가시광 통신 시스템을 위한 에너지 센싱 기법을 이용한 신호 검출 확률의 성능

준회원 박 인 환*, 정회원 김 윤 현*, 종신회원 김 진 영*°

Performance of Detection Probability based on Energy Sensing Schemes for VLC Systems

In Hwan Park* *Associate Member,* Yoon Hyun Kim* *Regular Member,*
Jin Young Kim*° *Lifelong Member*

요 약

가시광통신 융합기술은 통신 및 조명 환경 변화에 부응한 기술로서, LED 조명의 역할과 동시에 통신을 할 수 있다. 하지만 이제 막 탄생한 기술인만큼 해결하여야 할 과제가 많은데 사용자와 수신기사이의 효율적인 검출이 그 중 하나이다. 따라서 본 논문은 사용자와 가시광통신 송신기 사이의 효과적인 신호 검출을 위한 센싱 방법을 제안하고 이에 따른 분석 및 모의실험 결과를 나타낸다. 가시광통신 사용자의 신호는 OFDM 기반의 시스템을 가정하였으며 사용자와 가시광통신 송신기 사이의 무선 채널은 실내 가시광통신 채널로 모델링 하였다. 에너지 검출법을 위한 임계값은 각 채널의 SNR (signal to noise ratio)에 따라 다르게 적용되었으며, 각 채널의 잡음신호의 평균값으로 가정하였다. 모의실험 결과를 통해 본 논문에서 제안한 기법이 가시광통신시스템에서의 신호 센싱에 있어서 효과적인 것을 확인할 수 있다.

Key Words : Visible light communication (VLC), LED, energy detection, auto-correlation, OFDM

ABSTRACT

The visible light convergence communication technology is suitable for indoor wireless communication and digital lighting fixtures, it could be used as lighting devices as well as a communication device. However, because that VLC is the technology of came to world a few years ago, there are many problems which had to solve. The signal sensing of VLC transmitter is one of the most challenging issue in VLC systems. Therefore in this paper, we analysis the performance of various sensing scheme for efficient detection of VLC systems. The signal of user is OFDM signal and the wirelss channel between a user and VLC system is modeled as indoor VLC channel. From the simulation results, it is confirmed that the proposed scheme is very effective to signal sensing for VLC systems.

I. 서 론

무선 통신 및 방송 기술의 발달과 함께 최근의 정보통신 서비스는 사용자의 고속화 및 실시간 멀티미디어 서비스의 요구에 발맞추어 다양한 IT융합 기술이 탄생하고 있다. 그 중 가시광 조명통신 융합기술은 LED 조명과 동시에 통신을 할 수 있는 IT융합기술 중 하나이다[1]. LED 조명은 친환경적, 긴 수명, 고효

※ This work was supported by the IT R&D program of MKE/KEIT. (10035264, Development of Home Network Tech. based on LED-ID).
* 광운대학교 전자융합공학과 유비쿼터스통신 연구실 (inhwan623@kw.ac.kr, yoonhyun@kw.ac.kr, jinyoung@kw.ac.kr), (° : 교신저자)
논문번호 : KICS2011-08-357, 접수일자 : 2011년 8월 17일, 최종논문접수일자 : 2011년 10월 4일

율, 제어용이 등 많은 장점을 지니고 있다. 또한 기존의 조명의 역할을 수행하는 형광등 조명이 수은을 함유하고 있는 반면 LED 조명은 수은을 함유하고 있지 않으며, 형광등의 수명시간의 약 10배 이상의 긴 수명을 갖는다. 이러한 LED 조명의 장점을 인식하고 미국, 유럽 등 세계에서 LED 조명을 권장 또는 대체하려는 움직임을 보이고 있다. 이에 우리나라 또한 2015년 30%의 LED 조명으로 전환하고자 하는 1530 프로젝트를 추진하고 있다.

가시광통신 기술은 인간이 눈으로 인지할 수 있는 가시광 파장 대역의 빛을 이용하여 무선으로 정보를 전달하는 무선통신 기술로서 기존의 유선 광통신 기술 및 적외선 무선통신과 구별된다. 가시광통신 기술은 RF 무선통신과 달리 주파수 규제 및 허가를 받지 않고 자유롭게 이용이 가능하며 보안성이 우수하고 가시광을 통한 통신 링크를 사용자가 확인 할 수 있다[2,3]. 무엇보다 LED 조명의 고유 기능과 통신 기능을 동시에 얻을 수 있다는 점에서 융합 기술로서의 큰 특징을 지닌다. 이 뿐만 아니라 디지털 제어를 통한 감성 조명이 가능하고, 통신과 융합된 인간 중심의 무선통신 서비스를 제공할 수 있다. 예를 들면 광 ID, 광센서, 초정밀 실내 측위, M2M 등의 서비스가 그것이다.

하지만 조명 통신 융합 기술인 가시광통신은 이제 탄생한 기술로서 앞으로 해결하여야 할 과제도 많이 있다. 주변 광 간섭에 의한 통신 장애, 가시광 무선통신 표준의 미완성 등의 문제점들을 해결해 나가야 하는데 무엇보다 효율적인 통신을 위해서는 가시광통신 사용자와 송신기인 LED 조명간의 센싱의 신뢰성 및 정확도를 높이는 것이 필요하다. 센싱 기술은 크게 에너지 검출방식 (Energy detection), 정합 필터 검출방식 (Matched filter detection), 특성 검출 방식 (Cyclostationary detection) 으로 나눌 수 있으며, 그 중 가장 에너지 검출 방식이 가장 복잡도가 낮고 간단한 시스템이다. 이 외에도 신호의 cyclostationary 특성 존재 여부를 이용하여 신호의 존재 여부를 확인하는 방법이 활발히 연구되고 있다.

본 논문에서는 가시광통신 사용자와 LED 조명 송신기 사이의 효과적인 가시광통신 시스템의 신호 검출을 위해 자기상관특성을 이용한 에너지 검출 기반 센싱 기법을 제안하고, 이에 따른 분석 및 모의실험 결과를 나타낸다. 사용자의 신호는 OFDM기반의 시스템을 가정하였으며 사용자와 송신기 사이의 무선 채널은 가우시안 채널로 모델링 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 Ⅱ장에서는 가시광 조명통신 시스템 모델에 대하여 설명하고, 제 Ⅲ장에서는 제안하는 가시광 조명통신 시스템을 위한 신호 센싱 기법에 대해 설명하고 분석한다. 제 Ⅳ장에서는 모의실험을 통하여 제안한 신호 센싱의 성능을 비교하였고, 마지막으로 본 논문의 결론을 제 Ⅴ장에서 언급하였다.

Ⅱ. 가시광 조명통신 시스템 모델

2.1 LED 조명 송신기 및 수신기 모델

넓게 퍼지는 광원은 위치벡터 r_s, 단위길이 방향벡터 $\hat{n_s}$, 전력 P_s 그리고 복사강도 패턴(radiation intensity pattern) $R(\varnothing\theta)$로 나타내어진다. 여기서 복사강도패턴 $R(\varnothing\theta)$는 $\hat{n_s}$를 기준으로 $(\varnothing\theta)$ 방향으로 단위 입체각당 소스로부터 방출되는 광전력으로 정의된다. 소스는 θ에 무관하고 $\varnothing$방향으로 대칭인 일반적인 Lambertian 복사패턴으로 모델링 될 수 있다[4]. 이를 수식으로 표현하면

$$R(\varnothing)=\frac{n+1}{2\pi}P_s\cos^n(\varnothing) \quad \text{for } \varnothing\in[-\frac{\pi}{2},\frac{\pi}{2}], \quad (1)$$

이 된다. 여기서 n은 소스의 방향성을 결정하는 복사로브(radiation lobe)의 모드 수이다. 모드 번호가 증가할수록 방향성이 커지는 것을 의미하며 이를 나타낸 것이 그림 1이다. 계수 $(n+1)/2\pi$는 $R(\varnothing)$를 모든 각도에 대하여 적분하면 그 결과가 소스전력 P_s가 되도록 해주기 위하여 필요한 계수이다. 모드번호 n=1인 경우가 전통적인 Lambertian 소스이다. 표기를 간단히 하기 위하여 기준시간에 단위 임펄스로 표시되는 빛의 강도를 방출하는 점소스 S를 다음과 같은 순서로 된 세 개의 요소로 표시할 수 있다.

$$S=\{r_s,\hat{n_s}\,n\}, \quad (2)$$

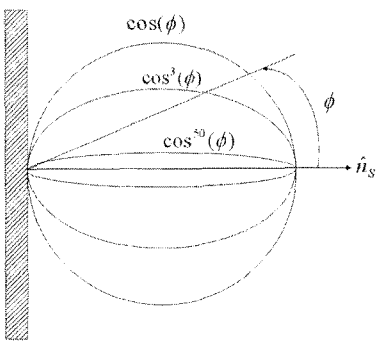


그림 1. 일반적인 Lambertian 방사패턴

여기서 r_s는 소스의 위치벡터이고 $\hat{n_s}$는 소스의 단위방향이고 n은 모드수이다. 비슷한 방법으로 수신기 R은 위치벡터 r_R과 방향벡터 $\hat{n_R}$과 수신면적 A_R 그리고 field of view(FOV)로 다음식과 같이 표시된다.

$$R = \{r_R, \hat{n_R}, A_R, FOV\}. \quad (3)$$

여기서 스칼라 양인 FOV는 검출기의 법선 방향을 기준으로 하여 FOV보다 작은 각도로 신호가 입사될 때만 수신기가 신호를 검출 할 수 있는 각도를 의미한다.

반사를 정확히 고려하려면 거울같이 반사되는 성분과 확산성분을 함께 고려하여야 하나, 반사하는 물체의 미분면소의 면적을 dA라하고 반사계수를 ρ라고 하면, 벽에서 반사현상을 다음과 같이 두 단계의 스텝으로 구분하여 나타낼 수 있다. 첫째, 면적이 dA인 미분면소를 수신기로 생각하여 이 수신기가 수신하는 전력 dP를 계산하고, 두 번째로 미분면소가 전력 P를 이상적인 Lambertian 복사강도패턴으로 방출하는 것으로 모델링한다.

2.2 가시광 조명통신 융합기술의 응용분야

그림 2는 가시광 조명통신 융합 시스템의 응용 예를 보여준다. LED는 일반 조명에 비해 4배 이상 높은 단가 및 밝기 문제 때문에 일반 주택 시장에는 거의 공급되지 못하였으나 최근 대형 건설사를 중심으로 고급 주택 및 아파트, 대형 빌딩 경관으로 채택되는 사례도 늘고 있으며 LED의 단가 하락이 이어지고 있어 LED의 단가하락 정도와 기술 발전에 따라 점차 일반 조명시장으로 응용분야를 넓혀갈 수 있을 것으로 전망되고 있다.

LED 통신은 조명용으로 사용되는 LED를 무선통신의 AP로 활용하여 실내 • 외의 단거리 통신 인프라로 활용하는 융합 신기술 창출 및 실내의 복잡한 유선을 제거하여 공간의 효율적 사용을 유도하며, 친환경적인 홈 네트워킹 기술에 활용되어 조명통신에 의한 융합 IT 산업창출이 이루어질 것이고, 기존의 free RF 대역인 ISM RF 대역의 사용급증으로 인해 실내통신 환경은 RF의 범람 시대가 되는데, 가시광통신 기술의 발전으로 친환경적인 무선통신 인프라를 제공할 수 있으려면 데이터 전송의 신뢰성이 보장되어야 한다. 따라서 본 연구를 통해 개발하게 될 LED 통신에 적합한 채널 코딩 알고리즘과 H-ARQ 기법은 대용량의 데이터 전송시 신뢰성을 보장하여 효율적이고 안정적인 실내 • 외 단거리 통신 인프라의 구축을 활성화 시킬 것이다[4,5].

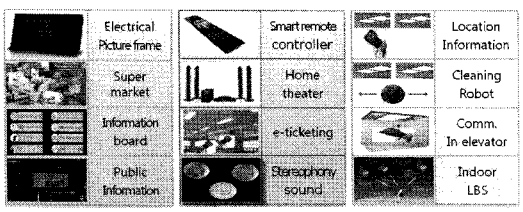


그림 2. 가시광 조명통신 융합 시스템의 응용 예

Ⅲ. 신호 센싱 기법

가시광 조명통신 융합시스템의 네트워크는 조명의 역할을 유지하면서 LED 조명 송신기와 사용자가 무선통신을 하기위해 지속적으로 네트워크에 사용자가 존재하는가를 확인해야 한다. 그리고 사용자는 여러 LED 조명 네트워크에서 자신이 원하는 신호를 송신하는 LED 조명 송신기를 확인하여 통신을 해야 한다. 그런데, 신호 센싱을 하는 동안 LED 조명 노드들의 송·수신기는 조명 및 데이터 송수신에 사용될 수 없으므로 신호 센싱이 너무 빈번하게 이루어진다면 가시광 조명통신시스템 네트워크의 전송 효율이 감소하게 된다. 따라서 신호 센싱의 효율 및 성능을 높이는 것이 매우 중요한 일이다.

그림 3은 기존의 에너지 검출 구조에 자기 상관함수 블록을 삽입하여 제안한 구조이다. 그림 3에서 에너지 검출기반의 방식은 수신된 신호에 FFT (Fast Fourier Transform)연산 및 평균을 취한 후, 그 결과를 특정 임계치와 비교하는 방법으로 해당 주파수 대역 내에 존재하는 신호의 검출을 수행한다. 에너지 검출기반의 신호 센싱 기법은 비교적 구조적 간단함을 가진다. 또한 FFT의 연산을 통해 이루어지므로 처리시간이 짧은 장점을 갖는다[6].

본 논문에서 제안한 방법은 자기 상관함수를 에너지 검출 기반의 신호검출에 적용하여 에너지검출 기반의 장점인 간단한 구조와 효율적인 신호 검출 결과를 얻는데 있다. 자기 상관함수는 어떤 시간에서의 신호값과 다른 시간에서의 신호값과의 상관값을 나타내는 것으로 다음과 같이 정의된다.

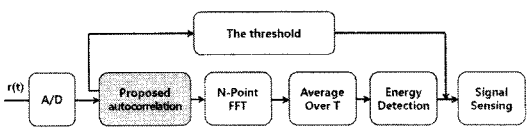


그림 3. 자기상관함수를 적용한 에너지 검출 기반의 블록도

$$R_{ff}(\tau)=E[f(t)f^{*}(t-\tau)]$$
$$R_{xx}(j)=E[x_n x^{*}_{n-j}] \quad (4)$$

잡음이 섞인 수신신호에 자기 상관함수를 취하면, 검출 신호 및 잡음성분도 증가하지만 SNR의 향상을 확인 할 수 있다.

사용자 수신기에 수신된 신호는 각각 독립된 채널로 수신되며, m $(m=1,2,...,M)$ 번째 수신기에 수신 신호의 에너지 Y_m는 다음과 같다.

$$Y_m=\sum_{k=1}^{L}|y_m(k)|^2 \quad (5)$$

식 (5)에서 L은 수신된 신호의 샘플 개수를 나타내고, $y_m(k)$은 LED 송신기로부터 m 번째 수신기에 수신된 신호를 나타낸다. 여기서 $y_m(k)$의 가우시안 분포를 따른다. $y_m(k)$에서 잡음의 평균 전력을 1이라고 가정하면, m 번째 LED 조명 기기의 순시(instantaneous) 신호 대 잡음비 (SNR: Signal to Noise ratio) γ_m는 식 (6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_m=\frac{1}{L}\sum_{k=1}^{L}s_m^2(k) \quad (6)$$

여기서 $s_m(k)$는 m번째 수신기가 수신한 사용자의 송신 신호를 나타낸다.

잡음이 섞인 수신신호에 자기 상관함수를 구하게 되면 검출 신호 및 잡음도 증가하게 된다. 그러나 검출방법을 적용하지 않은 결과에 비해 SNR의 향상을 확인 할 수 있다.

전송된 신호가 존재하는 경우 Y_m은 자유도 (Degree of Freedom) L 의 central chi-square 분포를 따르고, 신호가 존재하지 않는 경우는 자유도 L 및 $\lambda_m=L\gamma_m$의 non-centrality 파라미터[7]를 갖는 non-central chi-square 분포를 따른다.

$$Y_m\sim\begin{cases}\chi_L^2 & ,H_0\\ \chi_L^2(\lambda_m) & ,H_1\end{cases} \quad (7)$$

이 때 L값이 무한히 크다고 가정하면, Y_m의 확률분포는 중심 극한 정리 (central limit theorem)에 따라서 정규 분포의 특징을 가지게 되며, 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y_m\sim\begin{cases}N(L,2L) & :H_0\\ N(L(1+\gamma_m),2L(1+2\gamma_m)) & :H_1\end{cases} \quad (8)$$

수신기에서는 수신신호의 에너지를 임계값 T와 비교하여 임계값 이상이면 신호가 존재한다고 판단하고, 수신신호의 에너지가 임계값 미만일 경우 신호가 없다고 판단한다. 측정된 수신된 에너지 값을 통해 개별 판정을 내린 뒤 상호 교환된 센싱 정보를 취합하여 신호의 상태를 판단하게 된다. 개별 판정은 다음의 식 (9)과 같이 나타 낼 수 있으며 개별 판정결과를 융합한 값은 식 (10)과 같다.

$$Y_H=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}D_i[k] \quad (9)$$

$$D_i[k]=H(Y_m-T_i) \quad (10)$$

위 식에서 $D_i[k]$와 T_i는 각각 CR기기의 개별 판정결과 및 False alarm rate에 따른 임계값을 나타낸다.

$H(\bullet)$ 함수는 Heaviside step function 으로, Y_m이 임계값보다 크거나 같으면 $D_i[k]=1$이고, Y_m가 임계값보다 작으면 $D_i[k]=0$이다.

식 (8)에 따라 Y_H의 가우시안 분포를 정리하면 식 (11)와 같다[8].

$$Y_H\sim\begin{cases}N(L,\frac{2L}{M}) & :H_0\\ N(L\sum_{m=1}^{M}\frac{1}{M}(1+\gamma_m),2L\sum_{m=1}^{M}\frac{1}{M^2}(1+2\gamma_m)) & :H_1\end{cases} \quad (11)$$

Ⅳ. 모의 실험

이 장에서는 모의실험을 통하여 본 논문에서 제안한 가시광 조명통신 융합 시스템을 위한 자기 상관함수를 이용한 에너지 검출 기반의 신호 센싱 방법과 기존의 에너지 검출 기반의 신호 센싱의 성능비교를 나타내었다. 모의실험을 위한 시스템 모델은 단일 사용자와 M 개의 LED 조명 송신기가 가시광 무선 통신 네트워크를 구성하고 있다.

그림 4는 본 논문에서 사용한 가시광 무선통신 채널 $h(t)$의 임펄스 응답을 보여준다. x축은 시간을 y축은 수신된 신호의 파워를 나타낸다. 4개의 임펄스 응답의 존재의 이유는 각 펄스는 시간 지연에 의한 영향과 송수신단 사이의 서로 다른 거리 때문에 전력 감

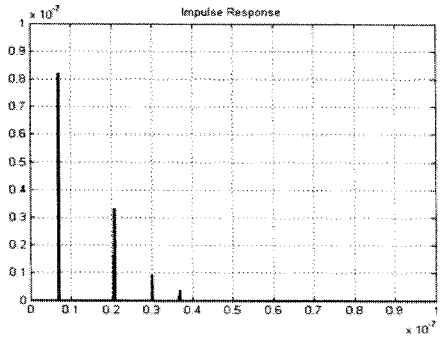


그림 4. 다중 반사 채널의 임펄스 응답

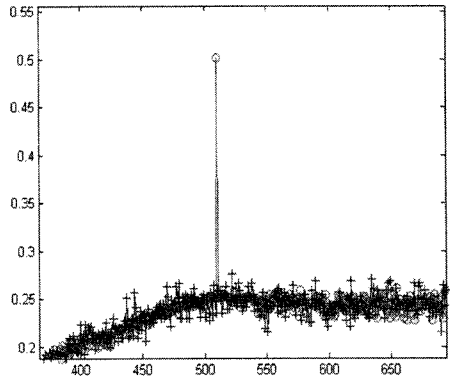


그림 6. 자기상관 특성 값

최도를 보인다. 그림 4의 임펄스 응답를 사용하여 마지막 수신단 신호는 다음과 같다. 여기서 $x(t)$는 입력 신호, $h(t)$는 실내 무선 가시광 채널, $n(t)$는 AWGN 이다.

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) + n(t) \tag{12}$$

그림 5는 각 LED 송신기의 에너지 값을 융합한 값과 비교되는 임계값을 나타낸 값으로 본 논문에서는 CFAR (Constant False Alarm Rate) 알고리즘[9]에 의해 설정되었다.

그림 6은 AWGN 채널에서의 pn 시퀀스를 사용한 자기상관 특성 결과이다. 붉은 선은 LED 조명 송신기로부터 전송된 신호와 수신기가 원하는 신호 사이의 자기상관 값을 나타내고, 푸른 선은 잡음 신호 또는 다른 LED 조명 송신기로부터 전송된 신호와 수신기가 원하는 신호 사이의 자기상관 값을 나타낸다. 전송된 신호와 수신기가 원하는 신호의 상관관계 최대값은 약 0.5 정도의 값을 가지며, 잡음신호와의 상관관계 최대값은 약 0.27 정도의 값을 가진다. 결과적으로 수신기에서 임계값 설정을 약 0.3정도로 설정하게 되면 사용자가 원하는 LED 조명 송신기의 신호 검출이 가능하게 된다.

그림 7은 사용자와 LED 조명 송신기사이의 거리에 따른 검출확률을 기존의 에너지 검출 방식과 비교하여 나타낸 결과이다. 각 LED 조명 송신기와 사용자의 거리는 거리가 모두 다르며 Pd_dist 0.5가 나타내는 거리가 LED 조명 송신기와 사용자의 거리가 가장 가까운 것이며 숫자가 커질수록 거리가 멀다. 모의실험 결과 LED 조명 송신기와 사용자의 거리가 가까울수록 검출확률이 높게 나타난다. 에너지 검출법을 기반으로 하여 수행한 결과이므로 거리가 가까운 수신기의 수신 에너지 값이 거리가 먼 수신기에 비하여 높다는 것을 알 수 있다. 그리고 낮은 SNR 환경에서는 제안한 자기 상관함수를 적용한 에너지 검출방식 기

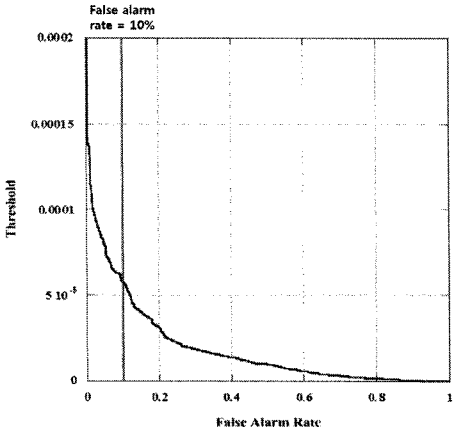


그림 5. 오검출 확률에 따른 임계값

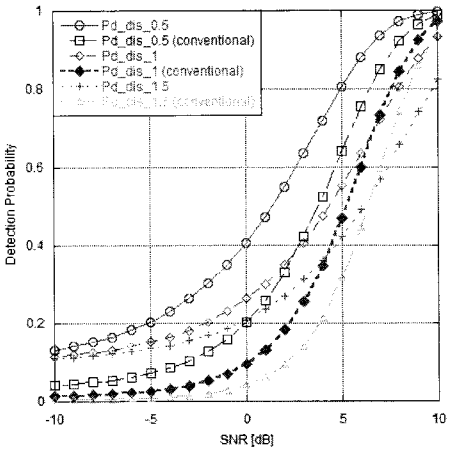


그림 7. 사용자와 LED 조명 송신기 사이 거리 및 SNR에 따른 신호 센싱 확률

반 신호센싱 방법이 기존 에너지 검출 기반의 신호 센싱 방법보다 더 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있고, 반면 높은 SNR 환경에서는 기존의 에너지 검출 기반 신호센싱 방법이 더 효과적인 것을 확인할 수 있다. 잡음이 섞인 수신신호에 자기 상관함수를 취하면, 검출 신호 및 잡음성분도 증가하게 된다. 그러나, 기존의 검출방법으로 검출된 결과에 비해 SNR의 향상을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 가시광 조명통신 융합 시스템을 위한 효과적 신호 검출을 위한 다양한 센싱방법의 성능을 비교분석하였다. 가시광 조명통신 융합 시스템은 LED 조명기기로 이루어진 시스템으로 저소비전력으로 신뢰성 있고 정확한 신호 센싱 및 검출이 필요하다. 본 논문에서 제안한 방법은 수신된 신호에 자기 상관함수를 적용하여 잡음에 의한 잘못된 판단을 줄일수 있으며, 자기 상관함수가 계산된 신호는 기존의 신호에 비해 큰 값을 갖기 때문에 신호의 존재 유무를 판단하기 용이 하다. 모의 실험결과를 통하여 센싱 기법을 적용하지 않은 시스템보다 본 논문에서 제안한 자기상관 기반의 센싱방식의 검출확률이 높아 졌음을 확인하였다. 또한 에너지 검출 방법의 장점인 구조적 간단함과 빠른 센싱 결과를 얻을 수 있다. 향후 제안된 자기상관 기반의 센싱 방법을 통해 가시광 조명통신 융합시스템에 효과적인 신호검출을 수행하는데 참조 할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] J. Y. Kim, LED Visible Light Communication Systems, *Hongreung Science Publishers*, Seoul, Korea, 2009.

[2] Y. Tanaka, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Wireless optical transmissions with the white colored LED for the wireless home links," *in Proc. of the 11th Int. Symp. Personal*, Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC 2000), pp. 1325-1329. Sep. 2000.

[3] T. Komine, Y. Tanaka, S. Haruyama, and M. Nakagawa, "Basic study on visible-light communication using light emitting diode illumination," in *Proc. of 8th Int. Symp. on Microwave and Optical Technol. (ISMOT 2001)*, Montreal, Canada, pp.4548, 2001.

[4] J. G. Proakis, Digital Communication, 4th ed., *Mc-Graw Hill*, New York, 2001.

[5] F. R. Gfeller and U. H. Bapst, "Wireless in-house data communication via diffuse infrared radiation", *in Proc. of IEEE*, Vol.67, No.11, pp.1474-1486, Nov. 1979.

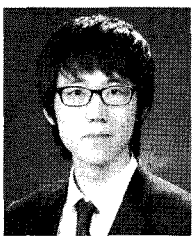
[6] H. Urkowitz, "Energy detection of unknown deterministic signals," *in Proc. of IEEE*, Vol.55, No.4, pp.523-531, Apr. 1967.

[7] F. F. Digham, M. -S. Alouini, and M. K. Simon, "On the energy detection of unknown signals over fading channels," *in Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, Vol.5, pp.3575 - 579, May 2003.

[8] J. Ma and Y. Li, "Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.7, No.11, pp.4502-4507, Nov. 2008.

[9] G. Minkler and J. Minkler, CFAR, *Magellam Book Company*, 1990.

박 인 환 (In Hwan Park) 준회원

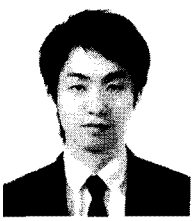


2010년 2월 광운대학교 전파공학과 졸업

2010년 3월~현재 광운대학교 전파공학과 석사과정

<관심분야> 가시광통신, 협력통신, 디지털통신

김 윤 현 (Yoon Hyun Kim) 정회원



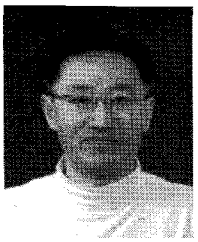
2006년 2월 광운대학교 전파공학과 졸업

2008년 2월 광운대학교 전파공학과 석사

2008년 3월~현재 광운대학교 전파공학과 박사과정

<관심분야> 가시광 통신, 협력통신, 인지무선통신

김 진 영 (Jin Young Kim) 종신회원



1998년 2월 서울대학교 전자공학과 공학박사
2001년 2월 SK텔레콤 네트워크 연구소 책임연구원
2001년 3월~현재 광운대학교 전자융합공학과 교수
<관심분야> 다지털통신, 가시광통신, UWB, 부호화, 인지무선통신, 4G 이동통신