

# IoT 시스템을 위한 868/915 MHz LR-WPAN 송수신기의 구현

## Implementation of 868/915 MHz LR-WPAN Transceiver for IoT Systems

이종배\*, 이성수\*  
Jong-Bae Lee\*, Seongsoo Lee\*\*

### Abstract

In this paper, an IEEE 802.15.4 LR-WPAN 868/915 MHz ZigBee transceiver for IoT systems was designed and implemented. Non-coherent demodulation was exploited to satisfy  $\pm 80$  ppm frequency offset recommended in IEEE 802.15.4 LR-WPAN. Variable bitrate was supported according to operation modes. SPI module was embedded to connect various MCUs. The designed Zigbee transceiver was described in Verilog HDL and it was synthesized and verified in 0.18  $\mu\text{m}$  process. Its gate count was about 32,000 gates.

### 요약

본 논문에서는 IoT 시스템을 위한 IEEE 802.15.4 LR-WPAN 868/915 MHz 대역 ZigBee 송수신기를 설계하고 구현하였다. IEEE 802.15.4 LR-WPAN에서 권고하는  $\pm 80$  ppm의 주파수 오프셋에서도 동작이 가능한 비간섭성 방식의 복조 알고리즘을 적용하였으며, 모드에 따라 가변 데이터 전송률을 지원하도록 구현하였다. 또한 SPI 통신 모듈을 탑재하여 다양한 MCU에 연결하여 사용이 가능하다. 설계된 ZigBee 송수신기는 Verilog HDL로 기술하고 0.18  $\mu\text{m}$  공정에서 합성 및 검증하였으며 게이트 수는 약 32,000 게이트였다.

*Key words* : LR-WPAN, IEEE 802.15.4, ZigBee, Transceiver, IoT

\* School of Electronic Engineering, Soongsil University,  
sslee@ssu.ac.kr, 02-820-0692

★ Corresponding author

※ Acknowledgment

“This research was supported by Industrial Core Technology Development Program (10049095), Industrial Core Technology Development Program (10052009), and System IC Commercialization R&BD Program (10049498) funded by the Ministry of Trade, industry & Energy.”

Manuscript received Mar 16, 2016; accepted Mar 21, 2016

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

최근 사물 인터넷 IoT(internet of things)이 대두되고 있다. IoT의 특성상 무선 데이터 전송에 대한 수요가 증가하고 있으며, 한번 설치하면 오랜 시간 동안 동작해야 하는 IoT의 특성상 소형, 저가, 저전력으로 구현되어야 한다. 이러한 조건을 만족하며 사물 인터넷에 적용 될 수 있는 무선 통신 표준으로 IEEE 802.15.1(bluetooth)[1]와 IEEE 802.15.4 WPAN(wireless personal area networks)[2][3]이 있다. IEEE 802.15.4 WPAN은 IEEE 802.15.1에 비해 소형, 저가, 저전력의 특성을 가지고 있어 IoT시스템에 보다 적합한 시스템

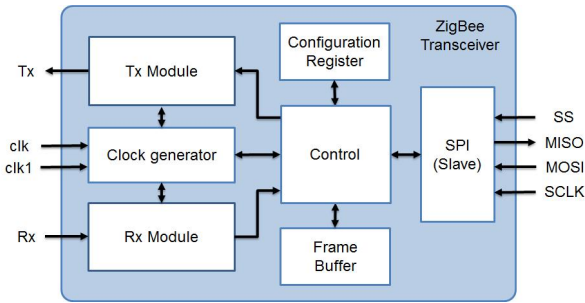


Fig. 1. Transceiver block diagram  
 그림 1. 송수신기 블록 다이어그램

Preamble (all-zero 32bit)	SFD (10100111)	Framelength (7 bit)	Reserve (1 bit)	PSDU (160 bit)
------------------------------	-------------------	------------------------	--------------------	-------------------

Fig. 2. Packet structure  
 그림 2. 패킷 구조

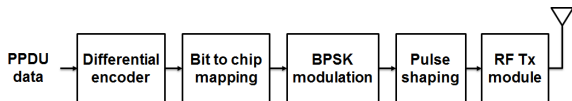


Fig. 3. Transmitter block diagram  
 그림 3. 송신기 구조

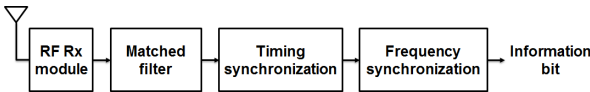


Fig. 4. Receiver block diagram  
 그림 4. 수신기 구조

이다. 본 논문에서는 IEEE 802.15.4 LR-WPAN 규격 중 868/915 MHz 대역 ZigBee 송수신기를 구현하였다. 수신기에는 non-coherent 방식의 복조 알고리즘을 적용하였으며, 모드에 따라 가변 데이터 전송률을 지원하도록 구현하였다. 또한 다양한 MCU와 호환할 수 있도록 SPI 통신 모듈을 탑재하여 범용성을 높였다.

## II. 송수신기 구현

### 1. 송신기

본 논문에서 구현한 IEEE 802.15.4 송수신기의 구조는 그림 1과 같다. IEEE 802.15.4 물리 계층의 패킷의 구성은 그림 2와 같이 동기를 위한 preamble 구간, 패킷의 시작을 알리는 SFD(start of frame delimiter)구간, PSDU의 길이를 나타내는 frame length 구간, 가변 길이로서 실질적인 데이터를 나타내는 PSDU로 구성되며, 검증에 사

용한 PSDU는 20 바이트(=160 비트)로 진행하였다. 송신기는 IEEE 802.15.4 표준의 868/915 MHz 대역 물리 계층 사양서[3]를 참조하여 그림 3과 같이 구현하였다. 데이터 symbol encoding을 위해 differential encoding 기법을 사용하고 DSSS 방식으로 chip modulation을 수행하였다. 각각의 chip을 BPSK방식으로 변조시킨 후 roll-off factor가 1인 raised cosine pulse 형태로 pulse shaping 되고 4배 over-sampling 되어 전송되어진다.

### 2. 수신기

수신기의 구조는 그림 4와 같다. matched filter 블록은 노이즈가 더해져서 수신되어 오는 신호를 SNR(signal to noise ratio)을 최대가 되게 하여 노이즈가 더해져도 신호를 판별할 수 있게 한다. timing synchronization 블록은 입력 신호에서 preamble 신호를 찾기 위해 auto correlation function을 이용하였으며, preamble 신호의 처음 시작점을 찾기 위해 cross correlation function을 이용하였다[4].

IEEE 802.15.4 규격에서는 오실레이터의 정확도를 ±40 ppm로 권고하고 있으며, 이는 송수신단을 모두 고려하였을 경우 최대 ±80 ppm(196 KHz)의 큰 주파수 오프셋 환경에서도 안정적으로 동작이 가능해야 한다. 이와 같은 환경에서 안정적으로 동작이 가능하게 하며 수신 데이터를 복원하는 역할을 frequency synchronization 블록에서 수행하고 있다. frequency synchronization 블록에서는 non-coherent 방식을 사용하고, bit-decision을 수행할 때 preamble 신호를 이용하여 계산한 결과 값을 데이터 복원의 계산에 이용하여 bit-decision의 정확도를 높였다[5]. C 언어 시뮬레이션 결과, 이 알고리즘은 위상 오프셋과 주파수 오프셋이 모두 존재할 때와 주파수 오프셋만 존재할 때의 성능차이가 미미하여 위상 오프셋의 영향을 거의 받지 않는 장점이 있다.

### 3. SPI Slave

본 논문에서는 여러 종류의 MCU와 결합하여 사용하기 용이하도록 범용성이 높은 SPI 통신 모듈을 설계하여 탑재하였다[6]. ZigBee 송수신기는 SPI slave로 동작한다. SPI 통신을 수행하기 위

Table 1. Transceiver operating mode[3]

표 1. 송수신기 동작 모드[3]

Mode	Frequency Band (MHz)	Spreading Parameters		Data Parameters		
		Chip rate (kchip/s)	Modulation	Bit rate (kb/s)	Symbols rate (ksymbol/s)	Symbols
0	868-868.6	300	BPSK	20	20	Binary
1	902-928	600	BPSK	40	40	Binary

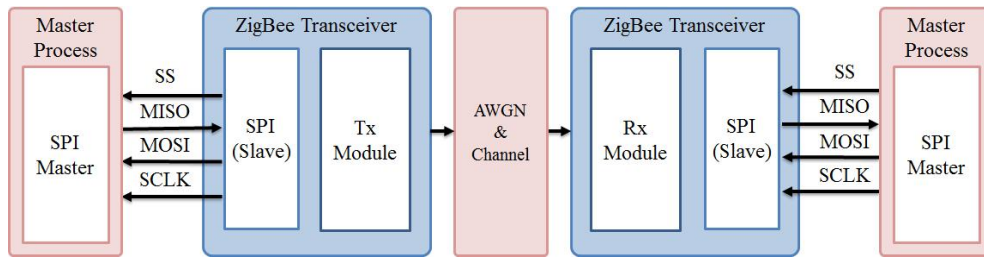


Fig. 5. Simulation environment

그림 5 시뮬레이션 환경

해서는 master에서 SPI 전송모드 0~3 중 하나를 선택하여야 하며, data order를 MSB first, LSB first 둘 중 하나를 선택하여 통신 환경을 slave와 맞추어 주어야 한다. 본 논문의 SPI slave 모듈은 전송모드 0(CPOL=0, CPHA=0)에서 동작하게 되고 data order는 MSB first 모드로 동작하게 설계되었다.

본 논문에서는 그림 1과 같이 configuration register 블록을 설계하여 표 1의 모드를 선택하여 가변적인 전송률을 지원하도록 하였다. configuration register 블록의 register map에 다른 전송 모드들을 추가 하거나 환경 변수들을 정의해 놓으면 모든 SPI 통신 환경을 지원할 수 있다. 또한 SPI 통신 프로토콜을 자체적으로 개발하여 그림 1의 configuration register와 frame buffer의 접근과 제어 방법을 달리 하였다.

### III. 합성 및 검증 결과

본 논문에서 설계한 ZigBee 송수신기는 IDEC의 설계 도구 지원을 받아 Verilog HDL로 설계하고 Modelsim을 이용하여 검증하였다. 설계된 ZigBee 송수신기의 동작을 검증하기 위해 그림 5의 적색 블록으로 표시된 마스터 프로세서와 전송 채널 모델을 Verilog HDL로 모델링한 후, 이를 그림 5의 청색 블록으로 표시된 ZigBee 송

수신기와 통합하여 검증하였다.

검증에 필요한 모든 계수 값과 데이터 값은 fixed point 형식으로 C 언어 모델에서 추출하여 사용하여 진행하였으며, 송수신기에서 전송한 데이터가 전송 채널을 거쳐 수신기에서 정상적으로 복원되는 것을 확인할 수 있었다.

구현한 송수신기는 0.18  $\mu\text{m}$  공정에서 Design Vision을 사용하여 합성하였으며, 게이트 수는 약 32,000 게이트였다.

### IV. 결론

본 논문에서는 IoT 시스템 적용에 적합한 IEEE 802.15.4 868/915 MHz 대역 ZigBee 송수신기를 구현하였다. non-coherent 방식의 복조 알고리즘을 적용하여 최대  $\pm 80$  ppm의 주파수 오프셋 환경에서도 안정적으로 동작이 가능하도록 하였으며 다양한 MCU와 호환이 가능하도록 SPI 통신 모듈을 탑재하였다. 0.18  $\mu\text{m}$  공정에서 합성하고 검증하였으며, 게이트 수는 약 32,000 게이트였다.

## References

- [1] Dong-Hoon Lee and Chung-Heon Lee, "The Development of a Bluetooth Based Portable Wireless EEG Measurement Device", *Journal of IKEEE*, vol. 14. no. 2, pp. 16-23, Jul. 2010.
- [2] Injun Choi, Jong-Yeol Lee, and Ji-Hoon Kim, "Design of Low-Complexity 128-Bit AES-CCM IP for IEEE 802.15.4-Compatible WPAN Devices", *Journal of IKEEE*, vol. 19. no. 1, pp. 45-51, Mar. 2015.
- [3] IEEE Standard for Information Technology – Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE Standard 802.15.4-2006, 2006.
- [4] In-Chang Go, "Implementation of Digital Modem for Sensor Network System Using the OQPSK Modulation", Master Thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2014.
- [5] Hyeon-Jin Jeon et al., "IEEE 802.15.4 BPSK Receiver Architecture Based on a New Efficient Detection Scheme", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 58, no. 9, pp. 4711-4719, Sep. 2010.
- [6] F. Leens, "An Introduction to I2C and SPI Protocols", *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 12, no 1, pp. 8-13, Feb. 2009.

## BIOGRAPHY

### Jong-Bae Lee (Member)



2011 : BS degree in Electronic Engineering, Hanseo University.  
2014 : MS degree in Electronic Engineering, Soongsil University.  
2014~Now : Ph.D candidate in Electronic Engineering, Soongsil

University

<Main Interest> HEVC, Low-Power SoC, Automotive SoC, Battery Management

### Seong-soo Lee (Life Member)



1991: BS degree in Electronic Engineering, Seoul National University.  
1993: MS degree in Electronic Engineering, Seoul National University.

1998: PhD degree in Electrical Engineering, Seoul National University.

1998~2000: Research Associate, University of Tokyo.

2000~2002: Research Professor, Ewha Womans University.

2002~Now: Professor in School of Electronic Engineering, Soongsil University.

<Main Interest> HEVC, Low-Power SoC, Automotive SoC, Battery Management