

국부발진기 안정도를 고려한 저전력 근거리 RF 시스템 설계에 관한 연구

김정욱*, 김성욱*, 이석재*, 이대웅**, 안달**, 안진호***, 한상민^o

A Study of Low-Power Short-Range RF System Design Based on Local Oscillator Stability Consideration

Jung Ouk Kim*, Sung Ouk Kim*, Seok-Jae Lee*, Dae Woong Lee**, Dal Ahn**,
Jin-Ho Ahn***, Sang-Min Han^o

요약

본 논문에서는 RF 시스템의 복잡도와 전력 소모 증가, 추가 제어신호가 요구되는 위상고정루프(PLL)를 사용하지 않는 국부발진기 구조의 RF 시스템을 제안하였다. IoT 센서를 배터리 수명 동안 장시간 사용하기 위해 소형, 저가, 저전력의 RF 시스템 설계가 요구된다. PLL을 사용하지 않아 발생하는 국부발진기의 주파수 변동성을 고려하여 기저대역의 수신기 대역폭을 설정하여 이에 적합한 저역통과여파기를 설계하였다. 제안된 시스템의 성능 평가를 위해 디지털 신호의 복원 능력을 측정하였으며, 국부발진기의 주파수 불안정 요인인 온도, 동일체열 간섭 상황에 따른 수신 한계에서 양호한 수신 성능을 확인하였다. 제안된 비PLL RF 구조에 필요한 설계 고려사항을 제시함으로써 소형, 저전력 IoT 센서 시스템에 적용 가능한 RF시스템 구조임을 확인하였다.

Key Words : Internet of Things (IoT), local oscillator, phase-locked loops, RF systems, stability

ABSTRACT

In this paper, an RF system architecture is proposed with a local oscillator (LO) without the phase locked loop (PLL) that requires high complexity, high power consumption, and external control signals. In order to use IoT sensor systems during a full battery life-cycle, compact, low-cost, and low-powered RF system should be designed. The reception baseband bandwidth is designed under consideration of frequency variation at an LO due to non-PLL configuration. Moreover, the complementary lowpass filter is designed. To evaluate the proposed system performance, the digital data is transmitted and recovered with good performance for the various LO frequency variation range such as temperature, and a co-channel interferer. The proposed non-PLL configuration is verified as an appropriate RF system architecture for compact and low-powered IoT sensor systems based on the presented design considerations.

* 본 연구는 순천향대학교와 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2015R1D1A3A 01016567)과 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학ICT연구센터육성 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2017-2015-0-00403).

^o First Author : Soonchunhyang Univ., Dept. Information & Communication Eng., ouk7679@gmail.co.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : Soonchunhyang Univ., Dept. Information & Communication Eng., smhan@sch.ac.kr, 정회원

* Soonchunhyang Univ., Dept. Information & Communication Eng.

** Soonchunhyang Univ., Dept. Electrical Eng.

*** Hoseo Univ., School of Electronics & Display Eng.

논문번호 : KICS2017-04-107, Received April 11, 2017; Revised June 27, 2017; Accepted July 24, 2017

I. 서 론

최근 무선 통신 시스템의 화두는 5G를 위한 고속, 광대역, 저지연 통신과 근거리 무선 접속을 통한 실생활 초연결 기술을 들 수 있다. 이들 무선 연결 기술은 모든 기기의 연결을 뜻하는 IoE (Internet of Everything) 또는 IoT (Internet of Things) 기술로 대변되고 있다^[1,2]. 이를 위해 이동 중인 디바이스에 무선으로 전기 에너지를 전달하는 무선전력전송 기술 및 저전력 회로 기술은 근거리 무선 센서 네트워크 (WSN: Wireless Sensor Network)의 실현을 위한 기반 기술로 다양한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 저전력 기반의 센서 네트워크는 작고 값싼 스마트 센서를 활용한 환경 모니터링, 헬스케어, 보안 및 감시 등 여러 가지 분야로 응용되고 있다^[3]. 무선 센서 네트워크는 센서 노드와 싱크 노드들로 구성되어 있으며 센서 노드는 온도, 소리, 진동 등의 외부 환경조건들을 수집한 후 싱크 노드로 전송하는 역할을 한다^[4]. 따라서 데이터를 수집하고 전송하는 센서 노드는 한번 설치되면 장시간 사용이 가능하여야 하며, 때로는 배터리 수명만큼 사용되고 폐기되는 일회용 디바이스로 설계되어 진다^[5,6]. 따라서 이들 센서 노드의 통신 시스템은 초저전력, 저가격, 소형화 등의 설계 요구 사항을 포함하고 있다^[6,7].

통신 시스템에서 전력 효율이 낮은 RF 시스템의 저전력화 방법은 크게 시스템 구조의 개선에 의한 방법^[8,9]과 회로 설계의 저전력화, 그리고 공정 프로세스의 down scaling을 들 수 있다. 이들 중 공정 프로세스의 개선은 많은 비용과 시간이 소요되는 과정이며, 회로 설계의 저전력화는 일정 부분 한계점을 가지고 있다. 이에 반해 시스템 구조 개선에 의한 방법은 통신 응용 범위에 맞추어 설계할 경우 비교적 효율적인 RF 시스템을 설계할 수 있다.

본 논문에서는 저전력 WSN에 활용할 수 있는 센서 수신기 시스템의 구조 개선을 통한 RF 시스템의 복잡도 개선 및 저전력 설계 방법을 제안하고자 한다. 제안된 RF 시스템은 저전력 센서 수신기 응용을 전제로 하고 저가격, 낮은 통신 신뢰도 및 매우 긴 배터리 사용 기간, 저전력 회로 등을 특징으로 하는 일회용 센서 디바이스 응용을 목표로 하였다. 이를 위해 위상 고정루프 (PLL: Phase Locked Loop)를 사용하지 않는 국부 발진기를 사용하는 low-IF direct conversion 수신기의 통신 신뢰성을 분석하였으며, 이를 실험적으로 검증하였다.

본 논문의 구성은 제1장 서론에 이어 제2장에서 제

안된 RF 수신기 시스템 구조를 설명하고, 제3장에서는 국부 발진기 (LO: Local Oscillator) 변동성을 고려한 수신기 규격 설계를 제시하였으며, 제4장에서는 전체 수신기 시스템의 성능을 다양한 환경에서 비교 평가 실험을 수행하였으며, 제5장에서는 결론을 맺었다.

II. 제안된 수신기 시스템 구조 및 특성

일반적인 RF 수신기 시스템은 수신 안테나, 대역통과여파기 또는 듀플렉서, 저잡음 증폭기(LNA: Low Noise Amplifier), 혼합기 (Mixer), 국부 발진기, 채널여파기, 가변 이득 증폭기, 복조부 등으로 구성된다. 이들 부품들은 수신된 채널의 신호를 적절한 주파수와 대역폭, 신호 레벨로 A/D (Analog to Digital Converter)에 전달하는 역할을 한다. 따라서 모든 부품과 파트가 자기 필수적 혹은 보조적인 역할을 수행하고 있다.

본 논문에서는 RF 시스템의 복잡도와 전력 소모의 단점을 보완하기 위해 기존의 수신기에서 PLL을 제거한 근거리 저전력 RF 수신기 시스템을 설계·구현하였다. PLL을 사용한 수신기는 LO 신호의 주파수와 위상을 고정시켜주는 반면, Non-PLL의 경우 수신 주파수 범위의 오차가 발생하게 된다. 따라서 주파수 변화에도 수신 가능한 non-coherent 방식의 수신기에서 주파수 변동성에 대한 고려 사항을 제시할 예정이며, 이에 따른 변동성 마진 등을 제시하게 된다. 제안된 수신기의 시스템 구조를 그림 1에 나타내고 있다.

시스템 규격은 ISM (Industrial, Scientific, Medical) 대역의 2.4 GHz ASK (Amplitude Shift Keying) 변조 신호를 사용하고, direct conversion 구조와 non-coherent 방식의 수신기로 설계되었다. 수신 안테나로 수신된 신호는 2단의 LNA를 통해 증폭되고 VCO (Voltage Controlled Oscillator)에서 출력한 2.35 GHz 신호를 Mixer에 인가하여 주파수를 하향

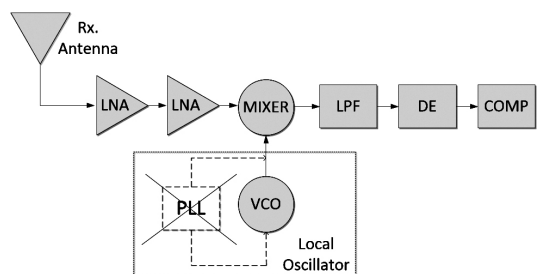


그림 1. 제안된 수신기 시스템 구조
Fig. 1. Configuration of the proposed receiver system

변환시킨다. 저주파 대역으로 변환된 변조 신호는 저역통과여파기 (LPF: Low Pass Filter)를 통하여 채널 대역폭 제한과 이미지 제거를 수행하고, 포락선 검파기 (ED: Envelope Detector)와 비교기 (Comparator)를 통해 디지털 신호로 변환시킨다. 이 때 국부 발진기는 PLL을 사용하지 않는 VCO이므로 신호의 주파수와 위상이 고정되지 않아 VCO에서 발진되는 주파수가 흔들리게 된다. 제안된 수신기는 흔들리는 주파수 범위 안에서 통신이 가능하도록 설계되었다.

수신부에서 들어온 신호를 증폭시키기 위하여 2단의 LNA를 제작하였다. 1단은 BFP520 트랜지스터를 이용하여 15 dB급 증폭기를 설계하였으며, 2단은 선형성 등을 고려한 HMC-286을 사용하였다. 2단의 연결된 증폭기는 측정 결과 그림 2과 같이 S11은 -8.2 dB, S21은 30 dB, S22는 -10 dB로 측정되었다.

RF 신호를 IF 신호로 변환시키기 위해 주파수 변환부를 설계하였다. 수신부에서 발생한 2.4 GHz의 주파수를 가진 신호가 Mixer의 RF단에 들어가고 VCO에서 발진된 2.35 GHz의 신호가 Mixer의 LO단으로 들어가 약 50 MHz로 하향 변환된 IF가 출력된다. 전압을 조절하여 주파수를 발진시키는 VCO 소자는 Mini-Circuit사의 JTOS-3000+를 사용하였으며, V_{tune} 전압을 조절하여 2.35 GHz의 발진 주파수를 결정하였다. 또한 PLL을 사용하지 않아 출력 신호의 주파수가 흔들리는 것을 확인하였다. Mixer는 Mini-Circuit사의 SIM-43+를 사용하였으며, 출력 신호에서 약 50 MHz 기저 대역 하향 변환 신호를 얻을 수 있었다.

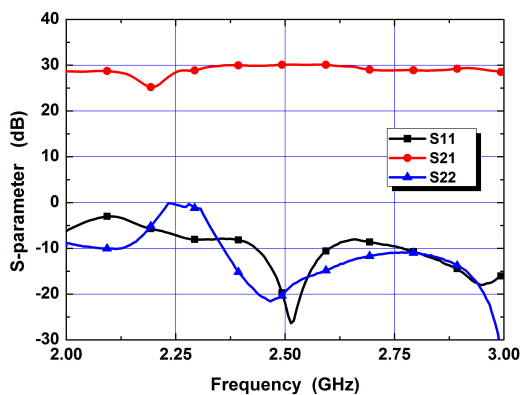


그림 2. 2단 LNA의 측정 결과
Fig. 2. Measured Results of the 2-stage LNAs

III. 주파수 변동성 고려한 수신부 설계

본 논문에서 제안된 수신기 시스템은 PLL을 사용하지 않아 VCO에서 발진되는 주파수가 흔들리므로 기저대역으로 하향 변환된 수신 신호의 주파수도 변화하는 특성을 가지고 있다. 이러한 불안한 구조에서 수신 성능을 유지하기 위해 주파수 변동폭을 고려한 수신기 시스템을 설계하였다.

수신기의 구조는 low-IF로 설정하였다. 최근 일반적으로 사용하는 zero-IF 방식은 기저대역의 중심 주파수가 0 Hz에 있으므로 주파수 변동에 따라 음(-)의 주파수 대역으로 기저대역 스펙트럼이 움직이게 된다. 이러한 변동은 영상 신호를 만들게 되므로 수신 성능을 열화시킬 수 있다. 또한 VCO의 외부 영향에 따른 발진 주파수 변동성을 측정하였다. 안정 상태에서 2.35 GHz 신호를 발진할 수 있도록 $V_{tune} = 1.75V$ 로 고정하고, 외부 온도 변화, 간섭 등의 영향으로 실제 환경에서 주파수가 얼마나 불안정한가를 측정하였다.

그림 3은 VCO의 출력 주파수 스펙트럼이며, 2.336 GHz에서 2.356 GHz까지 약 20 MHz 범위의 주파수 변동성을 가짐을 확인하였다. 이러한 변동 특성의 LO 신호는 2.4GHz의 수신기 수신 신호와 혼합되어 50 MHz의 Low-IF 대역에서 주파수 변동으로 반영된다. 아래 그림 4는 기저 대역에서 주파수 변동성을 44.79 MHz에서 63.15 MHz까지 약 19 MHz 변화함을 측정하였다. 기저대역에서의 흔들리는 범위가 VCO에서 발진되는 주파수의 흔들리는 범위와 유사함을 나타내었다. 여기서 국부 발진기의 주파수 변동성은 발진기의 설계 방식과 패키징 방식 (모듈 타입 또는 IC 타입 등)에 따라 상이하므로 설계시 사용될 국부 발진기의 주파수 변동성을 면밀히 측정하여 수신 마진에 반영

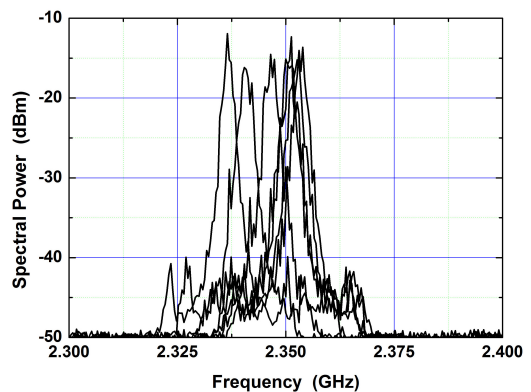


그림 3. VCO의 출력 스펙트럼 변동성
Fig. 3. Spectrum variation of the VCO output

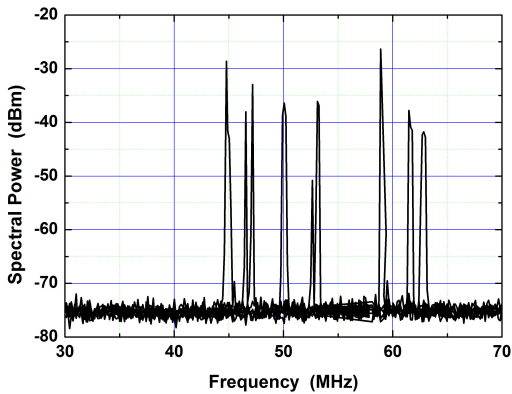


그림 4. 기저대역에서의 LO 안정도에 의한 스펙트럼 변화
Fig. 4. Spectrum variation by LO stability at a baseband

하여야 한다.

앞에서 측정된 LO 변동성에 근거하여 제안된 수신기 시스템의 수신 채널 대역폭 설계를 위한 기저대역 LPF를 설계하였다. 앞에서 측정된 결과를 바탕으로 50 MHz의 low-IF 신호가 약 ± 10 MHz의 변동성을 가짐을 확인하였다. 따라서 최대 ± 20 MHz의 마진을

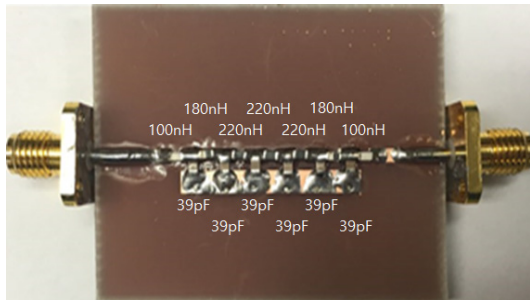


그림 5. 제작된 LPF 사진
Fig. 5. Photograph of the implemented LPF

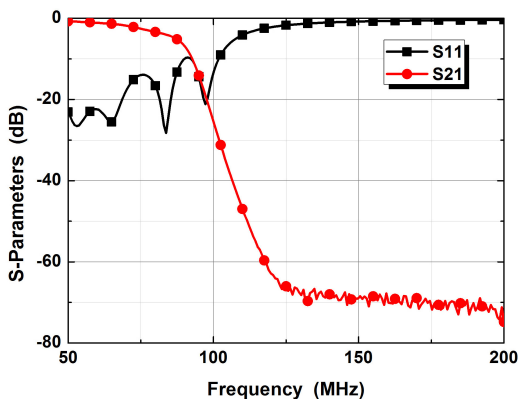


그림 6. LPF 성능 측정 결과
Fig. 6. Measured results of the LPF performance

두고 LPF를 설계하였다. 설계된 LPF는 그림 5에서 보이는 바와 같이 13단의 LC 구조로 설계하였다. 제작된 LPF의 성능은 아래 그림 6과 같으며, 78 MHz에서 -3 dB, 98 MHz에서 -20 dB의 삽입손실을 확인할 수 있었다.

IV. 제안 시스템 성능 평가

제안된 시스템은 low-IF 구조로 설계되어 기저대역에서 디지털 신호로의 복원 및 복조 과정을 거치게 된다. 본 장에서는 제안 시스템의 디지털 복원 성능과 국부발진기 변동성에서의 수신 성능을 평가하여 제안된 수신기 시스템이 저전력 센서 수신기로 동작될 수 있음을 검증하였다.

신호의 low-IF 저주파 대역 복원 성능 평가를 위하여 10 kbps의 데이터율을 갖는 ASK 변조 신호를 수신하여 약 50 MHz의 기저대역에서 포락선 검파기와 비교기를 이용하여 디지털 신호를 복원하였다. 아래 그림 7(a)는 포락선 검파기를 통해 검출된 신호의 파형을 나타내고 있다. LPF를 사용하여 신호의 왜곡이 일부 발생하였으나 각 엷지에서 거의 일정한 데이터율을 나타냄을 알 수 있다. 그림 7(b)는 비교기를 이용하여 디지털 복원을 수행한 결과를 나타내고 있다. 이로서 국부 발진기의 PLL을 사용하지 않는 변동성 내

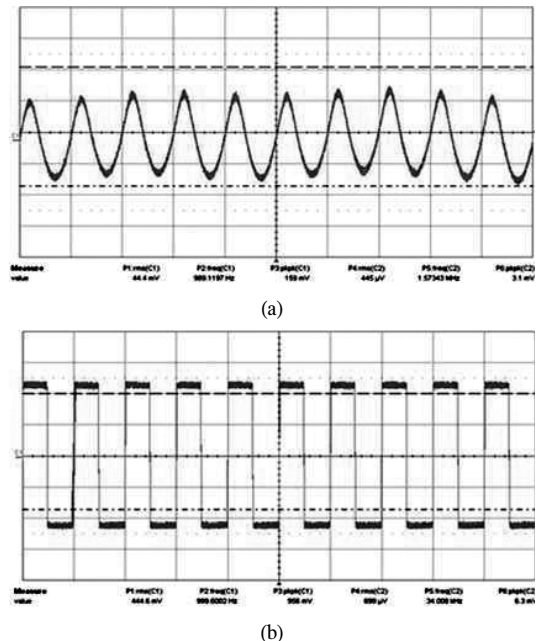


그림 7. 포락선 검파기와 비교기로 복원된 디지털 신호 파형
Fig. 7. Recovered signal waveform at (a) the envelope detector output and (b) the comparator output

에서 디지털 신호 복원이 가능함을 평가하였다. 여기서 ASK 변조 신호의 복원 특성을 고려하여 충분한 반송파 신호 전력과 피변조 신호의 대역폭을 추가적으로 고려한 저역통과여파기를 설계하여야 한다.

제안된 수신기의 국부발진기 주파수 변동성에 따른 수신 성능을 측정하였다. LO의 출력 신호 주파수는 온도 상승, 동일 채널 간섭, 주변 환경에 따라 매우 민감하게 반응하므로 일상의 시스템 환경에서 발생할 수 있는 간섭 영향을 세 가지로 설정하였다. 2.4GHz 대역 WiFi를 인접 동작시켜 동일 채널 간섭을 발생시킨 경우와 도체의 박스로 VCO와 수신기 시스템을 감싸 차폐한 경우, 그리고 헤어드라이어를 이용하여 수신기의 온도를 상승시킨 경우로 실험을 진행하였다.

성능 평가를 위한 실험 셋업을 아래 그림 8에서 나타내었다. 수신된 신호는 신호발생기 장비를 이용하여 중심 주파수 2.4GHz, -30 dBm 수신 전력, 10 kbps의 데이터율을 갖는 ASK 변조신호를 사용하였다. 각각의 간섭 신호가 있을 경우와 간섭이 없는 경우, 수신 포락선 검파기 출력 신호의 전압 진폭을 측정하였다. 이는 최종 수신단인 비교기의 인지 가능 여부가 최종 단 디지털 신호 진폭에 의해 결정되므로 이를 통해 수신 가능 채널을 설정하였다.

정상적인 수신 상태에서 외부의 인위적인 간섭에 의한 국부 발진기의 발진 주파수 변동을 측정하였다. 측정은 기저대역의 디지털 복원 신호의 진폭과 수신 주파수로 측정되었으며, 검출된 디지털 신호의 진폭이 40 mV_{pp}이하가 되면 통신이 이루어지지 않음을 확인하였다. 본 설계에서는 수신 마진을 고려하여 60 mV_{pp}의 수신 진폭을 정상적인 통신이 가능한 기준으로 설정하였다.

그림 9는 국부발진기의 발진주파수를 변화시키며, 인위적 외부 영향에 의한 검출 수신 신호의 진폭을 나타내었다. 수신 신호의 주파수를 zero-IF를 위한 2.35

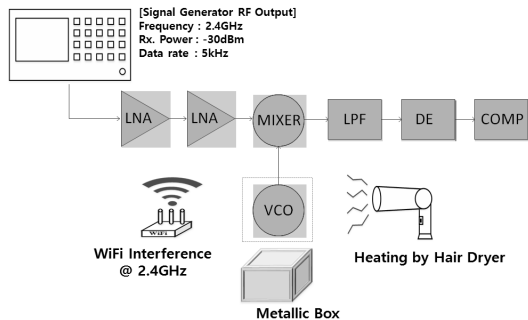


그림 8. 외부 간섭에서의 수신 성능 측정 셋업
Fig. 8. Measurement setup with external interferences

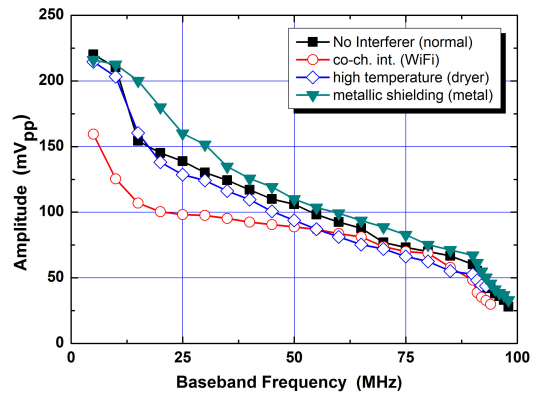


그림 9. 외부 간섭에 의한 검출 디지털 신호의 크기 비교
Fig. 9. Amplitude comparison of detected digital signals for external interferences

GHz에서 low-IF를 위한 2.450 GHz까지 증가시키며 동일한 실험을 반복하였다. 따라서 수신된 기저대역 중심 주파수가 5 MHz에서 100 MHz까지 변동되는 것을 의미한다. 이 또한 강제적인 주파수 변동성에 대한 수신 성능 한계를 측정하기 위한 실험으로 수행되었다. 수신된 신호의 양호한 진폭 검출은 앞의 LO 및 기저대역 주파수 변동성인 최대 ±10 MHz를 고려하면 기저대역 중심 주파수가 5 MHz인 low-IF와 10 MHz에서 거의 동일하게 나타나며 저역통과여파기의 제한성에 의해 중심 주파수가 증가함에 따라 검출도가 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 동일 중심 주파수에서 검출 진폭 차이는 최대 60 mV 이상 측정되었으며, 중심 주파수가 증가함에 따라 편차는 줄어드는 것으로 나타났다. 전체적으로 금속 박스에 의해 외부 신호를 차폐한 경우가 가장 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다. 표 1은 수신 마진을 고려하여 정상 수신 한계를 60 mV_{pp}를 최소 수신 가능 신호 진폭으로 가정하였을 경우 각 간섭 신호에 대한 한계 채널 대역폭 비교를 나타낸 것이다.

표 1 인위적 간섭 영향에 따른 수신 가능 채널 대역폭
Table 1. Detectable channel bandwidth on effects of intentional interferences.

	None	Wifi	Dryer	Shielding
BW (MHz)	90	84	81	92

V. 결론

본 논문에서는 PLL을 사용하지 않는 low-IF 방식의 저전력 수신기 시스템 구조를 제안하였다. PLL을

사용하지 않아 수신 채널의 주파수가 흔들리는 것을 고려하여 수신 가능한 기저대역 채널을 설정하였으며, 설정된 채널 내에서 통신이 가능함을 확인하였다. 또한 통신 환경 영향인 온도, 동일채널 간섭, 도체에 의한 차폐 등의 영향을 고려하여 주파수 변동성 상황에서도 최소한의 통신이 가능한 신호 복원 채널을 설계하였다. 본 논문에서 제안된 Non-PLL 근거리 저전력 RF 수신기 시스템은 간단한 구조와 최소한의 제어 신호 등으로 저전력의 센서 수신기 시스템을 위한 구조로 활용될 수 있을 것이며, 배터리 수명과 동일한 센서의 사용 기간 연장에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] J. H. Kang, H. J. Kim, and M. S. Jun, "Market and technical trends of internet of things," *J. Korea Contents Assoc.*, pp. 14-17, Mar. 2015.
- [2] S.-H. Park and J.-K. Park, "Industrial revitalization plan through IoT technology and market analysis," in *Proc. Korea Technol. Innovation Soc. Conf.*, pp. 85-91, Oct. 2014.
- [3] S. K. Yoon, S. J. Kim, and U. K. Kwon, "A new circuit structure for near field wireless power transmission," in *Proc. IEEE ISCS*, pp. 982-985, Seoul, Korea, May 2012.
- [4] S.-C. Lee and W.-Y. Chung, "Development of mobile u-Healthcare system in WSN," *J. KICS*, vol. 37, no. 4, pp. 338-346, Feb. 2012.
- [5] H.-W. Choi, S.-J. Kim, and M.-C. Ryu, "Routing protocol using node connectivity for hierarchical wireless sensor network," *J. KICS*, vol. 35, no. 3, pp. 269-278, Mar. 2010.
- [6] W.-S. Yoon, S.-J. Lee, and S.-M. Han, "Channel cognitive wireless sensor system based on spectrum sensing technology," *IEEE Trans. Ant. Propag.*, vol. 62, no. 3, pp. 1157-1164, Mar. 2014.
- [7] S.-S. Lee, S.-M. Han, and M.-H. Son, "Low power UWB RF transceiver for wireless headset," in *Proc. IEEE RF Integ. Technol.*, pp. 61-64, Singapore, Feb. 2006.
- [8] S. H. Kim, H. Kim, and H. C. Shin, "A 2.4-GHz low-power RF transceiver for

wireless sensor network," in *Proc. KICS Winter Conf.*, pp. 248-249, Nov. 2012.

- [9] J. O. Kim, S. Kim, S.-J. Lee, D. Lee, D. Ahn, J.-H. Ahn, and S.-M. Han, "A study of the short-range wireless RF system design regarding local oscillator stability," in *Proc. KICS Conf.*, Jan. 2017.

김 정 옥 (Jung Ouk Kim)



2017년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2017년 3월~현재: 순천향대학교 정보통신공학과 석사과정
 <관심분야> RF 시스템 설계, IoT 근거리 네트워크, 무선 전력 전송

김 성 옥 (Sung Ouk Kim)



2017년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2017년 3월~현재: 모다정보통신(주) HW 개발센터 연구원
 <관심분야> RF 시스템 설계, 모바일 통신 기기

이 석 재 (Seok-Jae Lee)



2010년 2월: 순천향대학교 정보기술공학부 (공학사)
 2012년 2월: 순천향대학교 대학원 정보통신공학과 (공학 석사)
 2016년 8월: 순천향대학교 대학원 정보통신공학과 (공학 박사)

2017년 1월~현재: (주) 와이솔 선임연구원
 <관심분야> 마이크로파 시스템 설계, 능동/수동 안테나, 마이크로파 소자 설계

이 대 웅 (Dae Woong Lee)



2013년 2월 : 순천향대학교 전
기공학과 (공학사)
2015년 2월 : 순천향대학교 전
기공학과 (공학석사)
2015년 3월~현재 : 순천향대학
교 전기공학과 박사과정
<관심분야> SOC 설계 및 응
용, 반도체 테스트

안 진 호 (Jin-Ho Ahn)



1995년 2월 : 연세대학교 전기공
학과 (공학사)
1997년 2월 : 연세대학교 전기공
학과 (공학석사)
2002년 8월 : LG전자 DTV연구
소 연구원
2006년 8월 : 연세대학교 전기전
자공학과 (공학박사)
2007년 3월~현재 : 호서대학교 전자 디스플레이 공
학부 교수
<관심분야> SOC 설계 및 응용, 반도체 테스트

안 달 (Dal Ahn)



1984년 2월 : 서강대 전자공학
과 (공학사)
1986년 2월 : 서강대 대학원 전
자공학과(공학석사)
1990년 8월 : 서강대 대학원 전
자공학과(공학박사)
1990년 8월~1992년 8월 : 한국
전자통신연구원 선임연구원
1992년 9월~현재 : 순천향대학교 전기공학과 교수
<관심분야> RF, 마이크로파 수동소자 해석 및 설계
등

한 상 민 (Sang-Min Han)



1996년 2월 : 고려대학교 전파
공학과 (공학사)
1998년 8월 : 고려대학교 전파
공학과 (공학석사)
2003년 8월 : 고려대학교 전파
공학과 (공학박사)
2003년 10월~2004년 11월 :
미국 University of California, Los Angeles
(UCLA), Post-Doctoral Research Fellow
2005년 1월~2007년 8월 : 삼성종합기술원 전문연구
원
2013년 8월~2014년 7월 : 미국 Georgia Institute of
Technology (GT), Research Faculty
2007년 9월~현재 : 순천향대학교 정보통신공학과 교
수
<관심분야> RF Systems, Low-Power Transceivers,
Active Integrated Antennas