

저전력 IoT를 위한 펄스 폭 변조(PWM) 신호의 비동기 검출기법 연구

김영호, 강승우, 박정현, 장서광, 김정훈

한국해양대학교

dudms292@g.kmou.ac.kr, wooandsu@g.kmou.ac.kr, pjh7013pjh@g.kmou.ac.kr,
seokwang71@g.kmou.ac.kr, j.kim@kmou.ac.kr

A Study on the non-coherent Detection of Pulse Width Modulation for Low-Power IoT systems

Kim Young Ho, Kang Seung Woo, Jang Seo Kwang, Park Jeong Hyeon, Kim Junghoon

Korea Maritime & Ocean University

요약

본 논문은 사물인터넷(IoT)의 확산은 초소형·저전력 단말기의 수요를 증가시키고 있다. 본 연구는 기존 LTE, NB-IoT, Wi-Fi 기반 통신 방식의 높은 전력 소모 문제를 해결하기 위해, 펄스 폭 변조(PWM)와 비동기 수신 기법을 활용한 초저전력 통신 구조를 제안한다. MATLAB 환경에서 송신기 및 수신기 모델을 구현하고, 915 MHz 반송파, 100 kbps 전송률, 20GHz 샘플링, AWGN 채널 조건에서 BER 성능과 전력 소모를 분석하였다.

I. 서론

최근 사물인터넷 (Internet of Things, IoT) 기술이 다양한 산업 분야로 확산됨에 따라, 저전력 통신 기술의 중요성이 강조되고 있다. 특히 배터리 기반의 제한된 에너지원으로 동작하는 IoT 노드 환경에서 통신 모듈의 전력 소모는 전체 시스템 수명 연장 및 운영 효율성 제고에 핵심적 제약 요소로 작용한다. 복잡한 동기화 과정을 필요로 하는 동기식(coherent) 수신기가 요구되는 기존의 디지털 변조 방식은 높은 전력 소모를 유발하여, 에너지 효율이 우선시 되는 IoT 단말에는 적합하지 않은 한계가 있다. 이를 극복하기 위하여 별도의 동기화 과정 없이 신호 검출이 가능한 비동기식(non-coherent) 수신 방식에 대한 논의가 활발하게 진행되고 있다. 비동기식 수신기는 단순한 회로 구현으로 저전력, 저비용 시스템 설계에 큰 이점을 보인다. 따라서 본 논문에서는 비동기식 수신 방식의 장점을 극대화 할 수 있는 단순한 구조의 펄스 폭 변조 (Pulse Width Modulation, PWM) 방식과 이에 최적화된 비동기식 신호 검출 기법을 결합하여, 저전력 IoT 통신 환경에 특화된 새로운 시스템의 구현 방안을 제시한다. 나아가, 제안하는 비동기식 수신기 구조의 성능 분석을 통해 실현 가능성 및 실용적 가치, 그리고 에너지 효율성의 우수함을 입증하여 차세대 저전력 IoT 통신방식에 대한 새로운 방향성을 모색하고자 한다.

II. 본론

본 연구에서는 기존 동기식 복조 방식의 복잡도와 높은 전력 소모 문제를 극복하기 위하여, 송신 신호의 위상이나 클록 정보를 복원하지 않고, 신호의 물리적 특성(에너지, 시간적 지속 구간, 주파수 대역폭)을 검출 기준으로 데이터 복조를 수행하는 비동기식 수신기 구조를 제안한다. 송신 신호는 이진 펄스 폭 변조 방식(PWM)을 사용하였다. 각 비트 구간의 길이는 $T_b = 1/R_b$ 로 일정하며, 정보비트 '0'과 '1'은 각각 둑티사이클을 $D_0 = 0.3$, $D_1 = 0.7$ 을 부여하여 서로 다른 펄스폭을 갖는다. 이에 따라 송신 신호 $s_i(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$s_i(t) = \begin{cases} A & , 0 \leq t \leq D_i T_b \\ 0 & , D_i T_b \leq t < T_b \end{cases} \quad (i = 0, 1)$$

이때 둑티 사이클이 작은 신호(D_0)는 시간적으로 짧고 넓은 주파수 대역폭을 가지며, 평균 에너지가 낮다. 반면 둑티 사이클이 큰 신호(D_1)는 긴 펄스폭과 높은 에너지를 가지며 상대적으로 좁은 대역폭을 갖는다. 본 논문에서 제안하는 각 수신기 구조는 이러한 에너지, 시간, 대역폭의 차이를 검출하여 반송파 동기 없이 비동기적으로 신호를 복조하는 데 목적이 있다.[1],[2]

위의 특성을 각각 활용하는 세 가지 비동기 수신기 구조를 제안한다. 기본적인 비동기식 수신기는 수신된 신호 자체를 이용하여 비트 판정을 수행한다. 그러나 Passband 영역에서의 RF 신호는 높은 반송파 주파수를 포함하고 있어, 이를 직접 처리하기 위해서는 매우 높은 샘플링 속도와 연산량이 요구된다. 이러한 특성은 수신 회로의 구성 부품을 고성능·고가로 만들며, 시스템의 전체 전력 소모 또한 증가시키는 한계를 가진다.

RF 신호를 정류(rectification)하고 저역통과필터(LPF)를 통해 포락선을 추출하면, 상대적으로 낮은 샘플링 속도에서도 신호의 진폭 정보를 효과적으로 검출할 수 있다. 이를 통해 하드웨어 복잡도와 전력 소모를 동시에 줄이면서 비동기식 수신 구조의 실현 가능성을 향상시킬 수 있다. 따라서 이러한 장점을 활용하기 위해 포락선(envelope) 추출 기반 비동기 수신 방식을 추가적으로 제안한다.[3]

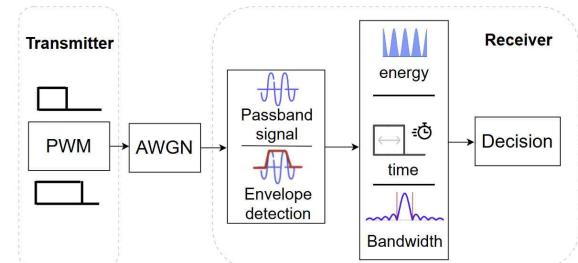


Figure. 1 수신기 구조 블럭다이어그램

첫 번째로, 에너지 검출 수신기(Energy Detection Receiver)는 수신된 신호의 전체 에너지를 계산하여 비트를 판별한다. 각 비트 구간에서 에너지를 구하고, 그 결과를 기준 에너지 임계값과 비교함으로써 '1' 또는 '0'을 결정한다. 뉴티사이클이 큰 신호일수록 더 많은 에너지를 포함하므로 임계값보다 크면 '1', 작으면 '0'으로 판정된다.

두 번째로, 시간 - 진폭 복합 수신기(Time - Amplitude Hybrid Detection Receiver)는 수신 신호의 진폭이 일정 진폭 임계값보다 높은 구간을 검출하고, 해당 구간의 지속시간(High-time)을 계산한 뒤 그 시간의 길이를 기준으로 비트를 판정한다.

세 번째로, FFT기반 검출 수신기(FFT-Based Detection Receiver)는 주파수 영역에서의 스펙트럼 폭 차이를 이용하여 비트를 복원한다. 수신 신호에 푸리에 변환(FFT)을 적용하여 전력 스펙트럼을 구한 후, 대역폭을 계산한 뒤, 이 폭을 기준 대역폭 임계값과 비교하여 수신 신호를 판정한다.

마지막으로, 포락선 기반 수신기(Envelope-Based Receiver)는 반송파를 포함한 신호로부터 포락선을 추출한 뒤, 이를 앞서 제시한 에너지·시간·대역폭 검출 방식에 동일하게 적용하는 구조이다. 포락선은 신호의 실효 진폭 변화를 표현하므로, 신호의 에너지를 기준으로 하면 에너지 검출기로, 지속시간을 이용하면 시간 - 진폭 복합 검출기로 대역폭을 이용하면 FFT수신기로 동작한다.

이러한 구조들은 단순한 정보 복조 기능 외에도 반송파 에너지를 활용한 전력 수확(Energy Harvesting) 기능과 결합될 수 있어, 향후 정보·전력 동시 전송(SWIPT: Simultaneous Wireless Information and Power Transfer) 수신기로의 확장 가능성을 갖는다.

AWGN(Additive White Gaussian Noise) 채널을 가정하여 검증하며, 송신 신호는 저전력 IoT 환경에서 주로 사용되는 파라미터 설정으로 915 MHz 반송파와 100 kbps 전송률을 기준으로 생성한다. 수신기는 동일한 채널 조건하에서 SNR을 0 dB에서 30 dB까지 변화시키며 비트 오류율(Bit Error Rate, BER) 성능을 비교한다.

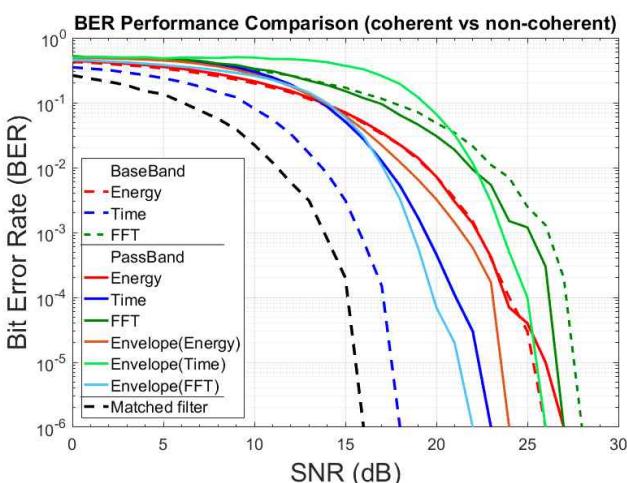


Figure.2 coherent vs non-coherent수신기별 SNR대비 BER값 비교
시뮬레이션 결과, 비동기식 수신기들은 구조적 특성에 따라 상이한 성능 경향을 보였다. 가장 단순한 에너지 검출기(Energy Detector)는 최소 신뢰 구간($BER = 10^{-5}$) 기준 약 14 dB 및 15 dB 부근에서 성능 한계를 나타내었으며, 시간 검출기(Time Detector)와 포락선 기반 시간 검출기(Envelope(Time))는 뉴티사이클 차이를 직접 활용함으로써 에너지 검출 대비 약 2 - 3 dB 개선된 SNR 성능을 보였다.

또한, 전체 수신기 간 성능 비교 결과, 동기식(매치드 필터) 수신기는 약 12.5 dB 및 13 dB에서 최소 신뢰 구간을 달성한 반면, Envelope(Time) 및 Time 검출기는 약 15 - 17 dB에서 유사한 성능을 보였다. 한편 FFT

기반 검출기는 동일 기준 BER을 만족하기 위해 약 10-20dB의 추가 SNR이 요구되어 기존의 통신시스템에 적용하기에 현저한 성능 열화가 존재한다. 그러나, 본 연구는 저전력 IoT 시스템과 무선 전력 전송을 결합한 SWIPT 시스템으로의 확장을 고려하고 있으며, SWIPT 시스템의 전력 수신을 위한 요구 전력은 일반적으로 -30dBm 이상으로 높은 수신전력이 요구되어, 수신기에서 50dB 이상의 높은 SNR의 확보가 가능하여, 본 실험을 통해 확인한 비동기식 수신기의 성능 열화가 SWIPT 시스템에서의 정보수신 성능 확보에 미치는 영향이 제한될 수 있음을 기대할 수 있다. 본 논문은 대역폭 검출 수신구조의 실현 가능성과 그 성능에 대한 분석을 제시하는데에 의의를 둔다.

전력 소모 분석 결과, 동기식 구조인 Matched Filter 수신기는 약 15 mW의 전력을 소비하는 반면, 제안된 비동기식 검출기들은 1 μ W에서 100 μ W 수준으로 동작하여 22 -32 dB(약 150~1600배)의 전력이득을 보였다. 특히 Envelope(Time) 검출기의 전력 소모는 약 10 μ W(32 dB) 수준으로, 매치드 필터 대비 0.07 % 이하의 에너지 소비율을 나타냈다. 이러한 결과는 비동기식 수신기가 소폭의 SNR 손실을 감수하더라도, 전력 효율성 측면에서 압도적인 이점을 가진 구조임을 입증한다.[1]

구조	전력	전력이득
Matched filter	12~15mW	0
Energy Detector	9~90 μ W	22dB
Time Detector	6~60 μ W	25dB
FFT	60~90 μ W	23dB
Envelope(Energy)	4.5~7.5mW	4dB
Envelope(Time)	0.9~9 μ W	32dB

<Table. 1 수신기별 전력 소모량 및 Matched filter 기준 전력 이득>

따라서 본 연구에서 제안한 비동기식 검출 기반 수신기는 하드웨어 복잡도를 최소화하면서도 높은 에너지 효율을 확보할 수 있어, 향후 에너지 하베스팅 기반 초저전력 IoT 시스템 및 자율형 센서 네트워크 구현에 적합한 핵심 기술적 대안으로 기대한다.

III. 결론

본 연구에서는 PWM 신호를 이용한 비동기 수신기 구조를 제안하고, AWGN 채널 환경에서 그 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 제안된 수신기들은 동기 복조 회로 없이 뉴티사이클 차이에 따른 에너지, 시간, 주파수 특성을 검출함으로써 안정적인 데이터 복원이 가능함을 확인하였다. 본론의 성능 검토 결과, 제안한 비동기식 신호 검출 기법들이 저전력 IoT 통신 환경에서 실현 가능한 수준의 성능과 전력 효율을 동시에 달성함을 확인하였다. 이러한 결과는 비동기 수신기가 초저전력 IoT 단말 구현을 위한 실질적 대안이 될 수 있음을 보여주며, 향후에는 페이딩 채널 및 실제 하드웨어 검증을 통해 그 실용성을 더욱 확장할 예정이며, 또한, 무선 전력 전송과 정보 통신을 동시에 수행하는 SWIPT 기술과의 융합을 통해, 제안된 비동기 수신 구조가 에너지 하베스팅 기반 IoT 시스템에 적용될 수 있는 가능성을 탐색할 계획이다. 이러한 사용 사례에 대한 연구는 후속 연구를 통하여 심도깊이 고려될 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] Haxhibeqiri J, De Poorter E, Moerman I, Hoebeke J. A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application. Sensors. 2018; 18(11):3995.
- [2] A. Jain, S. K. Mandal, T. Nandy and V. Uppal, "A low power 1.2Gbps sync-less integrating PWM receiver," *2013 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC)*, Singapore, 2013, pp. 229-232.
- [3] J. Huang *et al*, "An Energy Harvesting Algorithm for UAV-Assisted TinyML Consumer Electronic in Low-Power IoT Networks," in *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 70, no. 4, pp. 7346-7356, Nov. 2024.