

BPSK-OFDM 기반 LED 통신 시스템을 위한 워터마킹 데이터 전송 기법 연구

정회원 이승호*, 이정훈*, 종신회원 차재상*

A Study of Watermarking Data Transmission Scheme for BPSK-OFDM Based LED Communication System

Seung-ho Lee*, Jung-hoon Lee* *Regular Members*, Jae-sang Cha*^o *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 BPSK-OFDM 기반의 LED 통신 시스템에 워터마킹 기법을 적용하여, LED 통신 데이터의 전송과 동시에 부가 정보 데이터를 함께 전송하는 방법에 대해서 연구하였다. 워터마킹을 위해서 카사미(Kasami) 코드를 확산 코드로 사용하였으며, 확산된 부가 데이터는 BPSK-OFDM 광 신호에 영향을 주지 않는 작은 신호 레벨로 조절되어 BPSK-OFDM 광 신호에 더해져서 전송된다. 카사미 코드의 확산 코드로서의 성능은 무잡음 환경의 자기 상관, 잡음 환경 하의 자기 상관을 통하여 확인하였다. 또한 모의실험을 통하여 제안한 기법이 적용된 BPSK-OFDM 기반 LED 통신 시스템에서 부가 데이터의 신호 크기 레벨에 따른 BPSK-OFDM 통신 시스템의 BER(Bit error rate) 성능 및 워터마킹 신호의 레벨에 따른 부가 데이터의 DER(Detection Error Rate) 성능을 분석하였고, 이를 통하여 제안된 워터마킹 시스템이 부가 데이터 전송을 위한 기법으로 유용함을 확인하였다.

Key Words : BPSK, OFDM, LED, Watermarking, Kasami

ABSTRACT

In this paper, BPSK-OFDM-based LED communication systems are applied to watermarking techniques, were studied on how to transfer the additional information data with at the same time as the transfer of LED communication data. For watermarking kasami code was used as spreading codes, and spread additional data is controlled by small signal level to be BPSK-OFDM does not affect the optical signal. BPSK-OFDM is added to an optical signal is transmitted. The performance of the spreading code as a kasami code is autocorrelation of the noise-free environment, under the noise environment was confirmed by autocorrelation. BPSK-OFDM-based LED communication system has been applied proposed technique throughout the simulation in analyzed to BER of BPSK-OFDM DER performance and watermark signal level according to signal size level of data. That was availability confirmed for watermarking data transmit techniques data as being analysis detection performance of watermarking information using LED communication according to the code.

I. 서 론

최근 LED(Light Emitting Diode)를 이용한 무선 광 통신 시스템에 대한 연구들이 활발하게 진행되고

있으며^[1-2], 이로 인하여 초기의 IM-DD(Intensity Modulated-Direct Detection)를 사용하던 방식에서 벗어나서 진화된 통신 방식인 DS-SS(Direct Sequence-Spreading Spectrum), OFDM(Orthogonal Frequency

* 서울과학기술대학교 매체공학과(checkmemo@gmail.com, dwarfxx@gmail.com, chajaesang@seoultech.ac.kr), (° : 교신저자)
논문번호 : KICS2011-09-413, 접수일자 : 2011년 9월 27일, 최종논문접수일자 : 2011년 10월 21일

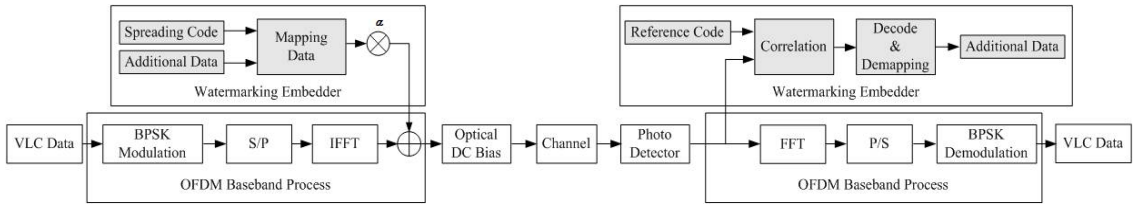


그림 1. BPSK-OFDM 기반 LED 시스템에 Watermarking이 적용된 전송 모델

Division Multiplexing)등을 사용하여 신뢰성있는 고속의 데이터를 전송하는 방식으로 진화하고 있다. 또한, 최근에는 기존의 고정된 위치에서 통신을 이용하는 방식에서 벗어나, 위치를 기반으로 한 추적(trace) 서비스나, 증강현실 등의 서비스가 많이 사용되고 있다. 이처럼 기존의 통신 데이터에 부가적인 데이터를 동시에 전송해야 하는 필요성이 대두되고 있으나, LED 통신에서 부가 데이터를 전송하는 방식에 대한 연구가 활발히 진행되지 못한 것이 현실이다.

이에 본 논문에서는 LED를 이용한 광 정보 신호에 부가 데이터를 실어서 동시에 전송하는 워터마킹 기법을 제안하고자 한다. 이것은 고속의 정보 전송을 할 수 있는 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 변조 기법을 적용한 OFDM 기반의 LED 통신 시스템에 카사미 코드를 이용하여 대역 확산한 부가 데이터를 전송하는 구조이다. 송신부인 LED에서는 기존의 광 OFDM 신호에 아주 작은 영향을 주는 값으로 스케일링 된 카사미 코드로 확산된 부가 정보를 더해 전송한다. 수신부에서는 참조 코드를 사용하여 상관 처리 후 판정 및 정보를 검출하는 과정을 거쳐 부가 정보를 복원한다. 워터마킹 기법은 기존의 시스템에 추가적인 자원을 사용하지 않고 최소한의 비용으로 부가 정보 전송 시스템 구축이 충분히 가능하다는 이점이 있으며, 기존의 자원 환경에서 효율을 극대화한 방식이다. 본 논문에서는 워터마킹을 이용한 부가 데이터 전송의 유용성을 입증하기 위하여 다음과 같이 논문 구성을 하였다. II장에서는 BPSK-OFDM 기반 LED 통신 시스템 모델에 대해 소개하고, III장에서는 워터마킹 코드를 이용한 부가데이터 전송 기법에 대해 설명한다. IV장에서는 모의시험 결과를 통하여 카사미 코드의 상관 특성, 부가 데이터 수신 성능, 기존 데이터 수신 성능을 분석하며, 마지막으로 V장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. LED 시스템에 사용되는 BPSK-OFDM 방식

본 논문에서 제안한 BPSK-OFDM 기반 LED 통신

시스템 송·수신 블록도는 그림 1과 같다. 송신단은 LED 데이터 비트를 BPSK에 의해 변조되고, 데이터 시퀀스는 S/P(Serial to Parallel) 변환으로 각 단의 변조에 N개의 병렬화된 심볼로 변환하여 IFFT를 수행한다. IFFT경우 광통신에서 사용되는 OFDM 신호는 실수 값만이 존재하며, 기본적으로 직교 변조를 하지는 않지만, BPSK는 0과 1의 값인 이진 값을 갖는 변조방식 이므로 기존 통신에 쓰이는 OFDM 방식을 적용할 수 있다^{3),4)}.

전송 프레임은 연속된 OFDM 심벌로 구성되어 전송되는 데이터 신호의 n번째 샘플링 시간에서의 수식은 식(1)과 같이 정의된다.

$$x_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{-j2\pi nk/N} \quad (1)$$

여기서 N은 전체 부반송파 수를 나타낸다. X_k 는 k번째 부반송파로 전송되는 주파수 영역 OFDM 심볼을 나타내며 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$X_k = \begin{cases} S_k, & k \in S_D \\ P_k, & k \in S_P, \quad S_D \cap S_P = \emptyset \end{cases} \quad (2)$$

S_D 와 S_P 는 각각 데이터 부반송파 인덱스와 파일럿 부반송파 인덱스의 집합을 나타내고, S_k 와 P_k 는 각각 데이터 심볼과 파일럿 심볼을 나타낸다.

LED를 사용하는 광 통신 시스템의 신호는 양의 값을 갖는 단극성이며, 기본적으로 양과 음의 값을 갖는 BPSK-OFDM 신호는 DC 바이어스(bias)를 통해서 양의 단극성 신호로 변환된다. OFDM에서 변조된 복소수 신호는 N개의 부 반송파로 S/P 변환되어 각 부 반송파는 X_n 으로 매핑 되고, 광의 특성상 IFFT 후에 허수부가 제거된 실수 신호만이 발생 된다. 허수부 신호 제거를 위해서, 부발생된 N개의 정보 심볼들은 복소 공액(complex conjugate)를 취하여 서로 대칭이 되도록 매핑하며, 그 과정은 식(3)과 같다.

$$X_{1N-n} = X_n^* \quad (3)$$

여기서 n 은 $n = 1, 2, \dots, N-1$ 을 뜻하며, X_0 는 $X_0 = X_n = 0$ 이다. 그리고 LED는 음수 값이 없으므로, DC 전류는 DAC(Digital to Analog Converter)를 통과 한 후 추가 된다.

$2N$ 의 IFFT를 취한 신호는 식(4)와 같고, $x_k(k = 1, 2, \dots, 2N-1)$ 는 실수 값만을 갖는 광 OFDM 신호이다.

$$x_k = \sum_{n=0}^{2N-1} X_n e^{j2\pi k(n/2N)}, n=0, 1, \dots, 2N-1 \quad (4)$$

III. 워터마킹 코드를 이용한 부가데이터 전송 기법

LED 시스템에서 부가 정보 전송을 위한 워터마킹 기법은 기존 시스템의 광신호 대역 처리 과정에서 대역확산을 통해 생성된 부가 신호를 기존의 LED 신호에 삽입 및 복원하는 과정을 통해 이루어진다. 기존 LED 신호에 삽입하는 과정에서 중요하게 고려해야 할 사항은 워터마킹 신호는 기존 광 신호의 성능에 영향을 주지 않는 범위의 값으로 설정 되어야 한다는 점이다. 그림 1은 워터마킹 기법을 이용하여 부가 정보 데이터 서비스를 하기 위한 QPSK-OFDM기반 LED 시스템의 블록도를 나타낸다.

송신단은 LED 신호를 BPSK 변조 과정을 거치게 되고, 다수의 반송파에 신호를 실어 보내는 OFDM을 적용하여 정보를 전송하게 된다. 이때, 부가정보를 확산코드에 의해 대역확산 시켜 기존의 LED 시스템에 영향을 주지 않는 범위를 값으로 스케일링한 후 변조된 OFDM 신호에 더하여 전송함으로써 기존의 시스템에 신호와 동시에 부가 정보 데이터를 갖는 워터마킹 신호가 전송된다. 워터마킹용 확산코드를 이용한 데이터 전송시스템에서 이진 위상변조를 적용할시⁵⁻⁷⁾, 확산코드 $y(n)$ 을 삽입하기 전·후의 i 번째 송신부에 해당하는 LED 광 신호를 각각 x_k, x'_k 로 정의하면 이때 확산코드 $y(n)$ 은 $M = 2^n - 1$ 또는 $M = 2^n$ 주기를 가지는 길이로 구성된다. 여기서 k 는 이산 신호이며 워터마킹 되어 삽입되는 과정은 식(5)와 같다.

$$x'_i(k) = x_i(k) + \rho_i \sum_{l=1}^m D_{i,l} \prod l(k) y_i(k) \quad (5)$$

여기서 D_i 는 i 번째 송신부에서 전송될 데이터이고, ρ 는 마지막 코드부분의 동일한 상관특성을 유지할 수 있게 하기 위한 부분이다.

송신부에서 생성되어 만들어진 신호에 AWGN(Additive White Gaussian Noise)이 채널환경을 통해서 식(6)처럼 LED신호에 영향을 주게 된다^{6, 7)}.

$$P_{ec} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) \left\{1 - \Phi^u\left(u + \sqrt{\frac{2mEb}{N_0}}\right)\right\}^{M-1} du, \quad (6)$$

$$\Phi^u(x) = 1/\sqrt{2\pi} \cdot \int_x^{\infty} \exp(-Z^2/2) dZ$$

여기서 m 은 정보 비트의 길이를 말하고, $M = 2^m$ 은 확산코드의 길이를 뜻한다. N 은 코드 길이, $\Phi^u(x)$ 는 정규분포의 누적 정규 함수이고, E_b/N_0 는 잡음 파워 스펙트럼 밀도 대비 비트당 신호 에너지 비를 나타낸다.

식(6)과 레일리 페이딩의 확률밀도함수 합친 잡음 에너지를 얻을 경우에는 레일리 페이딩 환경에 대역 확산의 코드 에러 율을 P_{ecf} 로 가정하여 식(7)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 γ 는 E_b/N_0 에 각 시간이고 $\gamma_0(=\gamma)$ 는 γ 의 평균 시간이다.

$$P_{ec} = \frac{1}{\gamma_0} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_0}\right) \times \left[1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) \left\{1 - \Phi^u(u - \sqrt{2\gamma})\right\}^{M-1} du\right] d\gamma \quad (7)$$

LED 신호가 i 번째 송출소자로부터 송출되어 식(4, 5)와 같은 채널 h_i 를 거친 후 수신기에 수신이 되면, 이때 수신 신호 r_i 는 식(8)과 같다.

$$r_i(k) = x'_k \otimes h_i + n_i(k) \quad (8)$$

여기서 $n_i(k)$ 는 i 번째 송신기에 대한 잡음이며, 전체 수신된 신호인 $r_i(k)$ 는 식(9)와 같다.

$$r(k) = \sum_{i=1}^T [x'_k \otimes h_i + n_i(k)] \quad (9)$$

수식에서 보이는 T 는 송신기의 전체 수를 뜻한다. 그리고 전송된 신호에 상관함수 도출을 통해 송

신부의 신호의 크기 등의 세부사항을 알 수 있다.

위의 과정에서 수신단을 보면 워터마킹 코드가 삽입된 LED 신호를 PD(Photo Diode)에 의해 전기적 신호를 받게 되며, OFDM 신호의 복조는 2N 포인트 FFT가 되고 송신 역과정을 통해 원래의 심볼 X_n 을 수신하는 과정을 수행하게 된다. 수신과정에서 워터마킹 신호의 복원하는 과정은 LED신호의 OFDM으로 복조 과정을 수행하기 전에 자기상관을 통해서 피크치를 도출한다. 도출된 피크치와 사전에 준비된 레퍼런스 코드와 매핑 하여 부가 정보 데이터를 복원하게 되는데, 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned}
 R_{rx_j}(v) &= \sum_{n=0}^{N-1} r(k)x_j(k-v) \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \sum_{i=1}^T x'_k(n) \otimes h_i + n_i(k) \right\} x_j(k-v) \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \sum_{i=1}^T [(x_k + pw_i(k)) \otimes h_i + n_i(k)] \right\} x_j(k-v) \quad (10) \\
 &= pR_{x_{px_j}} \otimes h_j + \sum_{i=1, i \neq j}^T pR_{x_{px_i}} \otimes h_i \\
 &\quad + \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=1}^T [x_k(n) \otimes h_i + n_i(k)] x_j(k-v)
 \end{aligned}$$

여기서 N은 확산코드의 한 주기이며, 수신기에 입력되는 확산코드와 참조용 확산코드가 상호간 동일한 코드일 경우, $R_{x_{px_j}}$ 는 자기 상관 값을 도출한다.

이러한 형태의 자기상관 값을 Kronecker delta 함수에 접근하게 되어 $pR_{x_{px_j}}$ 는 ph_j 에 가까워져 두 번째와 세 번째 요소들은 동일 송신기나 다른 송신기 신호로부터 송출된 잡음과 유사한 시퀀스가 된다. 그 후 j번째 송신기로부터 수신된 채널 응답인 h_j 는 R_{rx_j} 로 근사화 된다. 따라서 R_{rx_j} 는 식(11)과 같다.

$$R_{rx_j} = Ah_j + noise \quad (11)$$

여기서 A는 $R_{x_{px_j}}$ 와 이득 계수 p에 의해 결정되는 상수이고, j번째 송신기로부터 수신된 채널 응답 h_j 도 $R_{x_{px_j}}$, p와 같이 구할 수 있다.

수신부는 자신이 받고자 하는 정보를 송신부의 워터마킹용 확산코드와 동일한 확산코드를 참조신호로 사전에 준비하게 된다. 송신부에 송출 신호와 수신기의 참조신호간의 상관 함수 값인 R_{rx_j} 값을 도출하여 수신부의 상관기(correlator)의 상관 값을 통해 구해진 피크치를 이용해 다른 송신기 신호의 간섭 상관없이

수신 받길 원하는 워터마킹 신호만을 선택하게 되어 부가데이터 신호를 검출하게 된다.

$$P_{be} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (12)$$

확산 코드로 생성된 신호의 1개 비트는 0이나 1의 값을 가지는 BPSK 신호로 볼 수 있으므로 비트오류율(bit error rate, BER) P_{be} 는 식(12)를 사용하여 구할 수 있다.

IV. 모의실험 및 성능분석

4.1 카사미 확산 코드의 성능 분석

워터마킹 확산 코드로 사용되는 카사미 코드의 특성에 대한 모의실험을 수행하였다. 잡음이 없는 환경을 가정하여 자기 상관 (ACF : Auto Correlation Function)을 도출하였고, AWGN의 잡음이 있는 환경을 가정하고 자기 상관 특성 성능을 도출하였다. 그림 2는 잡음이 없는 경우로서 카사미 코드 길이가 255

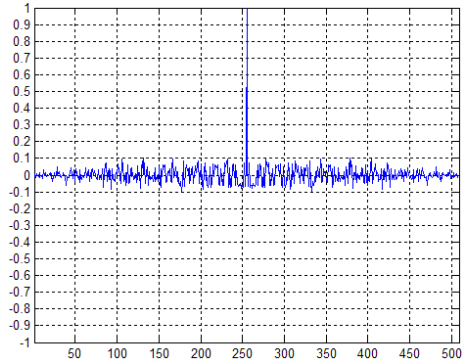


그림 2. 카사미 코드 255길이의 자기상관특성 분석

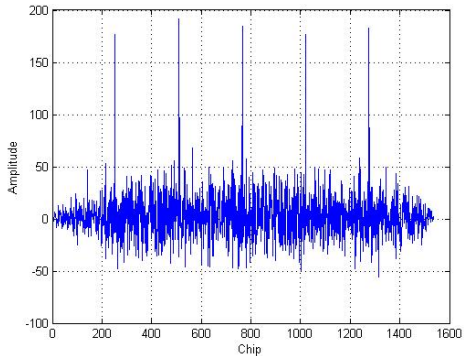


그림 3. 워터마킹 신호의 성능(코드 길이 : 255, 분석구간 : 심벌 1개)

칩인 경우의 ACF이며, 최대 값을 1로 일반화(normalization) 하였다

그림 3은 AWGN 잡음이 있는 경우에, 길이 255 칩 카사미 코드의 자기 상관 특성을 나타내며, 일정 크기의 AWGN 잡음이 있는 환경에도 자기 신호 검출 능력이 매우 뛰어난 특성을 보였다.

4.2 LED 신호에 대한 워터마킹 신호 레벨에 따른 성능 분석

4.1장의 모의실험을 통해 검증된 코드 성능을 바탕으로, LED 전송 신호에 워터 마킹 기법을 적용한 부가 정보 데이터를 전송하는 통신 시스템 모의실험 하였다. 확산 코드로서 카사미 코드를 사용하였으며^[8], 워터마킹 신호의 크기 변화에 따른 LED 신호의 BER 성능과 워터마킹 신호 크기 변화에 따른 부가 데이터 DER 성능 분석을 하였으며, 상세 파라미터는 표 1과 같다.

그림 4는 워터마킹 신호의 크기 변화에 따른 LED 신호 데이터의 BER 특성을 나타낸다. 워터마킹을 통한 부가 데이터 전송을 하지 않고 LED 신호만을 전송할 때, 10⁻³의 BER을 만족하는 신호대 잡음비는 7dB였다. 또한 카사미 코드 길이 16,383 칩에 긴 코드를 적용한 워터마킹을 통하여 부가 데이터를 전송할 때, -25dB 크기 이하의 부가 데이터를 전송하면, 10⁻³ BER 만족하는 크기가 7dB로서 부가 데이터가 없을 때와 동일한 성능을 보였다. 워터 마킹 신호가 -25dB 이상인 -20dB는 7.2dB, -15dB는 9.2dB가 나오게 되어 원신호의 BER에 영향을 미치게 됨을 확인하였다. 그리고 -10dB 이상부터는 성능이 많이 열화되어 10⁻³을 수렴하지 못함을 확인 하였다. 따라서 원 데이터의 신뢰성을 고려하면, 워터마킹용 확산코드의 신호대 잡음비는 -25dB 이하로 유지되어야 한다.

위 모의실험 결과를 토대로 LED 신호에 평균전력의 -27dB 및 -28dB, -29dB, -30dB에 각각 해당하는 워터마킹을 시킬 경우, 신호대 잡음비에 따른 DER를 도출하고 그림 5에 나타내었다.

표 1. BER 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Values
FFT size	64
Cyclic prefix(CP) ratio	1/4
Number of data subcarriers	128
Modulation	BPSK-OFDM
Symbol rate	100

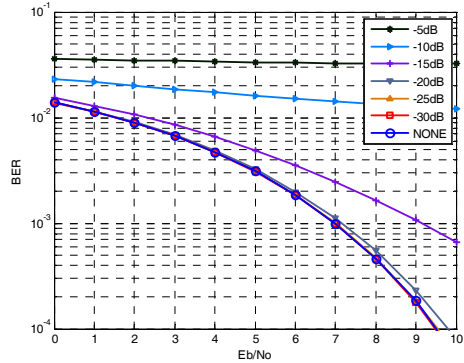


그림 4. BPSK-OFDM 기반 LED 통신 시스템에 Watermarking 이 적용된 전송 모델

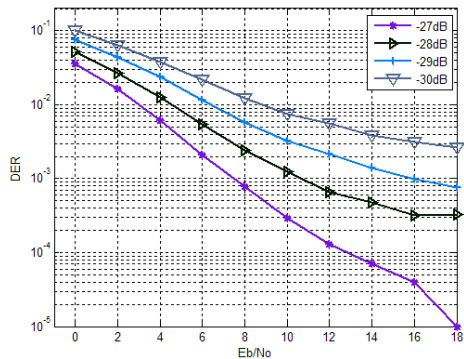


그림 5. BPSK-OFDM 기반 LED 통신 시스템에서 Watermarking 레벨에 따른 DER 성능분석

실험 조건으로 카사미 칩 길이를 BER 실험과 동일한 16383 칩을 사용 하였고, LED 송신기 3대에 AWGN을 사용하고, Eb/No는 0dB부터 18dB 까지의 2dB 간격으로 DER을 도출하였다.

모의실험 결과 10-3 지점을 기준으로 LED 평균전력의 -27dB 일 경우 7dB 지점, -28dB일 경우 10.5dB 지점, -29dB는 16dB 지점, -30dB는 오류 흐름(error flow)의 결과를 확인 하였다. 이에 송신부의 수가 3개인 지역에서 -27dB에 해당하는 워터마킹 코드를 사용할 경우 OFDM 기반 LED 시스템 통신으로 부가데이터 전송이 가능하다.

위의 4.2의 결과를 통해 카사미 코드를 확산코드로 사용하여 BPSK-OFDM 기반의 LED 통신 시스템에 워터마킹 기법으로 사용하여 부가 데이터를 동시에 전송할 수 있음을 입증하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 BPSK-OFDM 기반의 LED 통신 시스템에 워터마킹 기법을 적용하여, LED 통신 데이터의 전송과 동시에 부가 정보 데이터를 함께 전

송하는 방법에 대해서 연구하였다. 이를 위하여 워터마킹을 위해서 사용되는 카사미 코드의 확산 코드로서의 성능을 무잡음 환경의 자기 상관, AWGN 잡음 환경의 자기 상관을 통하여 확인하였다. 확산된 부가 데이터가 BPSK-OFDM 광 신호에 더해져서 전송될 때의 LED 신호 BER 특성, 부가 데이터의 DER 특성을 모의실험 하였으며, 이를 통하여 제안된 워터마킹 시스템이 부가 데이터를 전송을 위한 기법으로 유용함을 입증하였다. 이 논문은 실내 환경에서의 BPSK-OFDM 통신 방식에 부가 데이터를 동시에 전송하는 방식에 좋은 참고 자료가 될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] 한국정보통신기술협회, "ICT중점기술 표준화 전략맵 Ver.2011-가시광통신 종합", 2011년 1월.
- [2] Jean Armstrong, "OFDM for Optical Communications", *IEEE, Journal of Lightwave Technology*, Vol. 27, No. 3, February 1, 2009.
- [3] D. Marinos, C. Aidinis, N. Schmitt, J. Klaue, J. Schalk, T. Pistner, P. Kouros, "Wireless optical OFDM implementation for aircraft cabin communication links", *ISWPC*, 2010.
- [4] European Standard, "Radio broadcasting systems; digital audio broadcasting (DAB) to Mobile, portable and fixed receivers," *ETSI EN 300 401 V1.4.1*, June 2006.
- [5] X. Wang, Y. Wu and J.Y. Chouinard, "Robust Data Transmission Using the Transmitter Identification Sequences in ATSC DTV Signals", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol.51, No.1, pp.41-47, Feb. 2005.
- [6] Katsuyuki I, Masanori H, Shinichi T (2002) Performance of M-ary/SSMA using soft decision Viterbi decoding. *Electron Commun Jpn* 85(6)
- [7] Li C (1996) Performance analysis of M-ary spread spectrum data transmission system based on phase modulating a PN sequence. *IEEE Int Conf Commun Technol '96 (ICCT '96)* 1:607 - 610
- [8] A.M.D. Turkmani, U.S. Goni, "Performance Evaluation of Maximal-length, Gold and Kasami Codes as Spreading Sequences in CDMA Systems", *ICUPC93, IEEE*, 1993.

이 승 호 (Seung-ho Lee)

정회원



2011년 3월 을지대학교 의료전산학과 졸업
2011년~현재 서울과학기술대학교 석사과정
<관심분야> 디지털통신, 무선통신, LED통신, DMB 및 디지털 방송

이 정 훈 (Jung-hoon Lee)

정회원



1999년 2월 성균관대학교 전자 및 컴퓨터공학과 졸업
2001년 2월 성균관대학교 전자 및 컴퓨터공학과 석사
2007년~현재 서울과학기술대학교 IT 정책대학원 박사과정
<관심분야> 디지털통신, 무선통신, LED통신

차 재 상 (Jae-sang Cha)

중신회원



2000년 일본 東北(Tohoku)대학교 전자공학과(공학박사)
2002년~2002년 한국전자통신연구원(ETRI) 무선방송 기술연구소 선임연구원
2002년~2005년 서경대학교 정보통신공학과 전임강사

2008년 미국 Florida University, Visiting Professor
2005년~현재 서울과학기술대학교 매체공학과 교수
<관심분야> LED-ID, 조명IT융합신기술, LBS, ITS, UWB, 무선홈네트워크, DMB 및 디지털 방송 등