

WPAN 시스템에서 초저전력 통신을 위한 변/복조 기술 성능 평가

김용욱*, 장영록*, 최수용^o

Performance Evaluation of De/Modulations for ULP Communications for WPAN Systems

Yongok Kim*, Youngrok Jang*, Sooyong Choi^o

요 약

본 논문에서는 WPAN에서 초저전력 무선 통신을 지원하기 위한 대표적인 변/복조 기술 후보인 GOOK와 GFSK 방식의 성능을 평가한다. 성능 평가를 위해 각 변/복조 방식의 송수신 시스템 모델을 제시한 후 해당 시스템 모델에 기반한 모의실험을 진행한다. 모의실험을 통해 GOOK 방식이 GFSK 방식 대비 전력 스펙트럼 밀도의 대역의 방사에서 약 15 dB의 이득을 획득하며 또한 주파수 오프셋에 따른 BER 성능 열화에 강한 특성을 지님을 확인할 수 있다.

Key Words : GFSK, GOOK, ULP, WSN, WPAN

ABSTRACT

In this letter, we evaluate the performances of both GOOK and GFSK de/modulation techniques which are candidates for ULP communications in WPAN systems. For the performance evaluation, we define the system model for each of GOOK and GFSK de/modulations and perform computer simulations based on the proposed models. From the computer simulations, we show that GOOK

de/modulation technique has 15 dB out-of-band emission gain and is robust over frequency offsets in terms of BER compared to GFSK de/modulation technique.

I. 서 론

최근 무선 네트워크 기술을 통해 인간의 건강을 효과적으로 관리할 수 있는 U-헬스케어 (Ubiquitous Healthcare) 서비스가 각광 받고 있다¹⁾. 이러한 서비스를 제공하기 위한 핵심 기술로서 소형의 무선 통신 장치들을 오랜 시간 동작 가능케 하는 초저전력 무선 통신 기술에 대한 관심이 증대되고 있다. IEEE 802.15.4q에서는 비면허 대역에서 동작하는 무선 센서 네트워크의 송신 전력을 15mW 이하의 소모를 목표로 하는 ULP (Ultra Low Power) 물리계층 표준화가 진행 중에 있다^{2,3)}. 현재 ULP 물리계층을 위한 변/복조 기술 후보로는 Samsung 및 IMEC에서 제안하는 GOOK (Gaussian pulse shaped On-Off Keying) 변/복조 방식²⁾과 Silicon Labs 등에서 제안하는 GFSK (Gaussian Frequency-Shift Keying) 변/복조 방식³⁾이 대립하고 있다. GFSK는 기존 블루투스 (Bluetooth) 및 IEEE 802.15.4g에서 정의된 변/복조 기술이므로 호환성이 좋은 반면 GOOK는 Super-Regenerative Receiver를 활용해 효율적으로 전력을 사용하는 장점이 있다^{4,5)}.

따라서 본 논문에서는 15.4q ULP 기고문의 스펙을 기반으로 GOOK와 GFSK 두 변/복조 방식에 대해 컴퓨터 모의실험을 통한 전력 스펙트럼 밀도 (Power Spectral Density) 특성 확인 및 주파수 오프셋 (Frequency Offset)에 따른 BER (Bit Error Rate) 성능을 평가하고 비교한다.

II. 변/복조 기법 시스템 모델

본 장에서는 GOOK와 GFSK의 변/복조 기술의 송수신 방식에 대하여 서술한다. 소형의 무선 통신 장치 특성을 고려하여 두 기법 모두 비동기식 (Non-Coherent) 복조방식을 고려하며 GFSK의 톤 (Tone)

* 이 논문은 2012년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No. 2012R1A1A2041906)의 지원을 받아 연구되었음.

[♦] First Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, dyddhr0518@yonsei.ac.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, csyong@yonsei.ac.kr, 중신회원

* School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, dynamics@yonsei.ac.kr, 학생회원

논문번호 : KICS2015-10-327, Received October 7, 2015; Revised October 27, 2015; Accepted December 15, 2015

개수는 2개로 가정한다^[3].

2.1 GOOK 시스템 모델

GOOK 변조는 ‘1’과 ‘0’으로 구성된 이진 (Binary) 소스 신호에 가우시안 필터 (Gaussian Filter) $h(t)$ 를 컨볼루션 (Convolution) 연산 후 반송 주파수 (Carrier Frequency) f_c 에 실어 전송한다. 이때 가우시안 필터 $h(t)$ 는 다음과 주어진다^[2].

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma T} e^{-t^2/2\sigma^2 T^2}, \text{ where } \sigma = \frac{\sqrt{\ln 2}}{2\pi BT}. \quad (1)$$

식 (1)에서 T 는 심볼 주기 (Symbol Period)이고, BT (Bandwidth by the bit period of the Transmission)는 필터의 대역폭 특성을 결정하는 파라미터이다. 신호 수신시 주파수 오프셋 f_{off} 과 백색 가우시안 잡음 (White Gaussian Noise)이 더해진 신호가 수신된다. 이후 수신 신호의 비동기식 복조를 위해 에너지 검출 방식에 기반한 직교 수신기를 사용한다. 이 때 수신 필터로는 정합 필터 (Matched Filter) $h(t)$ 를 사용하고 에너지 검출 경관정시 (Hard Decision) 문턱값 (Threshold)은 검출된 평균 에너지 값의 절반으로 한다.

2.2 GFSK 시스템 모델

GFSK 변조 시 송신 필터는 가우시안 필터 $h(t)$ 를 이용하며 다음과 같이 주어진다^[4].

$$g(t) = h(t) * \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right), \quad (2)$$

$$\text{where } \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) = \begin{cases} 1/T & \text{for } |t| < T/2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

식 (2)에서 $*$ 는 컨볼루션 연산자이다. ‘1’과 ‘-1’로 구성된 양극성 (Bipolar) 소스 신호는 송신 필터 $g(t)$ 를 통과하여 신호 $m(t)$ 를 얻는다. 이후 $m(t)$ 는 적분기를 통과하여 다음과 같이 신호 $q(t)$ 를 얻는다^[3].

$$q(t) = 2\pi n \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau \quad (3)$$

식 (3)에서 n 는 변조지수이며 GFSK의 주파수 톤 간격에 관련된 파라미터이다. 식 (3)의 $q(t)$ 는 반송 주파수의 위상 부분에 더해져서 송신되며, 신호 수신시 송신 신호에 주파수 오프셋 f_{off} 과 백색 가우시안 잡음이 더해져 신호가 수신된다. 수신된 신호는 비동기식 직교 수신기를 통해 동상 (In-phase) 성분과 직교 (Quadrature) 성분으로 나누어져 하향 변환된 후 저역

필터를 사용하여 기저대역 신호로 각각 변환된다. 이 때 $q(t)$ 를 추출하기 위해 기저대역으로 변환된 동상 성분과 직교 성분을 서로 나눈 값을 역탄젠트 연산하면 $q(t)$ 를 복조할 수 있다. 이후 복조된 $q(t)$ 를 미분기에 통과시켜 $m(t)$ 를 복조한다. 마지막으로 복조된 $m(t)$ 는 IaD (Integrate-and-Dump) 알고리즘을 사용하여 최초의 소스 신호로 복조한다^[3].

III. 모의실험 및 결과 고찰

본 장에서는 컴퓨터 모의실험을 통해 GOOK 및 GFSK 변/복조 방식의 전력 스펙트럼 밀도 및 주파수 오프셋에 따른 BER 성능을 비교한다. 심볼 주기 및 반송 주파수는 ULP 기고문을 참고하여^[2,3] $T=1\mu s$ 와 $f_c=2.41GHz$ 로 설정한다. $h(t)$ 와 $g(t)$ 의 필터 사이즈는 필터의 크기가 0에 충분히 수렴하도록 각각 $6\sigma T$ 와 $4T$ 로 설정한다. 또한 동등한 성능 비교를 위해 GOOK 및 GFSK의 99% 전력 밀도 대역폭이 유사한 값을 갖도록 하는 BT 및 n 을 실험적으로 찾는다. 본 실험에서는 99% 전력 밀도 대역폭이 약 1.5MHz를 갖는 $BT=0.35$ 및 $n=1$ 로 설정한다.

그림 1과 2는 각각 설정된 파라미터에 따른 GOOK와 GFSK의 전력 스펙트럼 밀도 그래프이다. 샘플링 복잡도를 고려하여 임의의 20MHz 반송 주파수 위에서 측정하였다. 그림 1과 2의 99% 전력 밀도 대역폭은 모두 약 1.5MHz로 측정되지만 대역외 방사 (Out-of-band Emission)는 GOOK 방식이 GFSK 대비 약 15 dB 우수함을 확인할 수 있다.

그림 3 및 4는 주파수 오프셋에 따른 GOOK 및 GFSK 변/복조 방식의 BER을 나타낸다. 이 때 주파수 오프셋은 반송 주파수 f_c 에 대한 정규화 주파수 오프

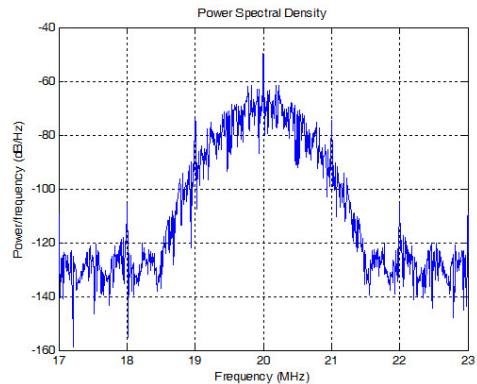


그림 1. $BT=0.35$ 에서 GOOK의 전력 스펙트럼 밀도
Fig. 1. Power spectral density of GOOK with $BT=0.35$

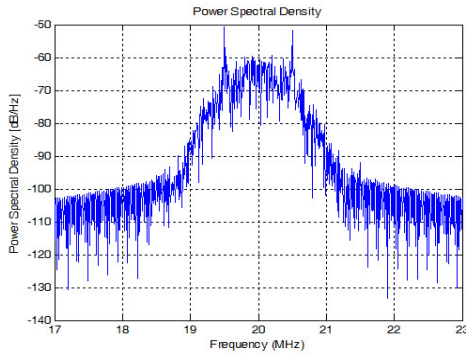


그림 2. $BT=0.35$, $n=1$ 에서 GFSK의 전력 스펙트럼 밀도
Fig. 2. Power spectral density of GFSK with $BT=0.35$ and $n=1$

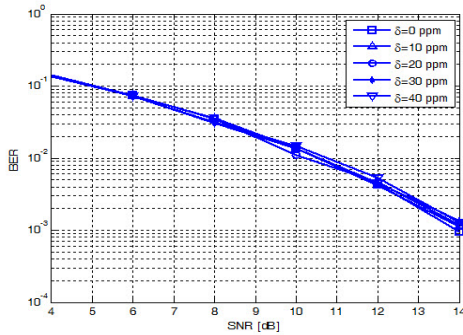


그림 3. 정규화 주파수 오프셋 δ 에 따른 GOOK의 BER
Fig. 3. BERs of GOOK according to the normalized frequency offset δ

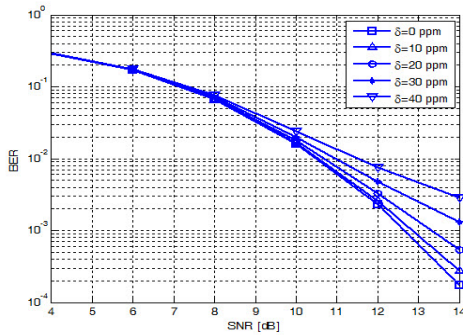


그림 4. 정규화 주파수 오프셋 δ 에 따른 GFSK의 BER
Fig. 4. BERs of GFSK according to the normalized frequency offset δ

프셋 $\delta = f_{off}/f_c$ 를 사용한다. 또한, 정규화 주파수 오프셋 δ 는 10, 20, 30, 40 ppm을 ($1\text{ppm}=10^{-6}$) 사용한다. 그림 3을 통해 GOOK 에너지 검출 복조 방식 특성상 주파수 오프셋에 따른 BER 성능 열화가 발생하

지 않음을 확인할 수 있다. 또한, 그림 3 및 4의 결과를 통해 주파수 오프셋이 없는 경우에 높은 SNR (Signal-to-Noise Ratio) 영역에서는 GFSK가 GOOK 보다 우수한 BER 성능을 달성함을 확인할 수 있다. 하지만, GFSK의 경우 주파수 오프셋 발생에 따라 수신단에서 추정 톤 위치의 어긋남이 발생하며, 따라서 GFSK는 GOOK 대비 주파수 오프셋 증가에 따른 BER 성능 열화가 심화됨을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.15.4q ULP에서 고려하는 초저전력 통신을 위한 변/복조 기술 후보인 GOOK와 GFSK의 전력 스펙트럼 밀도 특성 및 주파수 오프셋에 따른 BER 성능을 평가하였다. 모의실험을 통해 GOOK는 GFSK 대비 보다 낮은 대역의 방사 전력을 가질 뿐만 아니라 주파수 오프셋에 따른 BER 성능 열화 또한 발생하지 않음을 확인하였다. 향후 과제로, 시간 동기 오프셋 및 페이딩 채널 환경에서의 GOOK와 GFSK의 성능 평가도 필요하다.

References

- [1] C. Yun, "A study on implementation of u-healthcare monitoring system in WBAN," *J. KICS*, vol. 35, no. 8, pp. 171-178, Aug. 2010.
- [2] IEEE P802.15-14-0178-00-004q, *Samsung and IMEC physical layer merged proposal*, Mar. 2014.
- [3] IEEE P802.15-14-0072-00-004q, *Joint ULP-GFSK PHY layer proposal*, Jan. 2014.
- [4] R. Schiphorst, F. Hoeksema, and K. Slump, "Bluetooth demodulation algorithms and their performance," in *Proc. Karlsruhe Workshop Software Radios*, pp. 99-106, Mar. 2002.
- [5] F. X. Moncunill-Geniz, P. Palà-Schönwälder, and O. Mas-Casals, "A generic approach to the theory of superregenerative reception," *IEEE Trans. Cir. and Syst.*, vol. 52, no. 1, pp. 54-70, Jan. 2005.