같은 비선형 전달함수는 출력 신호에 혼 변조 성분을 발생시킨다. 바이어스 된 OFDM 신호는 다음 식과 같다고 가정한다.

$$I(t) = \sum_{n=1}^{N-1} I_n \sin(2\pi f_n t + \phi_n) + I_{DC} \quad (2)$$

(2)의 2차 다항식을 갖는 비선형 시스템의 출력 신호는 기본 신호 성분과 harmonics 성분과 $f_n + f_m$ 과 $f_n - f_m$ 의 주파수를 가지는 혼 변조 성분이 발생한다. 본 논문에서는 [3]의 실험 결과를 사용하기 위하여 LED의 2차 다항식과 계수 값을 다음과 같이 사용한다.

$$P_{out}(t) = b_0 + b_1(I_{in} - I_{DC}) + b_2(I_{in} - I_{DC})^2, \quad (3)$$

$$b_0 = \zeta, b_1 = 1, b_2 = -4\xi + 2$$

여기서 LED에 따른 기존 논문의 실험 결과의 비선형 매개변수인 ξ 의 값은 다음과 같다^[2].

그림 2는 식 (3)과 표 1의 값을 사용한 입출력 전달함수의 결과이며 LED 종류와 구동 전류에 따른 출력 전력을 나타내었다. 정규화 된 구동 전류와 출력 전력을 통하여 살펴보면 Infrared LED가 비선형 왜곡이 가장 적으며 그 다음이 white LED이고 red LED가 가장 비선형 왜곡이 크며, 이는 기존 연구결과와 같다^[2].

본 논문에서는 white LED를 사용하여 비선형 왜곡에 따른 ICI의 영향을 시뮬레이션을 하였으며 BER 성능이 기존 논문과 같음을 확인하였다. 그림 3에서 white LED의 $\xi = 0.582$ 를 적용하여 QPSK, 16QAM,

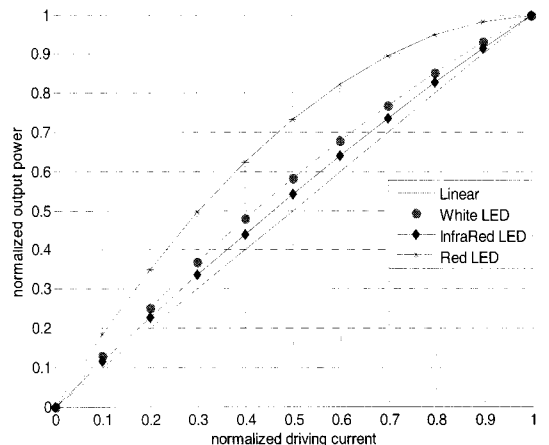


그림 2. LED 종류에 따른 출력 전력.
Fig. 2. Output power according to LED type.

표 1. LED의 종류에 따른 ξ 값
Table. 1. ξ according to LED type

LED model	ξ
White LED	0.582
IR LED	0.541
Red LED	0.732

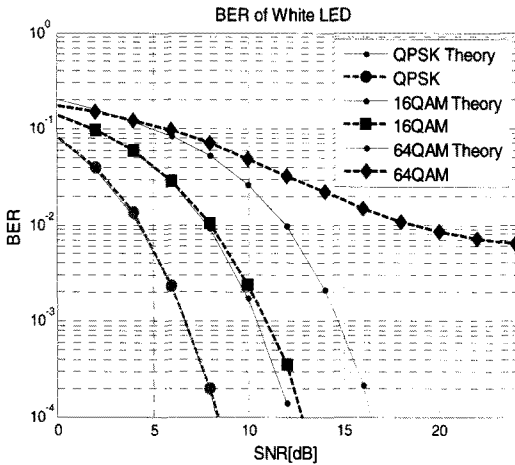


그림 3. White LED를 고려한 OFDM의 변조 방식에 따른 BER.
Fig. 3. BER of white LED according to modulation type of OFDM.

64QAM의 경우에 따라 BER 성능을 구하였다. 16QAM의 경우 BER=10⁻⁴에서 0.6dB 정도 이론곡선에 비해 열화 되고 64QAM의 경우는 BER=10⁻²에서 성능이 열화 된다.

III. 가시 광 통신에 사용되는 OFDM 시스템을 위한 PAPR 저감 기법

그림 4는 가시 광 통신을 위해 제안한 DFTS OFDM의 블록 다이어그램이다. 기존의 무선 가시 광 통신에서 OFDM 심볼은 매우 높은 peak power를 가지게 되므로 DFT 확산 기법을 사용하여 PAPR을 낮춘다. 또한 변조 레벨이 증가할 수록 PAPR이 증가하므로 DC 바이어스 전에 증폭기를 사용하여 B/O 함으로써 선형 영역에서 동작하도록 하여 BER 성능을 개선한다. 본 논문에서는 [1]의 비선형 모델을 사용하여 [4]에서와 같이 B/O를 하고 수신 단에서 감쇄를 보상하는 방법을 사용한다.

입력된 데이터는 QAM 변조되어 복소 신호로 변환되고 N개의 부반송파로 S/P 변환되며 각 부반송파는

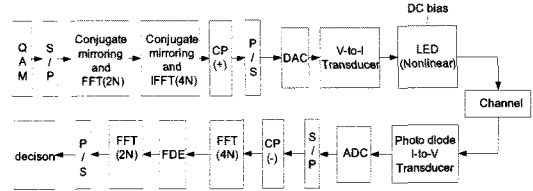


그림 4. 제안된 DFT 확산 OFDM 시스템.
Fig. 4. Proposed DFTS OFDM system.

d_n 으로 매핑 된다. $n + 1, 2, \dots, N-1$ 이며 부반송파의 수이다. 본 논문에서는 변조 레벨을 QPSK, 16QAM, 64QAM로 사용하였다.

DFT 후에 실수 신호만을 발생 시키기 위하여 N개의 정보 심볼들을 복소 공액을 취하고 대칭적으로 매핑한다. $d_{2N-n} = d_n^*$ 이고 여기서 $n + 1, 2, \dots, N-1$ 이며 $d_0 = d_N = 0$ 이다. 그 다음 매핑 된 신호 d_n 은 DFT 확산 되며 확산 된 데이터는 마찬가지로의 방법으로 X_n 으로 매핑되며 대칭적으로 X_{4N-n} 이고 $X_0 = X_N = 0$ 으로 매핑된다. 그림 5의 4N의 IFFT의 결과 신호는 다음과 같다.

$$x_k = \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{j2\pi k(n/4N)} \quad (4)$$

여기서 $x_k, k = 1, 2, \dots, 4N-1$ 는 실수 값만을 가지는 OFDM 신호이다. 4N개의 샘플이 1 symbol이 되고 병 직렬 변환된다. DC 바이어스 전류는 DAC를 통과 후 추가 된다. 기존의 DFTS OFDM과는 다르게 복소 공액 대칭 매핑을 DFT 확산 전에 적용한 이유는 앞서의 연구 결과에서 적용되는 비선형 에러는 클리핑과 상관없이 모든 부반송파에 걸쳐 발생한다. 그러므로 ICI가 수신 단의 주파수 영역에서 발생하므로 DFT 확산 후 실수만 존재하게 되면 ICI가 매우 감소하게 된다. 그 결과를 시뮬레이션을 통하여 확인한다.

비선형 왜곡을 가지는 수신 신호는 다음과 같다고 가정한다. Z는 감쇄 상수이고 d(t)는 랜덤한 가우시안 분포를 갖는 비선형 에러이다.

$$s(t) = zx(t) + d(t). \quad (5)$$

AWGN을 통과한 수신된 신호의 샘플 된 데이터는 아래의 식과 같이 표현될 수 있다.

$$r(n) = s(n) \otimes h(n) + v(n). \quad (6)$$

여기서 $s(n)$, $h(n)$, $v(n)$, $r(n)$ 은 각각 송신 신호, 채널 임펄스 응답, 복소 가우시안 잡음, 수신된 신호이다.

FFT 후의 비선형 에러가 존재하는 k 번째 부 반송파에서 복조된 신호는 다음과 같이 유도 될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 Y_k &= \frac{1}{4N} \sum_{n=0}^{4N-1} r[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \\
 &= \frac{1}{4N} \sum_{n=0}^{4N-1} \{zx(n) + d(n) \otimes h(n) + v(n)\} \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (7) \\
 &= \frac{1}{4N} \sum_{n=0}^{4N-1} \sum_{i=0}^{12N-1} zX_i \cdot H_i \cdot e^{j\left[\frac{2\pi}{N}n(i-k)\right]} + D_k + N_k
 \end{aligned}$$

여기서 $D_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} D_i \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}in} \cdot H_i$ 이며 식 (3)의 비선형 왜곡 항의 주파수 영역에서의 ICI 성분이다.

IV. 가시 광 통신을 위한 OFDM 시스템의 수신 성능 개선

그림 5는 VLC 를 위한 OFDM 시스템의 수신 성능 개선을 위해 제안된 시스템이다. 기존 연구에서 ICI에 의한 SNR 열화를 개선하기 위한 매핑 구조에 대하여 연구가 활발히 진행되었다. 그러나 본 논문에서는 매핑 방법에 의해 ICI 가 개선되거나 기존 연구 결과에서의 연산과정으로 ICI 가 개선되는 것은 아니다. 제안된 매핑 데이터를 이용한 연산 과정에서 diversity 효과에 의하여 SNR이 개선된다. 본 논문에서는 VLC에 사용되는 OFDM 시스템의 복소 공액 대칭 매핑 데이터를 사용한 SNR 개선을 위한 방법을 제시한다. 여기서 주의 할 점은 수신 성능 개선을 위해 DFTs OFDM과 OFDM의 두 가지 경우 모두 적용될 수 있다. 앞서 언급된 DFT 확산 전의 매핑된 데이터와 IFFT 전단의 매핑된 데이터 d_n 과 X_n 은 각각 $d_{2N-n} = d_n^*$ 과 $X_{4N-n} = X_n^*$ 으로 매핑 되었다. 수신 단에

서 FFT 후 수신 SNR의 향상을 위한 방법은 다음과 같다.

$$Z = (Y_k + Y_{4N-k}^*) / 2 \quad (8)$$

수신 단의 FFT후의 Y_k 는 복소 공액 대칭 매핑된 데이터를 역 과정을 거친 다음 더해지고 평균값 취하게 되면 다이버시티의 효과로 인한 SNR 개선이 향상된다.

여기서 (8)의 신호는 DFT 역 확산 되고 같은 방법으로 다음 과정을 거친다.

$$\delta = (\tilde{d}_n + \tilde{d}_{2N-n}^*) / 2 \quad (9)$$

(8)과 (9)의 과정을 통하여 수신된 데이터는 SNR이 개선되며 시뮬레이션 결과를 통하여 검증한다.

LED를 사용한 가시 광 통신 시스템에서 사용되는 OFDM 시스템의 비선형 에러를 개선하기 위하여 사용하는 B/O는 IBO(input back off)이다. 그러므로 수신 신호가 감소하므로 ZF를 사용하여 보상하여야 한다. 그러므로 B/O에 의하여 발생하는 성능 열화보다 비선형에 의한 ICI의 성능 열화가 크다는 것을 앞서의 결과를 통하여 알 수 있다. 이러한 ICI는 채널 추정 시 에러를 발생 시킨다. 랜덤 한 ICI를 채널 추정 과정에서 억압하기 위하여 다음의 방법을 사용한다. 그림 6은 프리엠블을 사용하여 채널을 추정하고 보상하는 과정이다.

순환 지연이 제거된 수신 신호의 FFT 후단에서의 보상 신호 처리 과정은 다음과 같다.

$$H_k = Y_k / X_k \quad (10)$$

위 식에서와 같이 간단한 LS (least square) 기반에 의해 채널 추정 동작을 한다.

채널 추정 성분은 다음과 같다.

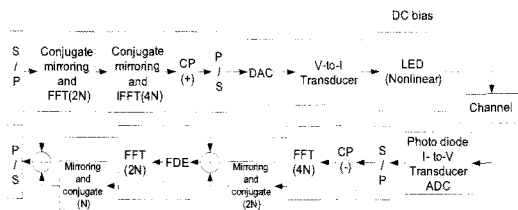


그림 5. VLC DFTs OFDM의 수신 성능 개선을 위한 시스템 Fig. 5. System for VLC DFTs's reception performance improvement

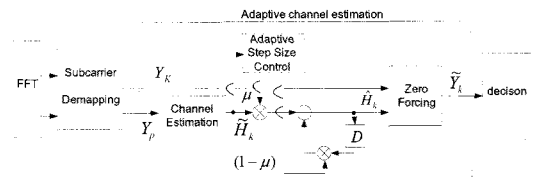


그림 6. 비선형을 고려한 적응적 채널 추정. Fig. 6. Adaptive channel estimation that consider non-linear.

$$\tilde{H}_k = zX_k H_k + \frac{D_k + N_k}{X_k} = zH_k + W_k \quad (11)$$

식 (11)에서 채널 응답의 W_k 는 ICI와 비선형 복소 왜곡 성분과 AWGN 잡음 항이다. \tilde{H}_k 에 미치는 비선형 에러로 인한 랜덤 한 위상 변화의 영향을 줄이기 위하여 식 (13)식의 알고리즘을 사용한다. 여기서 μ 는 채널 추정을 위한 스텝 사이즈이다. 그림 6의 adaptive step size control은 μ 의 값을 채널 채널응답에 따라 적응적으로 선택하기 위한 블록이다. 그러므로 (12)의 값이 작을수록 채널의 변화는 작다고 할 수 있으며 커질수록 스텝 사이즈가 증가하고 채널응답의 평균 전력에 반비례하며 μ 는 $0 < \mu \leq 1$ 인 값을 가져야만 한다.

$$\mu = \left| \text{mean}(1 - \tilde{H}_k) \right|^2 \quad (12)$$

여기서 채널의 변화는 어느 정도 선형적이라고 가정한다. (14)에서 \hat{H}_k 는 \tilde{H}_k 와 \hat{H}_{k-1} 는 μ 에 의하여 조절 되는 필터링 되는 결과이다.

$$\hat{H}_k = \mu \tilde{H}_k + (1 - \mu) \hat{H}_{k-1} \quad (13)$$

$$\text{if } \left| \tilde{H}_k - \hat{H}_k \right| > \mu, \tilde{H}_k = \hat{H}_{k-1} \quad (14)$$

여기서 (14)는 원치 않는 ICI의 영향으로 발생하는 채널 추정 데이터의 잡음을 감소 시키기 위하여 잡음이 큰 데이터인 경우 현재의 추정 신호를 제외한 추정 신호로 대체하여 잡음을 감소 시킬 수 있다. \tilde{H}_k 는 채널 추정 신호이며 RF 불요 성분이 포함되어 있는 ICI 성분은 위와 같은 등화 하여 분리될 수 있다. 등화과정 중에 위상 회전이 작고 랜덤 하지 않은 성분들은 제거 되고 채널응답에서는 가우시안 분포를 가지는 ICI 성분은 일정 필터 동작에 의해 억제 된다.

V. 시뮬레이션 결과 및 논의

시뮬레이션을 위한 조건은 다음과 같다.

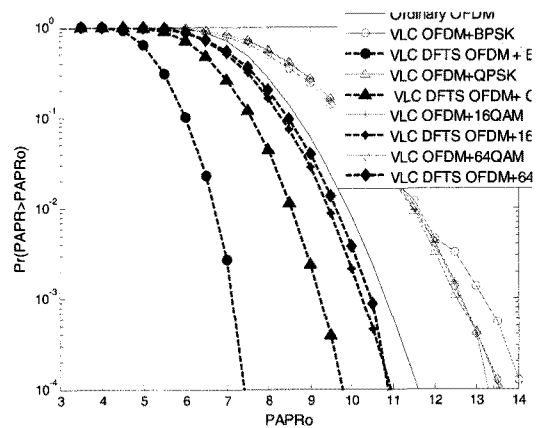
- 변조 방식: QPSK, 16 QAM, 64QAM
- IFFT size: N=128,256, M=64.
- Cyclic prefix: 32
- LED 종류: White LED

• Back-off: 0~9dB

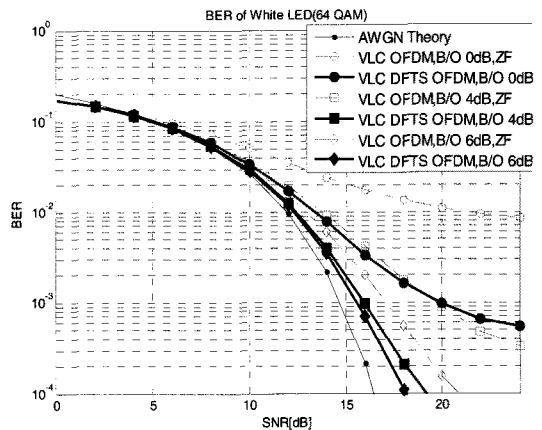
• 기존의 가시 광 통신을 위한 OFDM: VLC OFDM

• 제안된 가시 광 통신을 위한 DFTS OFDM: VLC DFTS OFDM

그림 7의 (a)는 제안된 VLC DFTS OFDM과 VLC OFDM과의 PAPR의 성능 비교이다. VLC OFDM의 PAPR은 일반 OFDM에 비하여 2dB 성능이 열화 되지만 제안된 VLC DFTS OFDM은 BPSK의 경우 7.6 dB, QPSK의 경우 9.6dB, 16QAM의 경우 11dB, 64QAM의 경우 11.2dB의 성능을 나타낸다. 그러나 본 논문에서는 클리핑을 사용하지 않으므로 PAPR에 의한 성능 보다는 각 부반송파에 적용되는 비선형 에러에 의한 ICI의 증가를 해소하는 방법에 초점을 맞춘다. 그림 7의 (b)의 경우는 BER을 사용한 성능 비교이



(a) VLC DFTS OFDM의 PAPR



(b) VLC OFDM과 VLC DFTS OFDM의 B/O에 따른 성능 비교

그림 7. BER 성능 비교

Fig. 7. BER performance comparison.

다. B/O=0dB의 경우 BER= 10^{-2} 에서 제안된 방식이 6dB 개선되며 B/O=4dB의 경우 BER= 10^{-3} 에서 4dB 개선되고 B/O=6dB에서 3dB 개선된다. PAPR 저감과 ICI 개선 효과만을 확인하기 위하여 모두 적응적 채널 추정방식을 사용하였다.

그림 8은 white LED의 비선형 모델을 적용하고 제안된 방식을 사용할 경우와 아닐 경우의 BER 성능이다. 제안된 방법의 ICI에 의한 SNR 성능 열화 개선의 정도를 알기 위하여 프리앰블은 비선형 특성을 고려하지 않고 시뮬레이션 하였다. VLC OFDM의 경우와 DFTS OFDM에 복소 공액 대칭 매핑을 한 경우는 BER= 3×10^{-4} 에서 3.5dB 개선된다.

그림 9는 프리앰블에도 비선형 모델을 적용하고 B/O의 변화에 따라 수신 성능 개선을 위하여 ZF를 사용할 경우 제안된 적응적 채널 추정 기법을 사용한 경우의 성능 비교이다. 이 경우 제안된 방법의 주파수 영역에서의 PAPR이 매우 높아 지므로 비선형 모델이 적용되면 매우 큰 ICI가 발생한다. 그러므로 B/O=6dB에서 BER= 6×10^{-4} 이상의 에러가 발생한다. 하지만 제안된 적응적 채널 추정을 사용하면 B/O=0dB에서 BER= 4×10^{-4} 이하의 에러가 발생한다. 그러므로 BER= 3.8×10^{-4} 에서 제안된 적응적 채널 추정 방식은 성능이 5.5dB 개선된다.

그림 10은 (8), (9)을 사용하였을 경우 수신 성능 개선을 검토하였다. B/O 6dB의 경우 (8), (9)을 사용하지 않은 VLC OFDM은 VLC DFTS OFDM 보다 BER= 10^{-3} 에서 2dB 성능이 열화 된다. VLC DFTS OFDM에서 (8)을 사용할 경우 2.6dB 성능이 향상된다. 또한 (8), (9)을 사용할 경우는 6dB 개선되는 것을 알 수 있다. 다이버시티 효과로 BER= 10^{-3} 에서 VLC

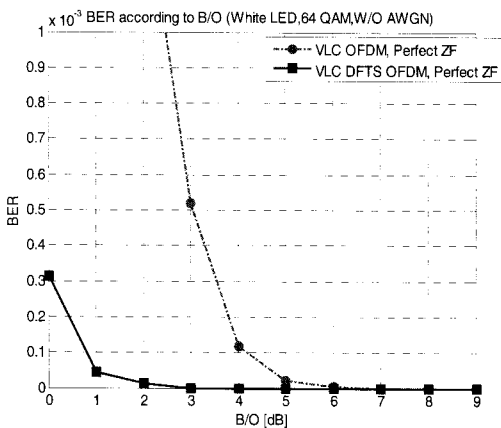


그림 8. B/O의 BER 성능
Fig. 8. BER performance according to B/O.

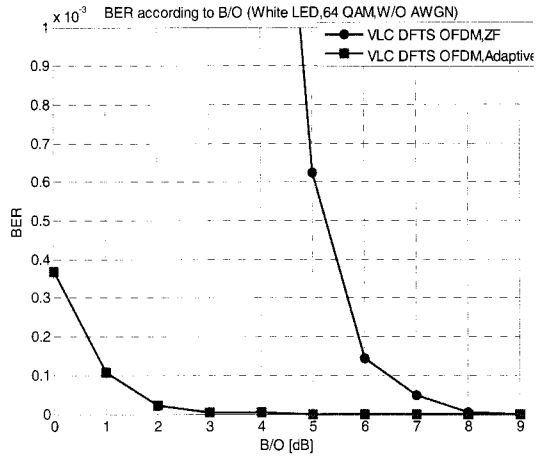


그림 9. 적응적 채널 추정의 B/O의 BER 성능
Fig. 9. BER performance according to B/O of adaptive channel estimation.

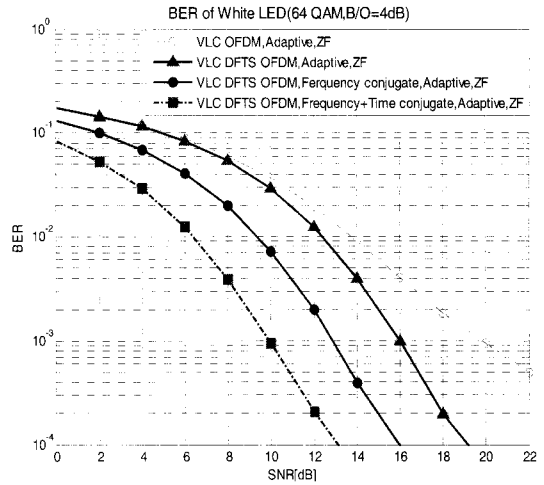


그림 10. SNR 개선 방법에 따른 BER 성능
Fig. 10. BER performance according to SNR improvement method.

OFDM 보다 총 8.5dB 향상된다.

VI. 결론

본 연구에서는 무선 가시 광 통신 시스템에서 LED의 입력력 전달 함수의 비선형 모델을 검토하였다. 기존 LED의 비선형 모델을 검토 및 분석한 후 입력력 결과를 확인함으로써 수신 단의 출력 결과를 통하여 ICI의 발생 정도를 확인하였다. 결과적으로 64QAM에서는 비선형 에러가 수신기 불가능 할 정도로 BER 성능이 저하됨을 알 수 있었다. 비선형 에러를 극복하기 위한 방법으로 PAPR 저감 기법인 DFT 확산 방법

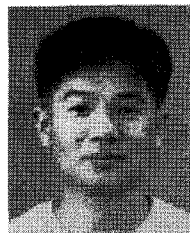
을 적용하였으나 PAPR은 저감되어, 비선형 에러가 $BER=3 \times 10^{-4}$ 에서 0.6dB 개선된다. 그러므로 PAPR도 저감하면서 비선형 에러를 크게 감소시키기 위하여 DFT 확산 전에 공액 대칭 매핑하는 방법을 제안하였다. 그 결과 3.5dB 개선된다. 그러나 주파수 영역에서의 PAPR이 증가하여 채널 추정 시, 비선형 에러의 영향이 증가 함으로 적응형 채널 추정 방식을 제안하였다. 그 결과 5.5dB의 성능 향상된다. 또한 매핑된 데이터를 이용하여 SNR을 개선시키는 방법을 제안하였다. 그 결과 총 8.5dB의 성능이 개선된다. 결과적으로 제안된 방법은 기존의 무선 가시 광 통신에서 OFDM 통신 방식에서 발생하는 LED로 인한 비선형 에러를 극복할 수 있는 새로운 방식을 제안하였다.

참 고 문 헌

- [1] Visible Light Communications: Tutorials, IEEE 802.15 VLC SG, 2008. 3. 17.
- [2] B. nan, S.C.J. Lee, S. Randel, I. Neokosmidis, A.M.J. Koonen, J.W. Walewski, "Impact of LED Nonlinearity on Discrete Multitone Modulation," IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, Vol.1, pp.439-451, Oct. 2009
- [3] I. Neokosmidis, T. Kamalakis, J.W. Walewski, B. Inan, T. Sphicopoulos, "Impact of Nonlinear LED Transfer Function on Discrete Multitone Modulation: Analytical Approach," Journal of Lightwave Technology, Vol.27, pp.4970-4978, Nov. 2009
- [4] H. Elgala, R. Mesleh, H. Haas, "study of LED nonlinearity effects on optical wireless transmission using OFDM," Wireless and Optical Communications Networks, pp.1-5, 2009.
- [5] R.J. Baxley and G.T. Zhou, "Comparing Selected Mapping and Partial Transmit Sequence for PAR Reduction," IEEE Transactions on Broadcasting, Vol.53, pp.797-803, Dec. 2007
- [6] G. Huang, A. Nix, and S. Armour, "Decision feedback equalization in SC-FDMA", IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pp.1-5, Sept. 2008.
- [7] Armstrong, "Analysis of new and existing methods of reducing intercarrier interference due to carrier frequency offset in OFDM," IEEE Transactions on Communications, Vol.47, No. 3, pp.365-369, Mar.1999
- [8] J. Panta, K. J. Armstrong, "Effects of phase noise on performance of OFDM systems using an ICI cancellation scheme", IEEE Transactions on Broadcasting, Vol.49, No.2, pp.221-224, Jun. 2003.
- [9] Hsiao-Chun Wu, Xiaozhou Huang, "Joint phase/amplitude estimation and symbol detection for wireless ICI self-cancellation coded OFDM systems," IEEE Transactions on Broadcasting, Vol.50, pp.49-55, 2004.
- [10] H. G. Ryu, Y. Li, and J.S. Park, "An improved ICI reduction method in OFDM communication system", IEEE Transactions on Broadcasting, Vol.51, Issue 3, pp.395-400, Sep. 2005.
- [11] 이영선, 김남일, 김상우, 유홍균, "위상 잡음 보상 과 PAPR 저감을 고려한 DFT-Spread OFDM 통신 시스템 설계와 성능 평가," 한국전자과학회 논문지, 제 17권, 7호, pp.638-647, 7월, 2006년.

유 상 범 (Sang-Burm Ryu)

정회원



1996년 2월 한밭대학교 전자공학과(공학사)

1999년 3월~2001년 2월 충북대학교 전자공학과(공학석사)

2006년 3월~ 2010년 8월 충북대학교 전자공학과(공학박사)

19996년 3월~1999년 2월 영동공과대학 조교

2001년 3월~ 2006년 2월: 태영텔스타, 등 근무

2011년 1월 ~현재: 한국항공우주연구원 근무

<관심분야> OFDM 통신시스템, 디지털위성통신, 무선 LAN, 이동 통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리, 등

