

대역폭 편이 변조 (BSK) : 에너지 자립형 IoT 네트워크를 위한 정보-전력 통합 파형 설계 기법

박정현, 김정훈

국립한국해양대학교

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

Bandwidth Shift Keying (BSK): An Efficient Waveform Design for Zero-Maintenance Integrated IoT Receivers

Jeonghyeon Park and Junghoon Kim

Korea Maritime & Ocean University

요약

본 논문에서는 유지보수가 불가능한 극한 환경 IoT 네트워크의 지속 가능성을 보장하기 위해, 에너지 자립형 IoT 센서 노드를 위한 정보-전력 통합 파형 설계 기법인 대역폭 편이 변조(Bandwidth Shift Keying, BSK)를 제안한다. 기존의 SWIPT 기술이 갖는 하드웨어 복잡도와 전력-정보 성능 트레이드오프 한계를 극복하기 위해, 제안하는 BSK는 펄스 폭 변조를 통해 신호의 대역폭을 가변하는 동시에 높은 PAPR 특성을 유지한다. 이는 레테나의 정류 다이오드 비선형성을 극대화함으로써 에너지 수확 효율을 크게 향상시킨다. 또한, 제안 기법은 물리적 신호 분할이 없는 통합 수신기(Integrated Receiver) 구조를 기반으로 초저전력 비동기(Non-coherent) 정보 복조가 가능함을 시뮬레이션을 통해 입증한다.

I. 서론

사물인터넷(IoT) 기술은 스마트 시티와 홈 네트워크를 넘어 해양, 극지방, 재난 현장 등 기반 시설이 부재한 극한 환경으로 그 적용 범위를 넓혀가고 있다 [1-2]. 특히, 북극항로의 안전 운항을 위한 스마트 항로 표시 시스템 등에서 IoT 센서의 역할이 필수적이나, 북극 환경은 극한저온에 의한 배터리 성능 저하와 물리적 접근 불가로 인해 유지보수가 매우 어렵다. 따라서 배터리 교체 없이 무선 신호로부터 에너지를 수확하여 반영구적 동작을 가능케 할 에너지 자립형 IoT 네트워크 기술이 절실히 요구된다. 무선 정보 및 전력 동시 전송(SWIPT) 기술은 이러한 문제를 해결할 유력한 대안으로 주목받고 있으나, 기존의 전력 및 정보의 분할 수신구조는 하드웨어 복잡도와 정보-전력 성능 간의 트레이드오프 문제를 야기한다. 또한 연속파(CW)나 기존 통신 파형은 전력수신기(렉테나)의 정류 다이오드가 갖는 비선형성을 고려하지 않고 설계되어, 정보전송시 에너지 수확효율의 극대화가 어렵다는 구조적 한계를 갖는다.

본 연구에서는 높은 Peak-to-Average Power Ratio(PAPR)를 갖는 파형이 정류기의 비선형성을 활용해 에너지 수확효율을 극대화 한다는 점을 기반으로[3], 새로운 SWIPT 신호 설계 및 변조 방식인 대역폭 편이 변조(Bandwidth Shift Keying, BSK) 기법을 제안한다. BSK는 펄스 폭 제어를 통해 높은 PAPR을 유지하면서 신호의 대역폭을 가변적으로 변조한다. 이는 고효율 전력 수신뿐만 아니라, 수신된 신호의 비동기(non-coherent) 복조를 가능하게 하여 초저전력 정보 수신을 동시에 달성한다.

II. 본론

1. 시스템 모델 및 BSK 파형 설계

본 연구에서 제안하는 대역폭 편이 변조(BSK) 시스템은 송신 정보에 따라 펄스 폭(Pulse Width)을 가변하여, 이를 대역폭 차이로 변환하여 전송

하는 방식을 채택한다. BSK 송신 신호 $x(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$x(t) = A \sum_{k=-\infty}^{\infty} p\left(\frac{t-kT_s}{\tau_k}\right) \cos(2\pi f_c t) \quad (1)$$

여기서 A 는 진폭, T_s 는 심볼 주기, f_c 는 캐리어 주파수를 의미하며, $p(t)$ 는 단위 진폭 직사각형 펄스 함수이다. τ_k 는 k 번째 심볼에 대응하는 펄스 폭을 의미한다. 이진 변조를 가정할 때, 심볼 '0'과 '1'은 각각 서로 다른 펄스 폭 $\tau_{k,0}$ 과 $\tau_{k,1}$ ($\tau_{k,0} < \tau_{k,1}$)으로 매핑된다. 두 심볼은 서로 다른 대역폭을 형성하며, 이러한 스펙트럼 특성의 차이는 복잡한 위상 동기화 없이 신호를 구분할 수 있는 비동기(Non-coherent) 복조의 기반이 된다. 이를 통해 저전력 소모로 정보 수신에 가능한 수신기를 설계할 수 있다.

또한 BSK 파형 설계의 핵심 목표는 저전력 정보 수신에 더해 전력 전송 효율 향상을 통해 정보-전력 전송 성능 (R-E region)을 확장하는 것이다. BSK 신호는 매핑된 펄스폭 동안만 신호가 존재하므로, 신호의 PAPR이 동일한 평균전력의 CW나 기존 변조 신호 대비 높다. 이러한 피크 특성은 레테나 정류 소자의 비선형 영역을 효과적으로 활성화하여 저전력 구간에서 RF-to-DC 변환 효율을 극대화함으로써 전력 전송 효율을 향상시킨다.

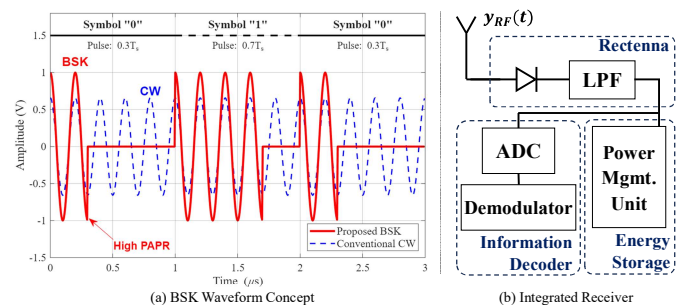


Fig. 1. BSK 시스템의 파형 설계 및 통합 수신기 구조.

BSK 신호에 포함된 전력과 정보를 동시에 수신하기 위한 통합 수신기(Integrated Receiver) 구조는 기존 SWIPT의 시간 또는 전력 분할 수신기와 차별화된다. Fig. 1과 같이 제안하는 수신기는 수신 신호를 전력 분배기나 스위치 없이 단일 경로를 통해 정류기로 직접 인가한다. 정류된 신호는 평활회로를 거쳐 DC로 변환되어 에너지 저장소로 전달됨과 동시에, 병렬 경로를 통해 Envelope의 전압 정보가 ADC로 입력되어 디지털화된다. 다이오드와 LPF를 통과한 신호는 기저대역 펄스 파형의 형태로, 이를 통해 수신기는 추가적인 RF 체인 없이 정류된 파형의 스펙트럼 특성을 분석하여 심볼을 검출한다.

2. 성능분석

제안하는 BSK 기법의 성능 검증을 위해 OrCAD PSpice 회로 시뮬레이터와 MATLAB을 연동한 모의실험을 수행하였다. 락테나 회로는 중심주파수 915MHz 대역에서 동작하며 저전력 특성이 우수한 SMS-7630 쇼트키 다이오드를 기반으로 설계되었다. 공정한 비교를 위해 가장 일반적 조건(CW, -20 dBm) 기준으로 임피던스 매칭 네트워크를 최적화하였다.

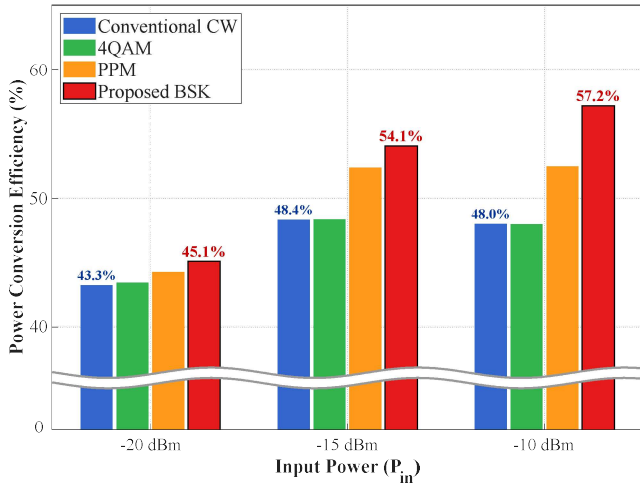


Fig. 2. 입력전력에 따른 변조 방식별 전력 변환 효율 비교.

Fig. 2는 에너지 자립형 IoT 센서노드의 주된 동작범위인 -20 dBm에서 -10 dBm에 이르는 구간에서의 전력 변환 효율 비교 결과를 나타낸다. 비교대상으로 연속파(CW), 4-QAM과 같은 기존의 신호들에 더해 WPT 효율개선과 통합수신기 적용을 위해 기 제안된 바 있는 MPPM 신호[4]를 선정하여 전력 수신 효율을 비교 평가하였다. 실험 결과, 제안하는 BSK 신호는 모든 입력전력 조건에서 가장 우수한 전력 변환 효율을 나타내었고, 특히 -10 dBm 입력시 CW 신호 대비 9 % 포인트 이상의 효율 향상을 확인하였다. 이는 BSK 신호의 높은 PAPR 특성이 저전력 영역에서 다이오드 문턱 전압 장벽을 효과적으로 극복함으로써 정류 효율을 극대화했기 때문이다. 또한, 높은 PAPR을 갖도록 설계된 기존의 PPM과 비교해서도 BSK가 더 우수한 효율을 달성함을 확인함으로써, 제안하는 파형 설계가 전력 전송 측면에서 매우 효과적인 기법임을 입증한다.

정보 수신 성능을 평가하기 위한 초기 단계 시뮬레이션 결과를 Fig. 3에 제시한다. 선행연구[5]에서 제안된 수신방식을 바탕으로, 디지털화된 기저대역 파형의 스펙트럼 형상을 기반으로 한 상관도 비교 수신기를 이용해 성능을 평가하였다. 이 기법은 복잡한 CSI 추정이나 등화기 없이도 페이딩 환경에 강인한 특성을 가진다. 실험 결과 등화기 부재 시 성능이 급격히 열화되는 Coherent 수신기와 달리, 제안 기법은 유효한 BER 성능을 확보함을 확인하였다. 이를 통해 본 연구는 BSK 기반의 저전력·저복잡도 IoT 센서노드 구현에 대한 높은 실현 가능성을 입증한다.

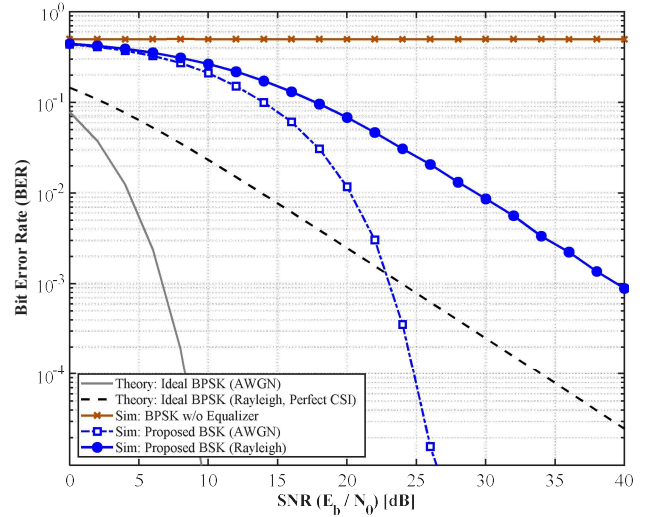


Fig. 3. 제안하는 BSK와 기존 방식의 정보 수신 성능 비교 (초기결과).

III. 결 론

본 논문에서는 에너지 자립형 IoT를 위한 BSK 기반 SWIPT 시스템 및 통합 수신기를 제안하였다. 제안하는 BSK 파형은 높은 PAPR 특성을 통해 저전력 구간에서 높은 전력 변환 효율 향상을 달성하였으며, 스펙트럼 상관 기반의 비동기 수신 구조를 적용하여 등화기 없이도 페이딩 환경에서 강인한 통신 성능을 입증하였다. 이는 하드웨어 복잡도를 최소화하면서 정보와 전력 전송 효율을 동시에 극대화하여, 차세대 저전력 IoT 센서 네트워크를 위한 실효적 솔루션이 될 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] S. Aslam, M. P. Michaelides and H. Herodotou, "Internet of Ships: A Survey on Architectures, Emerging Applications, and Challenges," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 10, pp. 9714-9727, Oct. 2020.
- [2] A. S. Nandan, S. Singh, A. Malik and R. Kumar, "A Green Data Collection & Transmission Method for IoT-Based WSN in Disaster Management," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 22, pp. 25912-25921, 15 Nov.15, 2021.
- [3] B. Clerckx and E. Bayguzina, "Waveform Design for Wireless Power Transfer," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 23, pp. 6313-6328, 1 Dec.1, 2016.
- [4] J. Kim and B. Clerckx, "Wireless Information and Power Transfer for IoT: Pulse Position Modulation, Integrated Receiver, and Experimental Validation," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 14, pp. 12378-12394, 15 July15, 2022.
- [5] Y. Kim, S. Kang, S. Jang, J. Park and J. Kim, "A Study on the non-coherent Detection of Pulse Width Modulation for Low-Power IoT Systems," in *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, Gyeongju, 2025, pp. 1222-1223.