

USRP와 GNU Radio를 이용한 IEEE 802.15.4 물리 계층 소프트웨어 라디오 시스템 구현

Implementation of Software Radio System for IEEE 802.15.4 Physical Layer Using USRP and GNU Radio

박 대 현 · 김 영 식

Dae-Hyeon Park · Young-Sik Kim

요 약

본 논문은 소프트웨어 라디오 범용 하드웨어인 USRP(Universal Software Radio Peripheral) 보드와 오픈 소스 소프트웨어 라디오 개발 킷인 GNU Radio 패키지를 사용하여 저속, 저전력 무선 표준인 IEEE 802.15.4 표준의 물리 계층을 구현하였다. 본 논문에서 구현한 소프트웨어 라디오 시스템은 IEEE 802.15.4 물리 계층 중 868/915 MHz 대역의 BPSK와 OQPSK 변조 방식의 송수신 물리 계층과 2.45 GHz 대역의 OQPSK 변조 방식의 물리 계층을 지원하도록 구현하였다. 또한, 구현된 소프트웨어 라디오의 시스템의 검증을 위해, 각 주파수 대역과 변조 방식을 표준에 정의된 대역 특성, 패킷 구조에 맞추어 설정하고, 송수신 테스트를 수행하였으며, 특히 2.4 GHz 대역은 CC2430 모듈과 Smart RF EV 보드를 이용하여 정상 동작을 확인하였다. 그리고 시스템의 성능은 송신 신호의 PSD 마스크 조건과 수신 상태의 아이 패턴, PER(패킷 에러율) 테스트 결과로 구현한 시스템의 성능을 검증하였다. 그 결과, 구현한 시스템이 IEEE 802.15.4 물리 계층 표준에 부합함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a software radio system, supporting the physical layer of IEEE 802.15.4 standard, has been developed using USRP(Universal Software Radio Peripheral) board and GNU Radio package of an open source development kit for software radio. The software radio system supports the standards of BPSK and OQPSK modulations for 868/915 MHz band and OQPSK modulation for 2.45 GHz band. To verify the operation of the developed system, it has been tested under the standard signals according to the frequency band and packet structures for the transmitting and receiving operation. At 2.4 GHz, the Smart RF EV board and CC2430 modules are used to check the proper operation of the software radio system. The system performance test shows that the emission power spectrum, the eye-pattern, and PER(Packet Error Rate) meet the standard. It has been confirmed that the developed system supports the PHY layer of IEEE 802.15.4.

Key words : IEEE 802.15.4, USN, SDR, USRP, GNU Radio

I. 서 론

USN(Ubiquitous Sensor Network)은 물류와 건물 관

리 및 환경 관리, 홈 오토메이션 등 다양한 응용 분야에서 도입되고 있다. 그리고 USN을 포함하는 IEEE 802.15 WPAN(Wireless Personal Area Network) 그룹

「본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구 결과임.」

한동대학교 정보통신공학과(Department of Information Communication Engineering, Handong Global University)

· 논문 번호 : 20100517-063

· 교신저자 : 김영식(e-mail : young@handong.edu)

· 수정완료일자 : 2010년 9월 30일

은 통신의 물리 계층과 MAC 계층의 표준을 준수하도록 되어 있다. IEEE 802.15.4 표준에서는 2.4 GHz 대역에 16개 채널, 915 MHz 대역에 10개 채널, 868 MHz 대역에 1개의 채널을 정의하고 있으며, BPSK와 OQPSK 변조 방식을 지원하고 있다^[1]. 현재까지 센서 네트워크를 지원하는 다양한 지그 비용 시스템 칩이 개발되어 있다.

SDR(Software Defined Radio)은 Software Communication Architecture(SCA)와 군사용으로 개발되고 있는 JTRS(Joint Tactical Radio System), Cognitive Radio 등 다양하게 연구되고 있다.

소프트웨어 라디오의 범용 하드웨어 장비로 사용되고 있는 USRP는 DAC(Digital to Analog Converter), ADC(Analog to Digital Converter), DUC(Digital Up Converter), DDC(Digital Down Converter)로 구성되어 있으며, RF 신호의 송신 및 수신을 하고, 기저 대역의 신호를 IF 대역 또는 RF 대역으로 변환하거나, 이와 반대로 RF 또는 IF 대역의 신호를 기저 대역의 데이터로 변환하는 기능을 수행한다^[2].

GNU Radio는 오픈 소스 기반의 소프트웨어 라디오 개발 툴킷이다. 이는 소프트웨어 라디오 개발에 필요한 모듈을 제공한다. GNU Radio가 제공하는 모듈은 런 타임(run time) 모듈, 신호 처리 모듈, GUI(Graphic User Interface) 모듈, 입력 및 출력(I/O) 모듈 등이 있다. 소프트웨어 모뎀은 GNU Radio가 제공하는 모듈을 이용하여 개발할 수 있다. 또한, GNU Radio가 제공하지 않는 모듈은 직접 제작하여 추가할 수 있다^[3].

IEEE 802.15.4는 2.45 GHz, 868/915 MHz 두 대역에서의 물리 계층 표준이 정의되어 있다. 2.45 GHz 대역에서는 OQPSK 방식으로 변복조를 하며, 915 MHz와 868 MHz 대역에서는 BPSK 방식을 사용한다. 그리고 915 MHz와 868 MHz 대역에서는 선택사항으로 OQPSK 방식을 사용한다. 그리고 각 모뎀은 심볼을 칩으로 확산하기 위해서 DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) 방식을 사용한다^[1].

본 논문에서는 범용 하드웨어인 Universal Software Radio Peripheral(USRP)와 오픈 소스 기반의 소프트웨어 라디오 개발 툴킷인 GNU Radio를 이용하여, IEEE 802.15.4 물리 계층 표준 중에서 868/915 MHz 대역의 BPSK 변조 방식과 OQPSK 변조 방식 모뎀,

2.45 GHz 대역의 OQPSK 변조 방식 모뎀을 통합하여 구현하였다.

II. 본 론

본 연구에서 구현한 소프트웨어 모뎀은 USRP로부터 획득한 기저 대역의 디지털 신호를 처리하기 위해서 IEEE 802.15.4 표준의 868/915 MHz 대역과 2.45 GHz 물리 계층을 만족하도록 구현하였으며, 구현한 모뎀은 크게 변조부와 복조부로 구분할 수 있다. 변조부와 복조부에는 BPSK, OQPSK 변조, 복조 블록 및 인코딩, 디코딩 블록이 포함되어 있다.

그림 1은 구현된 BPSK 모뎀의 변조부의 구조이다. 변조부는 차동 부호기(differential encoder), bit-to-chip 맵핑 블록(bit-to-chip mapping), BPSK 변조 블록(BPSK modulation)으로 구성되었다. 차동부호기를 통해 NRZ 형태의 신호를 만들고, 부호화 된 비트는 심볼로 변환된다. IEEE 802.15.4 915 MHz 물리 계층은 BPSK 방식을 사용하므로 한 심볼은 한 비트로 표현된다. 심볼은 bit-to-chip 맵핑으로 15칩으로 확산된다. 확산된 각 칩은 BPSK 신호로 변조되며, 변조된 기저 대역의 데이터는 USRP를 이용하여 RF 아날로그 신호로 변환하여 송신한다.

그림 2는 BPSK 모뎀의 복조부의 구성이다. 복조부는 자동 이득 제어(AGC), 클럭 및 위상 복구부(clock & phase recovery), BPSK 복조부(BPSK demodulation), 칩-심볼 변환부(chip-to-symbols conversion), 차동 복호부(differential decoder)로 구성된다. 자동 이득 제어기는 USRP로부터 입력되는 데이터의 크기를 조절한다. 클럭 및 위상 복구부는 코스타스 루프(Costas Loop)^[4]를 이용하여 위상과 주파수의 오차를 추정하고, 그 정보를 이용하여 위상과 주파수를 동기화 한다. 이와 함께 Modified Mueller and Muller 알고리즘^[5]을 이용하여 심볼의 동기를 맞춘다. 동기화된 심볼은 BPSK 복조기를 통해 복조된다. BPSK 복조는 성상(constellation) 심볼과 유클리드 거리를 구하여 최단 거리의 값을 선택하여 BPSK 신호를 선택한다. 복조된 칩은 칩-심볼 변환부를 통해 칩으로 확장하기 전의 비트 데이터를 만든다. 이 데이터는 차동 복호기를 통해 복호되어 원래 송신한 데이터로 복원된다.

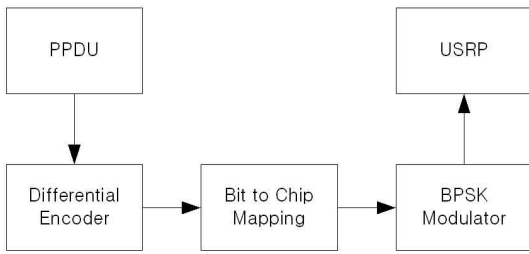


그림 1. 구현된 BPSK 모뎀 변조부 구성
Fig. 1. Block diagram of implemented BPSK modulator.

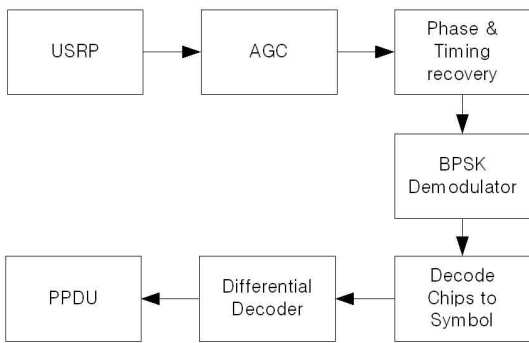


그림 2. 구현된 BPSK 모뎀의 복조부 구성
Fig. 2. Block diagram of implemented BPSK demodulator.

그림 3은 구현한 OQPSK 모뎀의 변조부의 구조이다. OQPSK 모뎀의 변조부는 워드(4bit) 심볼을 칩으로 확산하는 심볼-칩 변환부(symbols-to-chip mapping), QPSK 변조부(QPSK modulator), 쿼드러처 페이즈(quadrature phase)의 신호를 인-페이즈(in-phase) 신호보다 지연시키는 지연 블록(delay)으로 구성되었다. OQPSK 경우 2.45 GHz 대역은 하나의 4비트 심볼을 32칩으로 확산하고, 868/915 MHz 대역은 하나의 4비트 심볼을 16칩으로 확산한다^[1].

그림 4는 구현한 OQPSK 모뎀의 복조부의 구조이다. IEEE 802.15.4의 OQPSK는 half sine pulse shape을 사용한다. 이는 MSK와 동일하다. 본 논문에서는 OQPSK 모뎀의 복조부로 MSK 복조기의 구조를 사용하였다^[4]. 구현한 MSK 복조기는 FM 복조기(FM-demodulator), 주파수 오차와 타이밍 오차를 추정 복구하는 주파수 오차 복구기(frequency offset recovery), 타이밍 복구기(timing recovery), 칩 시퀀스로부터 워드(4 bit) 심볼을 복구하는 칩-심볼 복구기(decode chips-to-symbol)로 구성되었다.

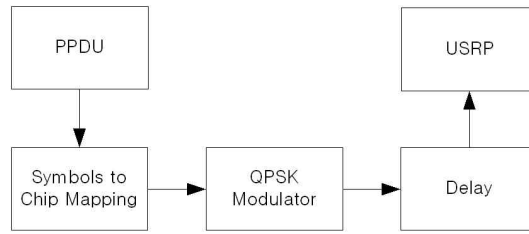


그림 3. 구현된 OQPSK 모뎀 변조부 구성
Fig. 3. Block diagram of implemented OQPSK modulator.

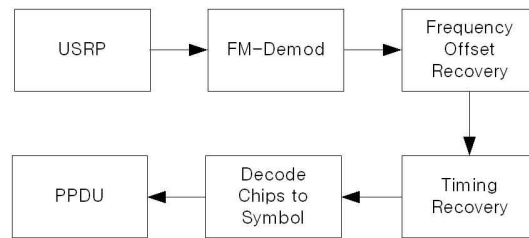


그림 4. 구현된 OQPSK 모뎀 복조부 구성
Fig. 4. Block diagram of implemented OQPSK demodulator.

표 1. 각 대역에 따른 점유 주파수 대역 및 데이터 전송률

Table 1. Occupied frequency band and data rate.

PHY (MHz)	Frequency band (MHz)	Spread parameter		Data parameters		
		Chip rate (kchip/s)	Modulation scheme	Bit rate (kb/s)	Symbol rate(ksymbol/s)	Symbol
868/915	868 ~ 868.6	300	BPSK	20	20	Binary
	902 ~ 928	600	BPSK	40	40	Binary
868/915 (optional)	868 ~ 868.6	400	O-QPSK	100	25	16-ary orthogonal
	902 ~ 928	1,000	O-QPSK	250	62.5	16-ary orthogonal
2,450	2,400 ~ 2,483.5	2,000	O-QPSK	250	62.5	16-ary orthogonal

구현한 모뎀의 각 주파수 대역과 변복조 방식에 따른 점유 주파수 대역 및 데이터 전송률은 표 1과 같다.

III. 실험 및 검증

구현된 모뎀을 검증하기 위해서 그림 5와 같은 하

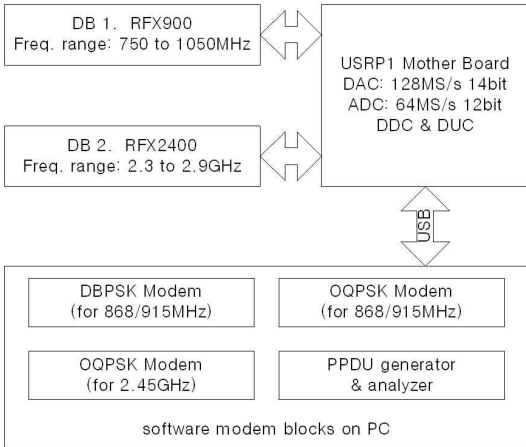


그림 5. 구현된 소프트웨어 라디오 시스템
Fig. 5. Block diagram of implemented software radio system.

나의 소프트웨어 라디오 시스템을 구현하였다. 구현한 시스템은 두 개의 도터 보드(daughter board)와 한 개의 USRP1 보드, 그리고 PC 상에 구현한 소프트웨어 모뎀을 연결하였다. 두 개의 도터 보드는 RF 송수신기이다. 각 보드는 750~1,050 MHz 주파수 대역과, 2.4~2.9 GHz 주파수 대역에서 송수신이 가능한 송수신 보드이다. USRP1 보드는 DAC, ADC, DDC, DUC를 구현하고 있으면, 도터 보드에서 넘어오는 IF 신호를 기저 대역의 디지털 데이터로 변화하거나 그 반대의 동작을 수행한다. USRP1 보드로부터 넘어 오는 기저 대역 데이터는 PC 상에 구현된 소프트웨어 모뎀으로 신호 처리를 하여 신호를 복원하거나, 송신하고자 하는 데이터의 복조를 수행하여 USRP1 보드로 넘겨준다. 소프트웨어 모뎀은 DBPSK, OQPSK 모뎀 블록과 PPDU(Physical Protocol Data Unit) 생성 및 해석 블록이 포함되어 있다.

성능 검증을 위해 먼저 구현한 시스템의 송신 신호가 전송 PSD(Power Spectrum Density)를 만족하는지 확인하였다. IEEE 802.15.4 표준에 1번 채널로 할당된 906 MHz를 송신 주파수로 사용하여 BPSK와 868/915 MHz 대역의 OQPSK 모뎀의 송신 PSD를 측정하였다. 그리고 2.45 GHz 대역의 OQPSK 모뎀의 PSD는 IEEE802.15.4 표준의 11번 채널의 송신 주파수인 2.405 GHz를 사용하여 측정하였다. 그림 6은 868/915 MHz 대역의 BPSK 모뎀의 PSD이고, 그림 7은 868/915 MHz 대역의 OQPSK 모뎀의 PSD이다. 그

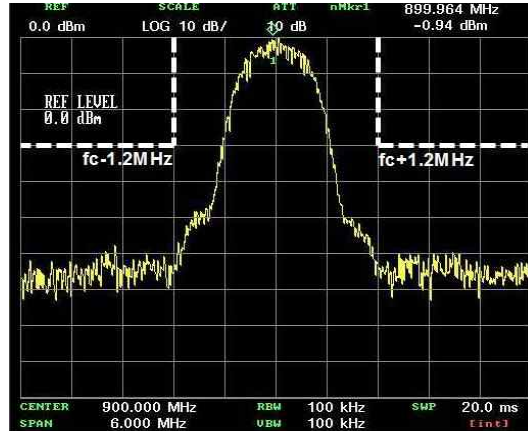


그림 6. 900 MHz에서의 BPSK 송신 신호의 PSD
Fig. 6. PSD of transmitted BPSK signal at 900 MHz band.

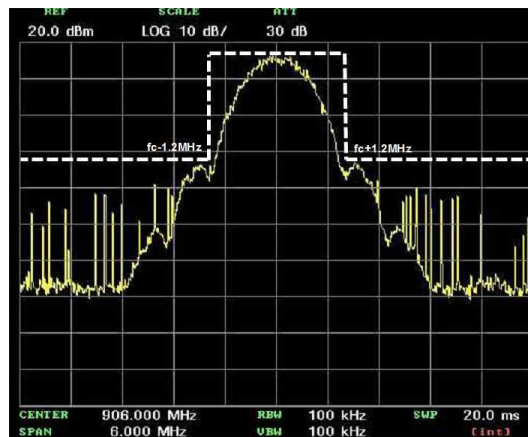


그림 7. 906 MHz에서의 OQPSK 송신 신호의 PSD
Fig. 7. PSD of transmitted OQPSK signal at 906 MHz band.

리고 그림 8은 2.45 GHz 대역의 OQPSK 모뎀의 PSD이다. 각 그림의 흰 점선은 표준에서 요구하는 송출 PSD 마스크를 표시한 것이고, 실선은 송신 신호의 PSD이다. 구현한 시스템을 이용하여 송신한 신호가 표준 PSD 한계를 만족함을 알 수 있다.

구현한 모뎀이 수신 신호를 제대로 복원하는지 검증하기 위하여, 구현한 시스템을 이용하여 송신한 신호를 USRP를 이용하여 수신하고, 수신한 신호의 원자료(raw data)를 컴퓨터에 저장하였다. 컴퓨터에 저장한 원자료를 매트랩으로 분석하여 신호의 수신과 복조가 정확히 되었는지 확인하였다. 그림 9는 BPSK 모뎀 위상 복구 전후의 아이 패턴이고, 그림

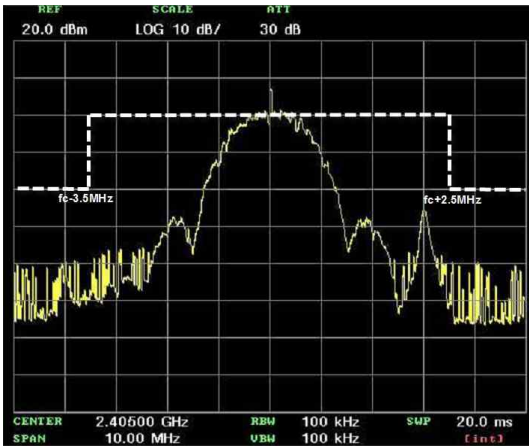


그림 8. 2.405 GHz에서의 OQPSK 송신 신호의 PSD
Fig. 8. PSD of transmitted OQPSK signal at 2.405 GHz band.

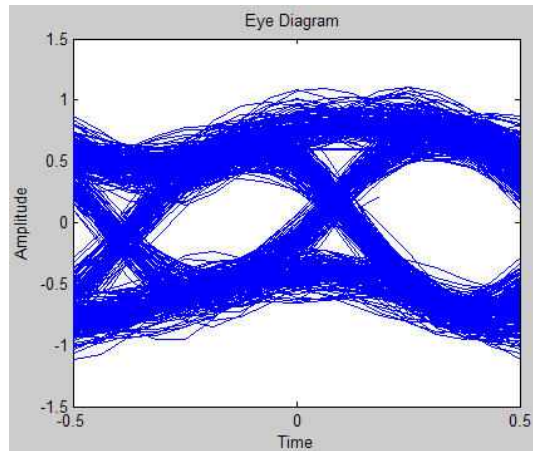


그림 10. OQPSK 아이 패턴
Fig. 10. Eye pattern of OQPSK.

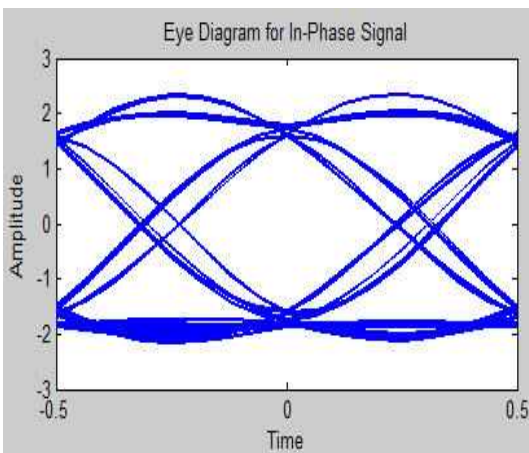


그림 9. BPSK 아이 패턴
Fig. 9. Eye pattern of BPSK.

10은 OQPSK의 아이 패턴의 모습이다. 위상 복구 후 아이가 열림을 확인하였다. OQPSK 경우, 2.4 GHz 대역을 사용하여 실험하였으며, 실험 환경에 존재하는 2.4 GHz 대역 무선기기의 간섭에 의해 아이 패턴의 amplitude fading과 PSD의 spur. 특성이 나타나는 것으로 추정된다. 그러나 실험 결과 간섭이 성능에 큰 영향을 주지는 않았다.

구현한 시스템 전체의 성능 검증을 위하여 두 대의 소프트웨어 라디오 시스템을 이용하여 실제 통신 환경에서 송수신 테스트를 수행하여 PER을 측정하였다. 실험 조건은 20 바이트의 정보를 포함하는 PSDU(Physical Service Data Unit)를 생성하여 전송하

였다. 송수신 노드의 거리는 실험 환경에서 가능한 최대 거리인 5 m로 하였으며, 906 MHz에서 BPSK와 OQPSK 변조 방식으로 검증하였고, 2.405 MHz에서 OQPSK 변조 방식으로 검증을 수행하였다. PER 측정은 칩콘 사의 CC2430과 Smart RF EV 보드를 이용하여 수행하였으며, 측정 결과 각각의 경우 0 %의 PER 성능을 보였다.

실험 결과 구현한 소프트웨어 라디오 시스템의 성능이 IEEE802.15.4 물리 계층 표준을 만족함을 확인하였으며, 상기 표준이 정의하고 있는 대역과 변복조 방식을 사용하는 센서 네트워크의 모니터링이 가능함을 검증하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 저속, 저전력 응용에 사용되는 무선 센서 네트워크 표준인 IEEE 802.15.4 표준에 준하는 868/915 MHz의 BPSK 변조 방식과 868/915 MHz의 선택사항인 OQPSK 변조 방식, 그리고 2.45 GHz 대역의 OQPSK 변조 방식을 지원하는 IEEE802.15.4 물리 계층 소프트웨어 라디오 시스템을 구현하였다. 868/915 MHz와 2.45 GHz 대역의 송수신을 위해 두 개의 RF 송수신 보드를 사용했으면, 기저 대역 데이터 획득을 위해 USRP1 보드를 사용했다. 기저 대역의 신호를 처리하는 소프트웨어 블록은 GNU Radio를 이용하여 PC 상에 구현하였다. 각각을 연결하여 하나의 시스템을 구현하고, 이 시스템의 성능을 검

증하기 위해 PSD 마스크 테스트를 수행하고, Eye-Pattern과 PER를 측정하였다. 또한, 상용 시스템인 CC2430과의 상호 동작 시험도 수행하여 구현한 시스템이 IEEE802.15.4 물리 계층을 만족함을 검증하였다. 본 연구에서 소프트웨어 라디오 시스템을 이용하여 IEEE802.15.4에서 정의한 다양한 물리 계층에 대응할 수 있는 시스템을 개발함으로써, 향후 소프트웨어 라디오 기술을 다양한 센서 네트워크의 구현과 네트워크 모니터링 및 디버깅 등에 활용할 수 있도록 하였다.

참 고 문 헌

[1] Sinem Coleri Ergen, "ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary"(www.sinemergen.com/zigbee.pdf).
 [2] Firas Abbas Hamaza, "The USRP under 1.5 X

magnifying lens!".

[3] GNU Radio Web page(<http://gnuradio.org/trac>)
 [4] John G. Proakis, *Digital Communications*, Fourth Edition, pp. 356-357, McGraw-Hill.
 [5] G. R. Danesfahani, T. G. Jeans, "Optimisation of modified Mueller and Muller algorithm", *Electronics Letters*, vol. 31, no. 13, pp. 1032-1033, Jun. 1995.
 [6] IEEE 802.15 WPAN Task Group 4 (<http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>), [Online]. Available: <http://w2.cadence.com/whitepapers/CMOSRFICArchforIEEE80215.pdf>
 [7] J. Notor, A. Caviglia, and G. Levy, "CMOS RFIC architectures for IEEE 802.15.4 networks", Cadence Design Systems, Inc., 2003.

박 대 현



2007년 8월: 한동대학교 전산전자공학과 (공학사)
 2010년 2월: 한동대학교 정보통신공학과 (공학석사)
 2010년 2월~5월: 한동대학교 정보통신기술연구소 연구원
 [주 관심분야] RF/아날로그, SDR,

신호 처리, 센서 네트워크 개발, RFID, 무선 통신용 모듈 설계

김 영 식



1993년: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
 1995년: 포항공과대학교 초고주파공학과 (공학석사)
 1999년: 포항공과대학교 초고주파공학과 (공학박사)
 1999년~현재: 한동대학교 전산전자공학부 교수

[주 관심분야] 초고주파 회로 설계, 센서 네트워크 개발, RFID, 무선 송수신용 RF/Analog IC 설계, 무선 통신용 모듈 설계