

압축센싱기법을 이용한 가시광 무선링크 전송용량 증가기술 연구

정의석^{1,2}, 이용태¹, 한상국^{2*}

¹한국 전자통신 연구원 모바일 미디어융합 연구실, ²연세대학교 전기전자공학부

Improvement in the Channel Capacity in Visible Light Emitting Diodes using Compressive Sensing

Eui-Suk Jung^{1,2}, Yong-Tae Lee¹, Sang-Kook Han^{2*}

¹Electronics and Telecommunications Research Institute

²Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei Univeristy

요약 본 논문에서, 가시광 발광 다이오드를 데이터 전송용 광원으로 사용하는 광무선 전송 시스템의 채널 용량을 증가시키는 새로운 기법을 제안하였다. 압축센싱을 기반으로 하는 적응형 샘플링 기법과 L1최소화 기법을 이용하여 직교 주파수 분할 다중방식기반 직교 위상천이 변조 (OFDM-QPSK: orthogonal frequency division multiplexed-quadrature phase shift keying) 데이터를 압축무선 전송후, 수신단에서 복원하였다. 제안된 기법을 실험적으로 검증하기 위해서 소규모 링크를 이용하여 전송실험한 결과, OFDM-QPSK 데이터 전송률이 30.72Mb/s에서 51.2Mb/s로 증가함을 확인하였다. 이때의 오류벡터크기(EVM: error vector magnitude)값은 31%이었고, 에러정정 코드를 적용할 경우, 완벽하게 복원 가능함을 확인하였다.

Abstract A new technique, which can increase the channel bandwidth in an optical wireless orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) link based on a light emitting diode (LED), is proposed. The technique uses adaptive sampling to convert an OFDM signal to a sparse waveform. In compressive sensing (CS), a sparse signal that is sampled below the Nyquist/Shannon limit can be reconstructed successively with sufficient measurements. The data rate of the proposed CS-based visible light communication (VLC)-OFDM link increases from 30.72 Mb/s to 51.2 Mb/s showing an error vector magnitude (EVM) of 31 % at the quadrature phase shift keying (QPSK) symbol.

Key Words : Adaptive sampling, Compressive sensing, L1-minimization, Orthogonal frequency division multiplexing, Visible light communication

1. 서론

조명용 가시광 발광 다이오드(LED: light emitting diode)의 빛을 이용한 광무선 전송기술인, 가시광 통신은 실내 위치인식 서비스, 대용량 멀티미디어 무선 서비스, 그리고 자동차간 통신서비스 등과 같은 다양한 무선 서비스 구현을 위해 제안되어 왔다[1]. 그러나, 상업적으로 판매가 되고있는, 조명용 LED의 주파수 응답이 노란색 인광물질(phosphor)로 인해, 10MHz 이하로 제한되는 현상을 보이기 때문에, 100Mb/s 이상의 고속 무선 데이터

통신서비스 구현에 어려움을 보여온 것이 사실이다. 이러한 기술적 문제점을 극복하기 위해서, 다양한 기법들이 제안되어 왔다.

파란색 필터를 이용하여 노란색 발광 스펙트럼을 제거하는 방법을 통해 LED의 주파수 응답을 3MHz에서 20MHz로 증가시킨 방법이 발표되었다[2]. 이러한 방법은 간단한 구조를 형성할 수 있지만, 필터 삽입으로 인한 빛의 감소가 발생하게 된다. 이것은 무선 전송거리의 제한을 가져오게 됨을 의미한다. 전기적 등화기를 사용하는 기법은 가시광 전송링크의 채널 대역폭을 향상시키는

*Corresponding Author : Sang-Kook Han(Yonsei Univ.)

Tel: +82-2-2123-4016 email: skhan@yonsei.ac.kr

Received June 11, 2014

Revised July 10, 2014

Accepted October 10, 2014

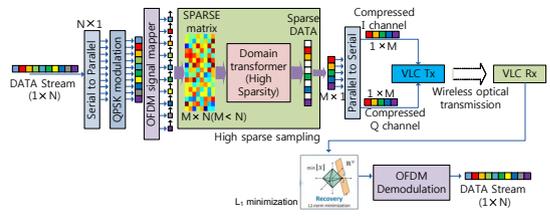
효율적인 방법이 될 수 있다[3,4]. 그러나, 발광 다이오드마다 각기 조금씩 다른 주파수 응답특성을 가지고 있기 때문에, 이를 고려한, 전기적 회로를 부착한 등화기를 개별적으로 설계해야만 한다. R/G/B(red/green/blue) LED 및 이산 다중화(discrete multi-tone) 기법을 이용하여 1.25Gb/s 무선전송속도를 보여준 방법은 전송거리가 10cm로 너무 짧고, R/G/B LED는 조명용으로 사용하기엔 경제적 부담이 따르는 단점이 존재한다[5,6].

본 논문에서는 압축 센싱이론을 기반으로 하는 데이터 압축 및 복원 기법을 제안한다. 제안된 방법을 이용하여, 직교 주파수 분할 다중방식(OFDM: orthogonal frequency division multiplexing)기반 직교 위상 천이변조(QPSK: quadrature phase shift keying) 신호를 전송하는 가시광 전송링크의 채널 대역폭을 증가시키게 된다. 압축 센싱이론은 전송하고자 하는 신호특성이 sparse(0이 아닌 신호성분이 전체 신호성분들 중에 매우 적은 특성)한 경우, 나이퀴스트(Nyquist) 샘플링 이하로 샘플링 되더라도, 원래 신호대비 완벽한 복원이 가능함을 다양한 논문들에서 보고하고 있다[7]. 본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 제안된 기법의 이해를 돕고자, 압축 센싱 이론을 간략하게 정리하고, 제안된, 역 이산 코사인 변환(IDCT: inverse discrete cosine transform)기반 적응형 샘플링 기법과 L1 최소화 기법을 설명한다. 3장에서는 제안된 기법을 실험적으로 검증하기 위해 구현된 가시광 전송링크 소규모 테스트베드를 설명하고 4장에서는 측정된 실험결과를 통해 제안된 기법을 검증한다. 5장에서는 결론으로 맺음한다.

2. 본론

Fig. 1은 제안된 기법을 사용하여 OFDM-QPSK 신호를 압축한후, 가시광 LED를 이용하여 광무선 전송후에 수신단에서 복원하는 과정을 보여주고 있다. 가입자가 송신하고자 하는 데이터를 QPSK 방식과 같은 멀티레벨 변조방식을 이용하여 심볼로 변환한다. 변환된 심볼 신호는 각각의 OFDM 서브캐리어에 할당된다. 발생한 OFDM 신호는 적응형 샘플링에 기반을 둔 sparse matrix에 의해 다시 샘플링 된다. IDCT와 같은 도메인 변환 기법에 의해 sparse한 특성을 갖는 신호로 변환된다. 가시광 무선 송신기(VLC-Tx)에 위치한 가시광 LED

의 빛은 sparse 특성을 갖는 신호에 의해 직접변조된다. 변조된 빛은 광무선 전송후, 가시광 무선 수신기(VLC-Rx)에서 검출된 sparse한 특성을 갖는 신호는 L1 최소화 방법에 의해 복원된다. 복원된 OFDM 신호는 OFDM 복조과정을 거치면서 가입자가 송신한 데이터를 수신하게 된다. Fig. 1에서 보여지는 것처럼, 적응형 샘플링과 L1최소화 방법은 압축센싱 이론과 더불어 2장에서 서술한다.



[Fig. 1] Compressed optical OFDM signal transmission and reconstruction for optical access link using adaptive sampling with IDCT and L1-minimization

2.1 압축 센싱이론

일반적인 아날로그 신호는 Nyquist 샘플링 기법에 근거하여 샘플링 및 전송과정을 거친후, 완전한 복원이 이루어지게 된다. 따라서 임의의 신호가 점유하는 채널 대역폭은 원래 신호의 최고 주파수 대비 최소 2배 이상 필요하게 된다. 압축 센싱 기법은 Nyquist 샘플링 기법을 탈피하여 2배 이하로 샘플링을 하더라도 완벽한 복원이 가능하다는 점을 강조하고 있다. 대부분의 멀티미디어 신호는 특정 도메인으로 변환시 0 또는 0에 가까운 값들을 50% 이상 가진다는 점이다. 멀티미디어 데이터에서 0이 차지하는 정도를 sparse하다고 말하며 sparsity가 높을수록 낮은 샘플링에서도 멀티미디어 신호의 이미지 복원율이 높아진다. 압축 센싱은 식 (1)과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$Y = \Phi(\Psi X) \tag{1}$$

여기에서, Y 는 $M \times 1$ 압축된 샘플 벡터이고, Φ 는 $M \times N$ 랜덤 측정용 행렬이다. X 는 $N \times 1$ 원래 신호의 샘플벡터이다. Ψ 는 임의의 멀티미디어 신호가 sparse한 특성을 갖는 도메인으로 변환을 위한 변환용 행렬이다. 변환용 행렬은 discrete wavelet transform 또는 discrete cosine transform 등을 예로 들 수 있다. L1 최소화 기법은 압축 센싱 기법으로 처리된 신호를 수신후 복원하기

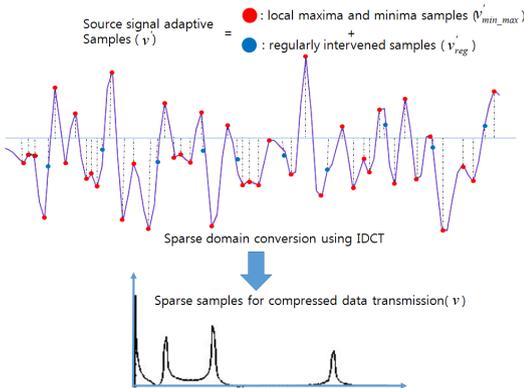
위해 사용되어진다. 이 방법은 선형적인 해를 찾는 방법이나, orthogonal matching pursuit 기법 등을 사용하여 구현된다[8]. 또한 압축 센싱 기법을 통해 신호처리할 하는 경우에, 랜덤한 측정용 행렬을 발생시켜야 하는데 restricted isometry property (RIP) 조건을 만족하도록 설계해야한다. 행렬 사이즈 M 은 식 (2)를 만족해야한다 [9].

$$M \geq K \times \log(N/K) \quad (2)$$

여기에서 K 는 샘플링하고자 하는 데이터 개수를 의미한다.

2.2 역 이산 코사인 변환기반 적응형 샘플링 기법

적응형 샘플링 기법은 OFDM 신호의 sparsity를 높이고, 채널 용량을 증대시키기 위해 제안되었다. Fig. 2에서 보여지는 것처럼, 첫 번째로, 각각의 샘플은 일정한 간격으로 원래의 OFDM-QPSK신호 샘플에서 추출된다. 이렇게 하는 이유는 신호 전체 영역(ν'_{reg})중에서 특정 부분에서만 샘플링 되는 현상을 방지하기 위해서이다. 다음으로, 원래의 OFDM-QPSK신호 샘플은 아날로그적인 특성을 충분히 반영하기 위해서, 국부적 최소 및 최대값(ν'_{min_max})을 추출한다. 등간격으로 추출된 값들과 국부적 최소 및 최대값들로 구성된 샘플(ν')들은 IDCT기법을 이용하여 sparse 영역으로 변환된다.



[Fig. 2] Process of sparse signal generation using adaptive sampling and IDCT

2.3 L1 최소화 기법을 이용한 신호 복원

Fig. 3은 광무선 전송과정에서 발생한 잡음이 포함된

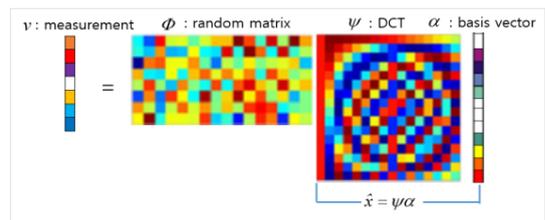
측정값에서 원래의 OFDM-QPSK신호를 복원하는 과정을 보여주고 있다. 그것은 L1 최소화 과정에 기반을 두고 있다. 주어진 측정값으로 가시광 광무선 수신기에서 복원해야만 하는 \hat{x} 는 식(3)에 의해 원래의 신호파형을 반복적으로 복원하기 위해 설계되어진다.

$$\hat{x} = \Psi\alpha + \epsilon \quad (3)$$

여기에서 α 는 sparse한 형태의 벡터이고, $\Psi \in R^{m \times n}$, 그리고, ϵ 은 원래의 신호크기에 비해 상대적으로 작은 측정오류 값이다. Ψ 는 수신된 측정값에서 반복적으로 구해진다. 우리는 식(4)에서 보여지는 것처럼, sparse 행렬과 projection 행렬을 갱신해가면서 역으로 원래의 신호값들을 복원하려고 한다.

$$\min_{\Psi, \alpha} \|\alpha\|_1 \text{ subject to } \|\Phi x - \Phi \Psi \alpha\|_2 \leq \epsilon \quad (4)$$

반복적으로 위의 과정을 반복 적용한다. 그후에, 원래의 신호 파형값들이 주어진 측정값에서 복원된다. 제안된 기법에서, 원래의 OFDM-QPSK신호에서 측정된 샘플은 몇 개의 크기 값을 갖는 선형적 조합 함수로 표현이 될 수 있다. 식(4)를 반복적으로 계산하면서, 원래의 신호에 해당하는 행렬은 랜덤 함수를 사용하여 복원될 수 있고, 잡음효과는 복원과정중에 감소되어진다. 복원된 신호 파형의 모양은 식(4)에서 보여지는 것처럼, 복원과정을 반복적으로 적용함으로써, 최적화 및 에러가 최소화되는 방향으로 개선되어질수 있다.



[Fig. 3] L1-minimization-based original signal reconstruction procedure

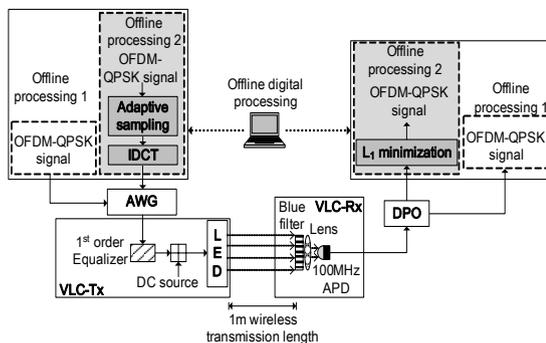
3. 실험결과 및 분석

3.1 압축 센싱에 기반한 광무선 링크 전송실험을 위한 실험 setup

Fig. 4는 제안된 기법을 실험적으로 검증하기 위해 구

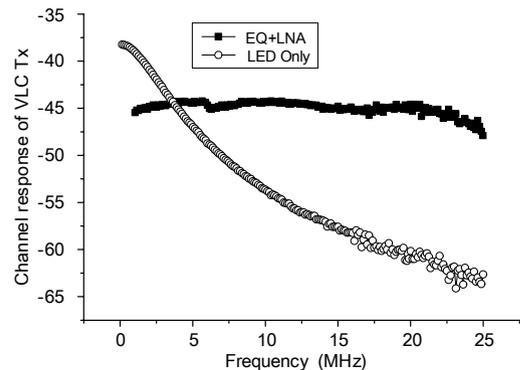
현된 실험 setup을 보여주고 있다. 이것은 압축된 OFDM-QPSK신호 파형을 가시광 LED 빛을 무선으로 전송하고 복원하기위해서 구현되었다. 제안된 기법을 평가하기 위해서, 압축된 OFDM-QPSK 신호파형과 원래의 파형간 전송능을 반복적으로 측정하여 그 차이를 분석하였다. 원래의 OFDM-QPSK신호는 오프라인 작업 1(offline processing 1)을 통해서 생성 및 복원과정이 이루어졌고, 압축된 파형은 오프라인 작업2(offline processing 2)를 통해서 생성 및 복원과정이 수행되었다. QPSK 심볼로 맵핑된 OFDM 신호가 매트랩을 이용하여 생성되었다. 고속 푸리에 변환(FFT: fast fourier transform) 크기는 2048이고, Training 시퀀스 프레임은 1000개의 OFDM심볼마다 삽입되었다. cyclic prefix 크기는 1200개의 OFDM 서브캐리어에 대해서 224로 설정하였다. 오프라인 디지털 변환작업을 사용하여 OFDM-QPSK신호 파형을 생성한후, 31.25 Msample/s로 샘플링 되는 임의 파형발생기(AWG: Tektronix 7122C)에 의해 아날로그 파형으로 변환되었다. 변환된 아날로그 OFDM-QPSK신호의 RF스펙트럼은 DC에서 15.56MHz까지 분포하였다. AWG에 OFDM-QPSK신호 파형을 저장하기전에, 해당 신호파형은 In-phase (I)채널과 quadrature-phase (Q)채널로 분리되었다. Q채널의 모든 데이터는 허수를 실수로 변환하는 함수를 사용하여, 실수 값으로 변환되었다.

두 번째 오프라인 작업에서는 OFDM-QPSK신호파형은 2.2절에서 기술된 적응형 샘플링기법에 의해 재샘플링 된후에, 압축 센싱기법에 기반한 IDCT를 이용하여 sparse한 신호파형으로 변환 및 압축되었다.



[Fig. 4] Experimental setup for reconstruction of the compressed OFDM/QPSK signal in an optical wireless link based on a white LED

AWG에서 원래의 OFDM-QPSK신호 파형과 압축된 파형은 1차 전기적 등화기(equalizer)를 사용하여 등화되었다. 이러한 작업을 수행한 이유는 가시광 LED소자가 OFDM-QPSK신호 파형을 변조하기위한 충분한 대역폭을 얻도록 하기 위해서였다. Fig. 5는 1차 전기적 등화기를 적용하기 전후, 가시광 LED 소자 모듈의 주파수 응답을 보여주고 있다. 검은색 사각형으로 구성된 선은 전기적 등화기를 적용한 후의 주파수 응답을 보여주고 있고, 원형으로 구성된 선은 전기적 등화기를 적용하기 전의 주파수 응답을 보여주고 있다. Fig. 5에서 보여지는 것처럼, 1차 전기적 등화기를 적용한후, 가시광 LED소자 모듈의 주파수 응답이 25MHz까지 개선되었음을 알 수 있다. 이것은 가시광 LED 소자모듈이 1차 전기적 등화기를 이용하여 31.25Msample/s로 샘플링된 OFDM-QPSK신호에 의해 충분히 변조가 가능함을 말해준다.



[Fig. 5] Channel response of VLC-Tx, filled square line: 1st order equalizer with LNA, open circle line: only white LED

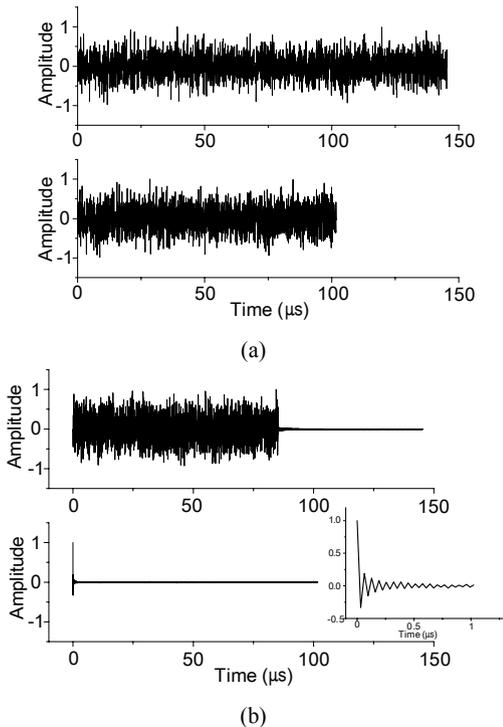
전기적 등화기를 이용하여 가시광 LED소자 모듈이 등화된후에, 2가지 종류(압축 전후)의 OFDM-QPSK신호 파형들은 각각, 바이어스 티를 이용하여 직류전원과 합쳐진후, 가시광 LED 빛이 변조되었다. 변조된 빛은 가시광 광무선 수신기(VLC-Rx)까지 공기를 통해 무선으로 전송되었다. 가시광 광무선 송신기와와의 위치는 1m간격으로 배치되었다. VLC-Rx는 광학 대역필터(FWHM: 50 nm)가 사용되었고, 이것은 가시광 LED소자의 노란색형광 스펙트럼을 제거하기 위해 사용되었다. 또한, 광학 렌즈(축집거리: 60mm) 및 APD(avalanche photo-diode) 모듈로 구성되었다. APD 모듈은 100MHz의 주파수 응답을 갖는 TIA(transimpedance amplifier)가 적용되었다.

VLC-Rx에서 수신된 OFDM-QPSK모듈은 실시간 오실로스코프(DPO: Tektronix 7200B)에 의해 측정된후, I채널과 Q채널을 동기화를 통해 수신되었다. 다음으로, 압축된 파형은 2.3절에서 기술한 L1 최소화 기법을 이용하여 복원되어진후, 동기화 과정을 통해서 QPSK심볼이 수신되었다.

3.2 실험결과 및 분석

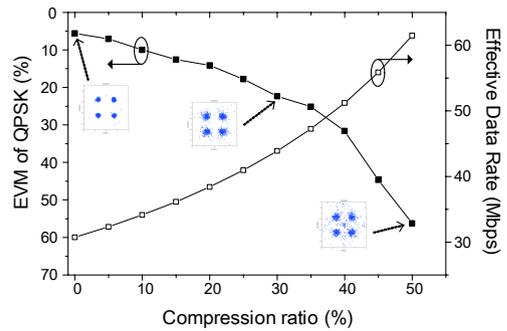
Fig. 6은 원래의 OFDM-QPSK신호파형이 제안된 기법을 사용하여 압축된 sparse 파형으로 변화되어진 결과를 보여주고 있다. Fig. 6(a)는 압축률 30%에서 적응형 샘플링을 적용하기 전후 파형을 보여주고 있다. 압축률 (compression ratio)은 식 (5)에서 보여지는 것처럼 정의되었다.

$$Compression\ ratio(\%) = \left(1 - \frac{length\ of\ compressed\ data}{length\ of\ original\ data}\right) \times 100 \quad (5)$$



[Fig. 6] Sparse waveform generation using adaptive sampling and IDCT, (a) upper waveform: original OFDM/QPSK signal, lower waveform: adaptive sampled OFDM/QPSK signal, (b) upper waveform: result of OFDM/QPSK signal transformed by IDCT, lower waveform: result of adaptive sampled one transformed by IDCT

Fig. 6(b)는 IDCT 적용후에 변환된 파형을 보여주고 있다. Fig. 6(b)의 위의 파형은 IDCT적용후, 변환된 원래의 OFDM-QPSK신호 파형을 보여주고 있다. 아래의 파형은 IDCT와 적응형 샘플링에 의해 샘플링된 파형을 보여주고 있다. Fig. 6(b)의 삽입그림은 1μs내에서 확대한 파형을 보여주고 있다. Fig. 6(b)에서 보여지는 것처럼, 적응형 샘플링기법에 의해 샘플링된 OFDM-QPSK신호는 IDCT를 이용하여 sparse 파형으로 변환되어졌음을 알 수 있다. IDCT 적용후에, 압축된 OFDM-QPSK신호는 VLC-Rx로 무선으로 전송된후, L1최소화 기법을 이용하여 복원되었다.



[Fig. 7] Sparse waveform generation using adaptive sampling and IDCT, (a) upper waveform: original OFDM/QPSK signal, lower waveform: adaptive sampled OFDM/QPSK signal, (b) upper waveform: result of OFDM/QPSK signal transformed by IDCT, lower waveform: result of adaptive sampled one transformed by IDCT

Fig. 7은 압축률에 따른 유효 데이터 전송률 및 EVM(error vector magnitude)을 보여주고 있다. QPSK 심볼들에 대한 각각의 정상도(constellation)는 3개의 압축률(0%, 30%, 50%)에서 측정되었다. 유효 데이터 전송률은 압축후에 증가된 데이터 전송률을 의미한다. 검은 색으로 채워진 사각형들로 구성된 선은 QPSK심볼의 EVM에 해당하고, 검은색 빈칸인 사각형들로 구성된 선은 유효 데이터 전송률을 의미한다. 참고로, 에러정정 기법(FEC: forward error correction)에 의해 복원가능한 최소 QPSK심볼의 EVM은 32%이다. Fig. 7에서 보여지는 것처럼, 32% EVM에서, 원래의 OFDM-QPSK신호 파형이 40%까지 압축가능함을 말해주고 있다. 다시말하면, QPSK심볼 데이터 전송률이 30.72Mb/s에서

51.2Mb/s까지 증가함을 보여주고 있다. 부가적으로, 압축률이 증가함에 따라서 EVM값이 증가함을 보여주고 있다. 이것은 압축된 OFDM-QPSK 신호샘플의 sparsity 및 개수가 L1최소화 기법을 이용하여 완벽하게 복원하기에는 부족하기 때문이다.

4. 결론

가시광 LED기반 광무선 전송 시스템의 전송용량을 증가시키는 기법이 제안되었다. 이것은 IDCT를 이용한 적응형 샘플링 기법을 이용하여 해당신호를 재샘플링 및 압축한후, L1 최소화 기법을 이용하여 복원하는 내용을 담고 있다. 해당 기법의 실험적 검증결과, QPSK 심볼의 경우, 압축률 40%에서 에러없이 무선으로 전송이 가능함을 관찰하였다. 이것은 QPSK심볼 데이터 용량을 제안된 기법을 이용하여 1.7배 더 전송용량을 증가하여 전송이 가능함을 말해준다. 본 논문에서 제안된 기법은 물리적 대역폭이 부족한 가시광 LED의 한계를 극복하는데 도움을 줄 수 있을것으로 예상된다.

References

[1] A. Jovicic, J. Li, and T. Richardson, "Visible light communication: opportunities, challenges and the path to market," IEEE Commun. Mag., 51, pp. 26-32 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2013.6685754>

[2] J. Gruber, S. C. J. Lee, K.-D. Langer, T. Koonen, and J. W. Walewski, "Wireless high-speed data transmission with phosphorescent white-light LEDs," in Proceedings of 33th European Conference and Exhibition on Optical Communication, pp. 1-2, 2007.

[3] H. L. Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, and Y. Oh, "High-speed visible light communications using multiple resonant equalization," IEEE Photon. Technol. Lett. vol. 20, no. 14, pp. 1243-1245, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2008.926030>

[4] H. L. Minh, D. O'Brien, G. Faulkner, L. Zeng, K. Lee, D. Jung, Y. Oh, and E. T. Won, "100-Mb/s NRZ visible light communications using a postequalized white LED," IEEE Photon. Technol. Lett. vol. 21, no. 15, pp. 1063-1065, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LPT.2009.2022413>

[5] C. Kottke, J. Hilt, K. Habel, J. Vucic, and K.-D. Langer,

"1.25 Gbit/s visible light WDM link based on DMT modulation of a single RGB LED luminary," in Proceedings of 38th European Conference and Exhibition on Optical Communication, paper We.3.B.4., 2002.

[6] J. Vucic, C. Kottke, S. Nerreter, K.-D. Langer, and J. W. Walewski, "513 Mbit/s visible light communications link based on DMT-modulation of a white LED," J. Lightw. Technol. vol. 28, no. 24, pp. 3512-3518, 2010.

[7] D.L. Donoho, "Compressed Sensing," IEEE Trans. on Information Theory vol. 52, pp. 1289-1306, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIT.2006.871582>

[8] D. L. Donoho and M. Elad, "Optimally sparse representation in general (nonorthogonal) dictionaries via l_1 minimization," Proc. Nat. Acad. Sci., vol. 100, pp. 2197-2202, 2003.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0437847100>

[9] E. Candès and T. Tao, "Decoding by linear programming," IEEE Trans. Info. Theory, vol. 51, pp. 4203-4215, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIT.2005.858979>

정의석(Eui-Suk Jung)

[정회원]



- 1992년 2월 : 한국항공대학교 항공 전자공학 (공학사)
- 1994년 2월 : 한국항공대학교 전자공학 (공학석사)
- 2005년 8월 : 연세대학교 전기전자공학과 (박사수료)
- 1994년 9월 ~ 현재 : ETRI

<관심분야>

디지털 통신 신호처리, 유무선 방송 액세스 네트워크

이용태(Yong-Tae Lee)

[정회원]



- 1993년 2월 : 한국항공대학교 항공 전자공학 (공학사)
- 1995년 2월 : 한국항공대학교 전자공학 (공학석사)
- 2007년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
- 1995년 4월 ~ 현재 : ETRI

<관심분야>

디지털 방송 신호처리, RF 신호처리, 디지털 통신시스템

한 상 국(Sang-Kook Han)

[정회원]



- 1986년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)
- 1988년 2월 : University of Florida (공학석사)
- 1994년 2월 : University of Florida (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 연세대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

광소자, 광통신, 광액세스 네트워크