

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. 듀티사이클이 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.

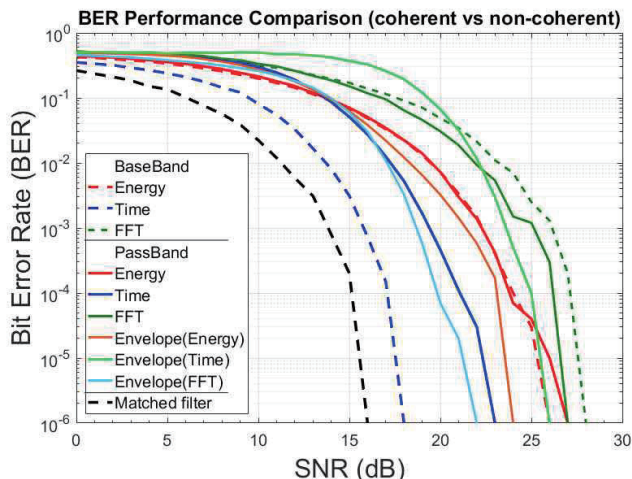


Figure.2 coherent vs non-coherent수신기별 SNR대비 BER값 비교 시뮬레이션 결과, 비동기식 수신기들은 구조적 특성에 따라 상이한 성능 경향을 보였다. 가장 단순한 에너지 검출기(Energy Detector)는 최소 신뢰 구간(BER = 10^{-5}) 기준 약 14 dB 및 15 dB 부근에서 성능 한계를 나타내었으며, 시간 검출기(Time Detector)와 포락선 기반 시간 검출기(Envelope(Time))는 듀티사이클 차이를 직접 활용함으로써 에너지 검출 대비 약 2-3 dB 개선된 SNR 성능을 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 직접 적용하기에 현저한 성능열화가 존재한다. 허나, 본 연구는 저전력 IoT시스템과 무선 전력전송을 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 제한 될 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 듀티사이클 차이에 따른 에너지, 시간, 주파수 특성을 검출함으로써 안정적인 데이터 복원이 가능함을 확인하였다. 본문의 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 SWIPT기술과의 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 심도깊게 고려될 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] Haxhibegiri 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.