

# 무선 채널 환경에서 펄스 폭 변조 기반(Pulse Width Modulation) 저전력 IoT 비동기 수신기법 연구

강승우, 김영호, 박정현, 김정훈

한국해양대학교

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

## A Study on Low-Power Non-Coherent Receiver for IoT Using Pulse-Width Modulation in Wireless Multipath Channels

Kang Seung Woo, Kim Young Ho, Park Jeong Hyeon, Kim Junghoon

Korea Maritime & Ocean University

### 요약

최근 IoT 단말의 확산으로 배터리 기반 제한 에너지 환경에서 수신기 전력 소모 저감이 중요한 과제로 부각 되고 있다. 본 논문에서는 동기화 및 채널 추정 과정에 따른 전력 부담이 큰 동기식 수신 방식의 대안으로, PWM 기반 비동기식 수신 구조를 제안한다. 제안 구조는 포락선 기반 특징량을 이용하는 에너지 검출, 시간-진폭 복합 검출, FFT 기반 검출 수신기로 구성되며, 동기식 수신기와의 비교를 통해 성능 및 전력 소모 측면의 특성을 분석한다. 또한 MATLAB 시뮬레이션을 통해 AWGN 채널과 다중경로 Rayleigh 페이딩 채널 환경에서 SNR 변화에 따른 BER 성능을 평가하고, 채널 환경에 따른 수신기 구조별 효율성에 대해 고찰한다.

### I. 서론

최근 사물인터넷(Internet of Things, IoT)은 다양한 분야에서 미래 삶과 산업의 핵심 기술로 전망되고 있다. 특히 배터리 기반의 제한된 에너지 환경에서는 수신기 신호 처리 방식의 단순화를 통해 전력 소모를 줄이는 것이 시스템 효율 향상에 중요한 요소가 된다. 기존 디지털 통신에서 널리 사용되는 동기식 수신기는 반송파 및 타이밍 동기화, 채널 추정 등 복잡한 절차와 회로 구성이 요구되어 전력 소모가 증가하는 경향이 있다. 반면 비동기식 수신 방식은 별도의 동기화 과정을 최소화하고 비교적 단순한 구조로 구현할 수 있어 저전력·저비용 시스템 설계에 유리하다.

이에 본 논문에서는 비동기식 수신 방식에 적합한 펄스폭 변조(Pulse Width Modulation, PWM) 기반 통신 시스템을 제안한다. 또한 제안 시스템의 성능을 분석하여 실용적 가치와 에너지 효율성을 검증하고, 차세대 초저전력 통신의 대안으로서 가능성을 고찰하고자 한다.

### II. 본론

본 논문에서는 AWGN 채널과 Rayleigh 페이딩 채널 환경에서 제안 시스템의 성능을 비교하고, 동기식 수신기와 비동기식 수신기의 BER(Bit Error Rate) 성능을 MATLAB 시뮬레이션으로 평가하였다. AWGN 채널 환경에서는 수신 신호를 반송파 주파수 915 MHz, 전송률 1 Mbps, 샘플링 주파수 20 GHz 조건으로 구현하였다. Rayleigh 채널 환경에서는 복소 기저대역신호로 변환하여 실험을 수행하였다.

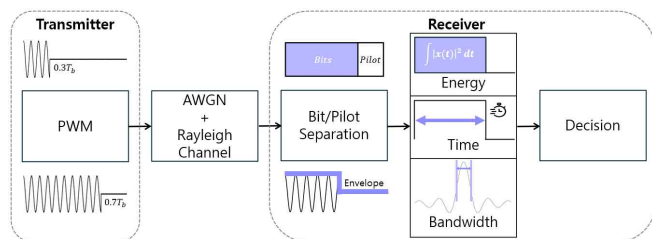


Figure 1 수신기 구조 블록 다이어그램

정보비트 '0'과 '1'은 각각 듀티사이클  $D_0 = 0.3$ ,  $D_1 = 0.7$ 을 부여하여 서로 다른 펄스폭을 갖는다. 첫 번째로, 에너지 검출 수신기는 수신된 신호의 전체 에너지를 계산하여 비트를 판별한다. 각 비트 구간에서 에너지를 구하고, 그 결과를 기준 에너지 임계값과 비교함으로써 '1' 또는 '0'을 결정한다. 듀티사이클이 큰 신호일수록 더 많은 에너지를 포함하므로 임계값보다 크면 '1', 작으면 '0'으로 판정된다.

두 번째로, 시간-진폭 복합 수신기는 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, FFT 기반 검출 수신기는 주파수 영역에서의 스펙트럼 폭 차이를 이용하여 비트를 판정한다. 수신 신호에 푸리에 변환(FFT)을 적용하여 전력 스펙트럼을 구한 후, 대역폭을 계산한 뒤, 이 폭을 기준 대역폭 임계값과 비교하여 수신 신호를 판정한다. 앞서 설명한 세 가지 수신기 모델에 포락선 검출 기법을 사용하여 진행하였다.

$$r(t) = \sum_{\ell=0}^{L_p-1} h_{\ell}(t) x(t - \tau_{\ell}) + w(t) \quad (1)$$

Rayleigh 채널은 복소 기저대역 다중경로 Rayleigh 페이딩 채널을 구성했고 위와 같은 수식의 모델로 구현한다. 여기서  $x(t)$ 는 송신 신호,  $r(t)$ 는 수신신호이다.  $L_p$ 는 다중경로의 개수,  $\tau_{\ell}$ 은  $\ell$  번째 경로 지연,  $h_{\ell}(t)$ 는 해당 경로의 채널 계수(복소 이득),  $w(t)$ 는 AWGN이다. Rayleigh 채널 실험에서 1 프레임은 총 1000 심볼로 설정하였고, 파일럿 심볼은 시간적으로 분산되도록 삽입하였다. 프레임은 파일럿 120 심볼과 데이터 880 심볼로 구성되며, 총 5개 슬라이스로 분할하였다. 각 슬라이스는 (Pilot 24+Data 176) 구조를 가지며, 파일럿 오버헤드는 12%로 설정하였다. 또한 Rayleigh 채널에서 동기식 수신기는 등화기 적용 유무에 따라 두 가지 모델로 구성하였다. 이는 등화기의 유무가 BER 성능과 전력 소모에 미치는 영향을 비교하기 위함이다.

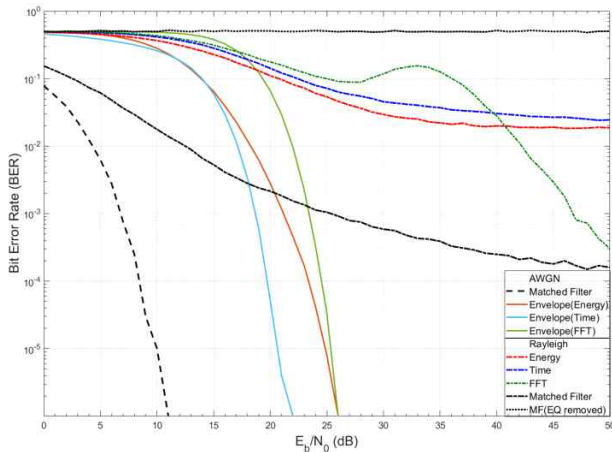


Figure.2 AWGN채널 및 Rayleigh 채널에서의 수신기별 SNR대비 BER값 비교

시뮬레이션 결과, 동기식 수신기(Matched Filter)는 등화기가 있는 모델과 없는 모델에서 확인한 차이를 보인다. 등화기가 없는 수신기 모델은 Rayleigh 채널에서 BER이 약 0.5에서 머무른다. 이는 등화기 없이 동기식 수신기가 판정하지 못한다는 것을 확인할 수 있다. 등화기를 사용한 수신기 모델은 AWGN 채널에서 약 9 dB ~ 10 dB에서  $10^{-5}$ 의 BER을 달성하였으나 Rayleigh 채널에서는 50 dB 환경에서  $10^{-3}$ 에서  $10^{-4}$  사이의 BER을 보여준다. 에너지 검출 수신기와 시간-진폭 복합 수신기는 Rayleigh 채널에서 50 dB에서  $10^{-1}$ 에서  $10^{-2}$  사이의 BER을 보여준다. 반면, FFT 기반 검출기는 주파수 영역에서 잡음 분리도가 낮아 AWGN 채널에서는 약 27 dB에서  $10^{-5}$ 의 BER을 달성하였으나 Rayleigh 채널에서는 50 dB 환경에서 등화기가 있는 모델의 동기식 수신기와 비슷한 정도의 성능인  $10^{-3}$ 에서  $10^{-4}$  사이의 BER을 확인할 수 있다. 전체 수신기 간 성능 비교 결과, 동기식 수신기는 Rayleigh 채널에서 저 SNR 환경에서는 비동기 수신기에 비해 뚜렷한 성능 우위가 확인된다. 그리고 SNR 50 dB에서는 에너지 검출기와 시간-진폭 복합 검출기에 비해서 약  $10^{-2}$  정도의 BER 성능 우위를 가지는 결과를 확인할 수 있다. 한편 FFT 기반 검출기는 50 dB 환경에서 동기식 수신기와  $10^{-1}$  이내의 BER 차이를 확인하였다.

전력 소모 조사 결과, 동기식 구조인 Matched Filter 수신기는 약 9~31 mW의 전력을 소비하는 반면, 제안된 비동기식 검출기들은 1  $\mu$ W에서 50  $\mu$ W 수준으로 동작하여 23 ~ 35 dB(약 180 ~ 3100 배)의 전력 이득을 보였다. 특히 Envelope(Time) 검출기의 전력 소모는 약 4.2  $\mu$ W 수준으로, 동기식 수신기 대비 0.05 % 이하의 에너지 소비율을 나타냈다. 이러한 결과는 비동기식 수신기가 동기식 수신기에 대비해서 Rayleigh 채널에서의 SNR 손실을 감수하더라도, 전력 효율성 측면에서 압도적인 이점을 가진 구조임을 입증한다.

	전력 소모량	근거자료
Envelope-based energy detector (WuRx)	10 - 50 $\mu$ W	[1]
Envelope High-Time (WuRx)	4.2 $\mu$ W	[2]
Envelope-FFT	1.5 ~ 12 $\mu$ W	[3],[4]
Matched Filter	9~31mW	[5]
Equalizer	2mW~3mW	[6]

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 하

베스팅 기반 초저전력 IoT 시스템 및 자율형 센서 네트워크 구현에 적합한 핵심 기술적 대안으로 기대한다.

### III. 결론

본 논문에서는 무선 채널 환경에서 저전력 IoT 단말을 위한 비동기 PWM 신호 검출 수신기 구조를 제안하였다. 제안 수신기들의 성능을 AWGN 단독 채널 및 Rayleigh 채널에서 비교·분석한 결과, FFT 기반 검출기는 SNR 50 dB 수준을 확보할 수 있는 환경에서 동기식 수신기와 BER 성능 차이가 10배 이내로 유지되는 것을 확인하였다. 또한 전력 소모 측면에서 비동기식 수신기는 동기식 수신기 대비 약 180 배에서 최대 3100 배까지의 전력 이득을 달성할 수 있음을 보였다. 따라서 제안한 비동기식 수신기 구조는 SNR 50 dB를 확보 가능한 조건에서 통신 성능 측면에서도 동기식 수신기를 실질적으로 대체할 수 있으며, 특히 전력 소모량 관점에서 높은 경쟁력을 갖는다. 향후 연구에서는 Rayleigh 채널에서의 성능 열화를 보상하기 위한 추가적인 신호 처리 기법을 고안하고, SWIPT (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer) 기술과의 융합을 통해 시스템을 확장할 예정이다. 이를 통해 저전력 IoT 단말의 지속 동작 시간 향상 가능성을 제시하고, 실환경 적용을 위한 설계 방향을 구체화할 수 있을 것으로 기대된다.

### ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No.RS-2023-00243069).

### 참 고 문 헌

- [1] Pletcher, Nathan. "Ultra-low power wake-up receivers for wireless sensor networks." 2008.
- [2] Fromm, Robert et al. "An Efficient Low-power Wake-up Receiver Architecture for Power Saving for Transmitter and Receiver Communications." International Conference on Sensor Networks 2021.
- [3] M. Seok, D. Jeon, C. Chakrabarti, D. Blaauw and D. Sylvester, "A 0.27V 30MHz 17.7nJ/transform 1024-pt complex FFT core with super-pipelining," 2011 IEEE International Solid-State Circuits Conference, San Francisco, CA, USA, 2011, pp. 342-344
- [4] P. -H. P. Wang et al., "A Near-Zero-Power Wake-Up Receiver Achieving -69-dBm Sensitivity," in IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 53, no. 6, pp. 1640-1652, June 2018
- [5] Y. Ying, F. Lin, and X. Bai, "Design and analysis of an energy-efficient O-QPSK coherent IR-UWB transceiver with a 0.52° RMS phase-noise fractional synthesizer," Journal of Semiconductors, vol. 39, no. 3, p. 035003, Mar. 2018
- [6] J. Kang, W. Jeong, K. Kwon, J. Chun. "A 12.5-Gb/s Low Power Receiver with Equalizer Adaptation" Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers 50, no.12 2013 : 71-79.