

IoT 무선 센서를 위한 RF 스펙트럼 인지 기술

RF Spectrum Cognition Technologies for IoT Wireless Sensors

윤원상* · 한상민*
(Won-Sang Yoon · Sang-Min Han)

Abstract - In this paper, new spectrum sensing schemes based on analog/RF front-end processing are introduced for IoT wireless sensor networks. While the conventional approaches for wireless channel cognition have been issued in signal processing area, the RF spectrum cognition concept makes it feasible to achieve cognitive wireless sensor networks (C-WSNs). The spectrum cognition at RF processing is categorized as four kinds of sensing mechanisms. Two recent reseaches are described as promising candidates for the C-WSN. One senses spectrum by the frequency discriminating receiver, the other senses and detects from the frequency selective super-regenerative receiver. The introduced systems with simple and low-power RF architectures play dual roles of channel sensing and demodulation. simultaneously. Therefore, introduced spectrum sensing receivers can be one of the best candidates for IoT wireless sensor devices in C-WSN environments.

Key Words : Cognitive radio, C-WSN (Cognitive wireless sensor network), IoT (Internet of things), Spectrum sensing, Wireless connectivity

1. 서 론

1990년대 후반 Bluetooth라는 근거리 접속 솔루션이 소개된 이래 IEEE 802.15.1의 표준을 시작으로 개인을 중심으로한 지역 (PAN: Personal Area Network)의 모든 기기의 연결을 뜻하는 유비쿼터스(Ubiquitous) 시대로의 진화를 시작하였다. 최근까지 이어온 ZigBee, RFID, UWB 등의 다양한 저전력 근거리 솔루션들이 제안되었으나[1-5], 저전력, 데이터 효율, 스펙트럼 효율, 저가격 등의 모든 요구사항을 만족하지 못하고 인터넷 기반의 접속 솔루션을 뜻하는 IoT (Internet of Things) 혹은 IoE (Internet of Everything)로의 새로운 패러다임을 진행하고 있다. 이와 같은 저전력 근거리 접속 솔루션의 연구 개발 동향과 함께 다양한 접속 솔루션에 할당해야 할 주파수 자원의 고갈은 통신 변조 방식의 개선에 따른 스펙트럼 효율 증가와 다른 한축으로, 유휴 스펙트럼의 공유(共有) 혹은 임대 개념이 IEEE802.22 표준을 중심으로 제안되었다[6-11]. 스펙트럼의 공유는 모든 통신 및 방송 서비스가 항상 할당 스펙트럼 대역을 점유하고 있지 않음에도 불구하고 독점에 의해 공공재 성격인 전파 자원을 낭비하는 문제를 해결하고자 하는 차원의 접근이 이루어졌다. 그러나 고가의 비용을 지불하고 구매 또는 경매를 통해 취득한 자원을 나누어 재활용하는 것은 정책과 규정에 의해 그리 쉽게 해결되지 않았다. 때문에 IEEE802.22 Cognitive Radio (CR) 또한 최초 제안 당시의

기대와 달리 우선권(priority)을 갖는 사업자를 정확하게 인지하여 우선 사업자의 비사용 시에만 차 순위 사업자가 사용가능한 시스템으로 한정되어졌다. 따라서 이와 관련된 스펙트럼 인지 기술 또한 정확한 스펙트럼의 신원 확인을 위한 고성능 고전력 센싱 시스템으로 설계되었다[7]. 즉, 완벽한 수신과 복조 과정을 거치는 스펙트럼 센서가 요구되었고, 이같은 동향은 우선 사업자의 비사용 시에 비교적 간단하게 스펙트럼을 인지하여 사용하고자 했던 당초의 기대에 못 미치는 결과를 낳게 되었다.

본 논문에서는 앞서 기술한 근거리 저전력 센서용 트랜시버 기술 기반에서 유휴 주파수를 활용한 효율적 주파수 인지 기술을 위한 근거리 접속 기술 연구를 소개하고자 한다. IoT 응용을 위한 저전력 센서를 비허가 주파수인 ISM 대역을 사용하고자 하는 경우 RF단 스펙트럼 센싱을 통해 효율적인 시스템으로 제안하는 분야이다[8-11]. 기존의 송수신 기능을 갖는 RF 시스템은 앞서 소개한 고성능 스펙트럼 센서에서 단순한 주파수 상하향 변환기 기능에 지나지 않았다. 그러나 본 논문에서 소개되는 RF 시스템은 능동적으로 신호의 기저대역 복조 과정 없이 스펙트럼의 인지가 가능한 RF 스펙트럼 인지 기술을 소개한다. 본 논문의 구성은 제1장 서론에 이어 제 2장에서 RF 스펙트럼 인지기술의 개념과 방법들을 소개한다. 제 3장에서는 주파수 구분 방식에 의한 주파수 인지 기술을, 제 4 장에서는 수파 재생 수신기에 의한 스펙트럼 채널 인지 기술을 소개하며, 제 5장 결론에서는 이같은 연구 동향과 응용 방안에 대해 논하게 된다.

† Corresponding Author : Dept. of Information and Communication Engineering, Soonchunhyang University, Korea
E-mail : smhan@sch.ac.kr

* Dept. of Electronic Engineering, Hoseo University, Korea
Received : October 30, 2015; Accepted : December 24, 2015

2. RF 스펙트럼 인지 기술

본 장에서는 RF 스펙트럼 센서와 RF 스펙트럼 인지 기술에

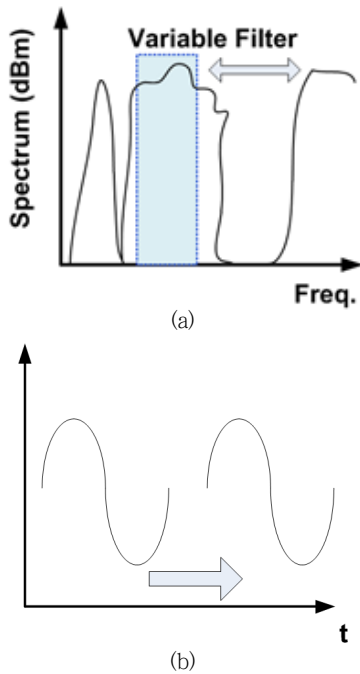


그림 1 RF 스펙트럼 신호의 직접 센싱 방식 (a) 가변 필터를 이용한 에너지 인식 방법 (b) 아날로그 자기상관 방법

Fig. 1 Spectrum sensing methodologies for RF signals. (a) Energy detection method by variable filters, (b) Analog auto-correlation method.

대해 기술하고자 한다. 스펙트럼을 인지하는 센서는 무선 채널에 존재하는 전파 신호 가운데 특정 신호를 수집하여, 그 신호를 센서에 삽입하면 센서의 출력에서 수집된 무선 신호의 스펙트럼, 즉 주파수 정보를 알 수 있는 메시지를 제공하는 역할을 하는 디바이스로 정의할 수 있다. 이상적인 경우라면 수집된 특정 신호를 센서에 입력하면 센서가 입력된 주파수를 읽어서 알려주는 것이라 할 수 있다. 그러나 들어온 신호가 내가 원하던 유효한 신호인가를 구분하는 것은 단순하지 않다. 때문에 기존의 방식은 수신된 신호를 복조하여 원하는 신호의 약속한 변조 방식과 동일한지를 확인하는 과정을 거쳤다.

이러한 복조과정을 RF단에서 수행하는 방식은 아래 그림 1에 도시한 바와 같이 몇 가지 방식으로 구분할 수 있다. 첫째는 수신 대역 내에 존재하는 수많은 신호 가운데 특정 주파수의 신호를 가변적으로 필터링하여 수신하는 것이다. 이 방식은 최근 주목 받는 Reconfigurable RF시스템 방식으로 높은 선택도를 갖는 가변의 고주파 여파기가 설계되어야 하며, 여파기의 대역폭 또한 원하는 채널 (대역밴드가 아닌) 대역폭을 만족할 수 있도록 가변되어야 한다[12]. 이같은 부품 기술은 스펙트럼의 스캐닝에 의한 채널 선택으로 채널의 사용 여부 및 유효 채널 신호의 존재 여부를 프로세서 단의 추가적인 부담없이 해결할 수 있으나, 높은 선택도를 갖는 가변 대역폭, 가변 채널 여파기를 개발하는 난제가 존재한다고 할 수 있다. 두 번째 경우는 미국 조지아텍에서 제안된 방식으로 수신 신호의 웨이블릿 변조 방식에 의한 동기화

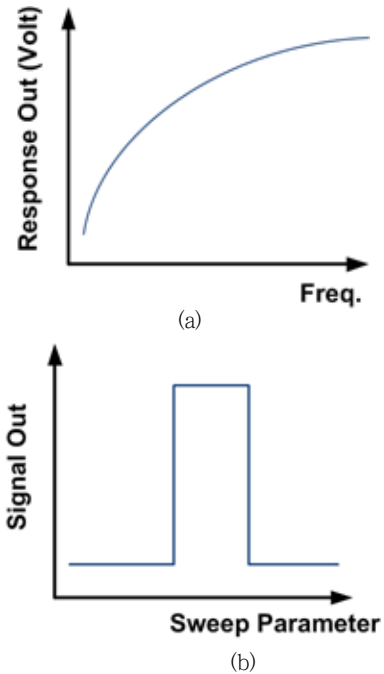


그림 2 센서의 입력 주파수에 따른 출력 반응 (a) 신호의 주파수 반응 (b) 유효 신호의 존재 반응

Fig. 2 Output responses for input frequencies at sensor receiver systems. (a) response for signal frequency, (b) response to valid signal existence.

로 유효 채널을 인식하는 방식이다[13].

이는 레이더에서 사용되는 기술의 일부를 응용한 것으로 초기 IEEE 802.22에 제안되어 관심을 끌었다. 하지만, 신뢰도와 우선 순위 사업자 선별을 강조하는 표준의 진행으로 채택되지 못하였으나 표준에 제안된 유일한 RF 스펙트럼 센싱 방법이었다. 한편, 이 방식은 센서의 스펙트럼 인지 기술로 사용되기에는 2종의 센싱 과정 등 시스템이 복잡하고 저전력 기반이 아니라는 단점을 가지고 있다.

다음은 그림 2(a)에서 보이는 바와 같이 입력된 주파수에 따라 일정하게 비례하는 임의의 출력(전압, 전류 등)을 나타내도록 하는 센서이다. 이는 센서가 입력 주파수에 따라 다르게 반응하도록 설계되면 입력 주파수의 차이만큼 다른 신호를 출력하는 반응 방식이다. 마지막으로 원하는 주파수의 신호가 들어올 때만 반응하는 센서를 그림 2(b)에서 보이고 있다. 가장 이상적인 수신기 센서라 할 수 있는 이 방식은 원하는 신호의 패턴을 가지고 있을 때, 수신 센서의 동조기를 튜닝하면서 원하는 신호가 센서에 입사되면 원하는 복조 신호 또는 출력을 송출하고, 그렇지 않은 경우에는 아무런 출력을 내지 않는 센서이다. 이러한 설계 방식은 저전력의 IoT 센서 시스템에 적합한 구조를 가지고 있으며, 센싱과 동시에 원하는 출력만을 얻을 수 있으므로 매우 효율적인 시스템이라 할 수 있다. 다음 장에서는 앞에서 설명한 마지막 두 가지 센싱 시스템에 대해 자세히 기술하게 된다.

3. 주파수 구분 방법에 의한 수신 채널 인지 시스템

본 장에서는 주파수 구분 (Frequency Discrimination) 방법에 의한 수신 채널 인지 시스템에 대해 소개한다[14, 15]. 주파수 구분 방식은 FM 변조 신호의 수신에 사용되는 방법 중 하나로 수신 신호의 자기 믹싱 (Self Mixing)에 의해 동기 신호 이외의 신호를 직류 전압 형태로 추출해 내는 방식이다. 주파수-전압 변환회로의 수신 신호는 믹서 전단에서 분기되어 믹서의 RF와 LO 입력단에 90° 위상차를 가진 상태로 입력된다. 믹서의 출력 신호를 저역통과필터를 통과시켰을 때, 출력 신호 레벨은 그림 3에 나타낸 것과 같이 수신 신호의 주파수에 비례하거나 반비례하여 변화한다[14-16].

이러한 특성을 이용하여 스펙트럼 센싱이 가능한 센서 수신기를 그림 4와 같이 구현하였다. 제안된 시스템에서 안테나로 수신

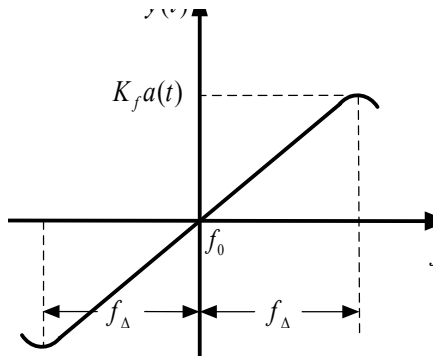


그림 3 입력 주파수에 대한 출력 전압 (90° 위상 지연)
Fig. 3 Voltage output corresponding to input signal frequency (90 deg. phase shift).

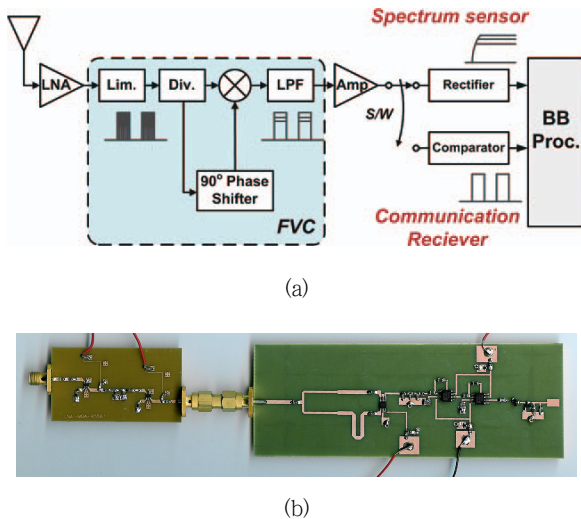


그림 4 주파수 구분에 의한 채널 선택적 스펙트럼 센싱 수신기
(a) 블록도 (b) 구현된 수신기
Fig. 4 Proposed channel selective RF receiver. (a) Block diagram, (b) System photograph including an LNA.

된 신호는 저잡음 증폭기를 통과한 후 주파수-전압 변화 회로에 입력된다. 이 때, 입력 신호의 레벨변경에 따른 출력 전압의 변경이 일어나지 않도록 제한기를 이용하여 고정된 진폭을 갖는 신호가 주파수-전압 변화 회로로 입력한다. 주파수 센서부는 주파수-전압 변화 회로의 출력 신호를 적분기 또는 검파기를 통해 일정한 직류 전압으로 변환하며, 이 때 각 반송파 주파수에 따라 각기 다른 값의 직류 전압값을 얻게 된다[17]. 따라서, 각 주파수에 따른 출력 신호의 직류 전압값을 디지털 프로세서에 전달하여 수신 채널의 주파수를 인지할 수 있으므로 다중 채널 환경에서 채널 선택 능력을 갖추게 된다.

주파수-전압 변화 회로에 OOK 신호가 입력될 때, 입력 신호가 'OFF'일 때 입력 전력이 없으므로 신호가 출력되지 않고, 'ON'일 때에만 신호가 출력되므로 주파수-전압 변화 회로 자체적으로 OOK 복조기 역할까지 수행하게 된다. 즉, 제안된 시스템은 다중 채널환경에서 스펙트럼 센싱과 신호 복원 기능을 동시에 수행함으로써 매우 효율적인 시스템 구성으로 소형화와 저 전력화에 기여할 수 있는 구조이다. 제안된 시스템에 대한 구현 및 측정된 결과는 그림 5를 통해 확인할 수 있다.

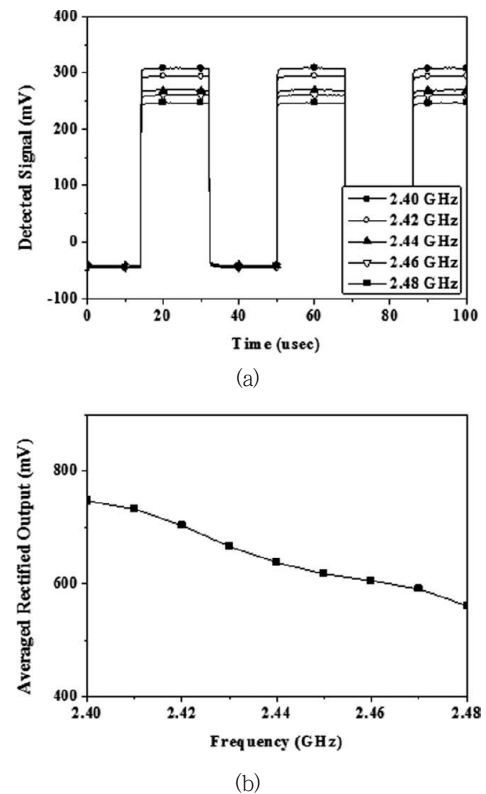


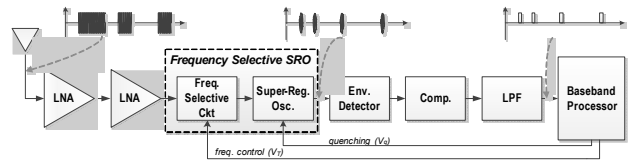
그림 5 주파수 구분에 의한 채널 선택적 스펙트럼 센싱 수신기의 동작 (a) 주파수-전압 변환 회로 출력 (b) 입력 신호 주파수에 따른 출력 전압 변화

Fig. 5 Experimental results of the proposed channel selective RF receiver and sensor system. (a) Frequency-voltage converter output, (b) Output voltage variation for input signal frequency.

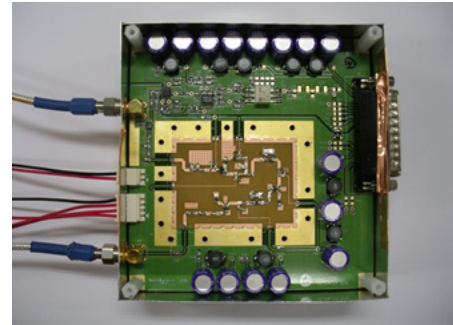
그림 5(a)에 나타난 것과 같이 주파수-전압 변환 회로의 출력은 입력 주파수가 변화하더라도 동일한 데이터를 복조하지만, 입력 주파수에 따라 신호의 레벨이 바뀌는 것을 알 수 있다. 그리고, 2.4~2.8 GHz 대역의 입력 주파수 대역에 대하여 주파수 센싱 회로의 출력 전압레벨은 740~575 mV 까지 입력 주파수에 반비례하여 변화하는 것을 그림 5(b)를 통해 알 수 있다. 즉 제안된 시스템은 주파수-전압 변환회로를 이용하여 수신된 신호의 출력 전압 레벨 검출을 통해 입력 주파수를 알 수 있으며, 또한, OOK 등의 간단한 변조방법을 이용한 정보 전달이 가능하므로, 다중 채널 환경에서 저전력 센서 시스템에서 활용 가능성을 알 수 있다[14, 15].

4. 주파수 감응형 수퍼재생 수신기 방식에 의한 주파수 인지 방법

본 장에서는 주파수 선택능력을 갖춘 수퍼재생 수신기를 (Super-Regenerative Receiver) 이용한 수신 채널 인지 시스템에 대해 소개한다[18]. 수퍼재생 수신기는 수퍼재생 발진기 (Super-Regenerative Oscillator, SRO)의 동작원리를 기본으로 한다[19, 20]. 수퍼재생 발진기는 자유공진에 의한 발진과 입력된 신호에 의한 주입동기 발진시에 발생하는 발진기의 출력신호가 생성되는 전환 (transient) 응답의 시간차를 이용하여, 트랜지스터의 바이어스 전압을 주기적으로 차단하는 동작 (quenching)을 통해 특정 주파수의 입력 신호가 있을 경우에만 주파수 동조된 출력을 생성한다[21]. 따라서, 전송율의 2배 이상의 주파수로 샘플링된



(a)



(b)

그림 6 수퍼 재생 수신기 (a) 구성도 (b) 시스템 사진

Fig. 6 Super-regenerative receiver. (a) Configuration, (b) Photo of the implemented system.

수퍼 재생 발진기의 출력에 포락선 검파기와 저역통과 필터를 적용하면 RF 입력 신호의 유무에 따른 출력 신호를 생성할 수 있으며, OOK 변조 방식을 적용할 경우 부가적인 디지털 회로가 없이도 RF 회로를 이용한 복조를 구현할 수 있다. 한편, 수퍼 재

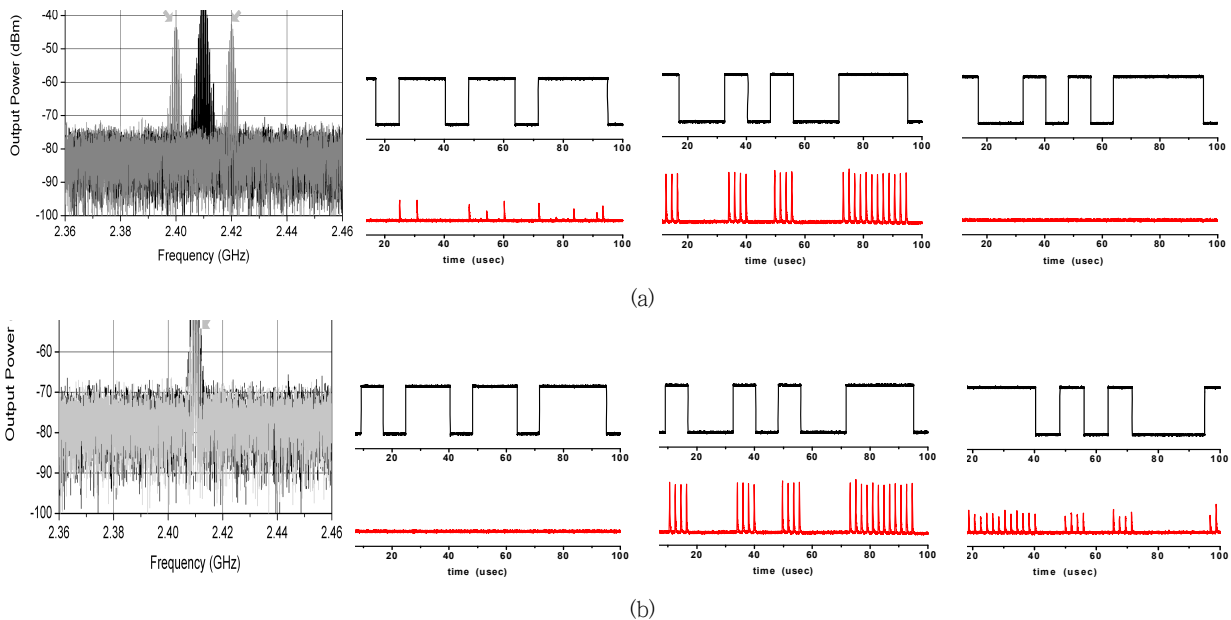


그림 7 주파수 감응형 수퍼재생 수신기 (a) 입력 주파수 변화에 따른 출력 특성(수신기 튜너 주파수 고정) 수신기 동작 주파수 변화에 따른 출력 특성(입력 신호 주파수 고정)

Fig. 7 Channel cognitive sensor receiver (a) SRR output for various input signal frequencies (fixed receiver tuner frequency), (b) SRR output for various tuner frequencies (fixed input signal frequency)

생 발전기의 공진 회로에 바랙터 다이오드를 적용함으로써 수신기는 주파수 선택 능력을 갖게 된다. 이러한 주파수 가변형 수퍼재생 발전기를 저잡음 증폭기와 포락선 검파기, 비교기와 함께 구성하여 그림 6에 나타난 것과 같은 주파수 감응형 수퍼 재생 수신기를 구성할 수 있다.

안테나를 통해 수신된 신호는 2단으로 구성된 LNA에 의해 증폭이 되고, 수퍼재생 수신기로 입력된다. 주파수 가변 공진회로를 포함한 수퍼재생 발전기는 시스템 컨트롤러에 의한 전압 제어를 통해 동작 주파수를 가변하면서 입력 신호의 유무를 파악하며, 일정 수준 이상의 신호가 입력될 경우 그에 동조하여 OOK 복조 신호를 생성하게 된다.

그림 7(a)는 수신기의 동작 주파수를 2.4 GHz로 고정하였을 때 입력 주파수 변화에 따른 수신기 출력 신호를 나타낸 것이며, 입력 신호의 주파수가 수신기의 동작 주파수와 일치할 경우 출력 신호가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 입력 주파수를 2.41 GHz로 고정된 상태에서 수퍼재생 발전기의 동작 주파수를 가변시킬 경우에도 두 신호의 주파수가 일치할 경우에만 송신 신호와 동일한 출력 신호를 복조할 수 있음을 그림 7(b)을 통해 알 수 있다. 즉, 수신기의 핵심 구성품인 SRO에 주파수 가변 공진 회로를 적용하여 주파수 분할을 통한 주파수 다중화 환경에서 채널 선택적인 능력을 갖는 센서로서 활용 가능함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문을 통해 IoT 응용 분야에 활용 가능한 저전력 센서들을 소개하였다. 이 시스템들은 근거리의 사물간 접속이 가능하도록 저전력 센서용 트랜시버 기술 기반에서 유희 주파수를 활용한 효율적 주파수 인지 기술들이 적용되었다. 기존의 송수신 기능을 갖는 RF 시스템이 고성능 스펙트럼 센서에서의 단순한 주파수 상하향 변환기 기능에 지나지 않았던 반면에 본 논문을 통해 소개된 시스템들은 매우 간단한 구조를 통해 RF단에서의 직접적인 스펙트럼 센싱이 가능할 뿐만 아니라, 특별한 기저 대역 복조 과정 없이도 RF단에서의 직접적인 신호의 복조가 가능하다는 장점을 갖고 있다. 따라서, 이러한 시스템들은 비허가 주파수인 ISM 대역을 사용하는 IoT의 센서로서 매우 효율적일 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 순천향대학교 학술연구비와 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구사업임. (No. NRF-2015 R1D1A3A01016567)

References

[1] IEEE Standard 802.15.4, "PART 15.4: Wireless medium

access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs)," IEEE Press, Dec. 2005.

[2] S.-M. Han, O. Popov, and A. Dmitriev, "Flexible chaotic UWB communication system with adjustable channel bandwidth in CMOS technology," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 56, no. 10, pp. 2229-2236, Oct. 2008.

[3] J.-S. Lee, J.-M. Kim, J.-S. Lee, S.-K. Han, S.-G. Lee, "A 227 pJ/b - 83 dBm 2.4 GHz multi-channel OOK receiver adopting receiver-based FLL," Int. Solid-State Circuit Conf. 2015 Digest Technical Paper, pp. 234-235, Feb. 2015.

[4] M. Vidojkovic, et al., "A 2.4GHz ULP OOK single-chip transceiver for healthcare applications," Int. Solid-State Circuit Conf. digest technical paper, pp. 458-459, Feb. 2011.

[5] J. Ayers, K. Mayaram, and T. S. Fiez, "An ultra-low-power receiver for wireless sensor networks," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 45, no. 9, pp. 1759-1769, Sep. 2010.

[6] IEEE 802.22 WG on Wireless Regional Area Networks, "Functional Requirements for the 802.22 WRAN Standard," <http://www.ieee802.org/22/>.

[7] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb 2005

[8] B. Razavi, "Cognitive radio design challenges and techniques," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 45, no. 8, pp. 1542-1553, Aug. 2010.

[9] V. Pohl, F. Y. Suratman, A. M. Zoubir, and H. Boche, "Spectrum sensing for cognitive radio architectures based on sub-Nyquist sampling schemes," Int. ITG Workshop on Smart Antennas (WSA), Germany, Feb. 2011.

[10] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," IEEE Commun. Surveys & Tutorials, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, 1st Quarter 2009.

[11] K. Seshukumar, R. Saravanan, and M. S. Suraj, "Spectrum sensing review in cognitive radio," Int. Conf. Emerging Trends in VLSI, Embedded Syst., Nano Electronics and Telecommun. Syst. (ICEVENT), January 2013.

[12] G. Chaudhary, Y. Jeong, and J. Lim, "Harmonic suppressed dual-band bandpass filter with independently tunable center frequencies and bandwidths," J. Electromagnetic Eng. Sci., vol. 13, no. 2, pp.93-103, June, 2013.

[13] J. Park, T. Song, J. Hur, S. M. Lee, J. Choi, K. Kim,

- K. Lim, C.-H. Lee, H. Kim, and J. Laskar, "A fully integrated UHF-band CMOS receiver with multi-resolution spectrum sensing (MRSS) functionality for IEEE 802.22 cognitive radio applications," IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 44, no. 1, pp. 258-268, Jan. 2009.
- [14] K.-J. Lee, H. Lee, Y.-S. Kim, J. Lim, and S.-M. Han, "Multi-functional channel selective RF receiver system for low-power sensor network applications," Microw. Optical Tech. Lett., vol. 54, no. 4, pp. 847-851, April 2012.
- [15] K.-J. Lee, H. Lee, Y.-S. Kim, J. Lim, and S.-M. Han, "Erratum: Multi-functional channel selective RF receiver system for low-power sensor network applications," Microw. Optical Tech. Lett., vol. 54, no. 7, pp.1775, July 2012.
- [16] A. B. Carlson, Communication Systems: An Introduction to Signals and Noise in Electrical Communication, 3rd edition, McGraw-Hill, Singapore, pp.259-263, 1986.
- [17] S.-M. Han, Y. Lee, T. Choi, S.-J. Lee, J.-W. Baik, J. Lim, and D. Ahn, "Compact wake-up module design based on an energy-harvesting rectenna for wireless sensor receivers," Int. J. Antennas Propag., vol. 2015, Article ID 976875, 2015.
- [18] W.-S. Yoon, S.-J. Lee, and S.-M. Han, "Channel cognitive wireless sensor system based on spectrum sensing technology," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 62, no. 3, pp. 1157-1164, March 2014.
- [19] F. X. Moncunill - Geniz, P. Palà - Schönwälder, and F. Águila - López, "New superregenerative architectures for direct - sequence spread - spectrum communications," IEEE Trans. Circuits Syst. II, Exp. Briefs, vol. 52, no. 7, pp. 415 - 419, July 2005.
- [20] E. H. Armstrong, "Some recent developments of regenerative circuits," Proc. IRE, vol. 10, pp. 244 - 260, Aug. 1922.
- [21] W.-S. Yoon, H.-S. Lee, H.-J. Lee, J. Lim, Y.-S. Kim, and S.-M. Han, "A frequency tunable super-regenerative oscillator for channel selective receivers," in Proc. IEEE Radio Wireless Symp. 2011 (RWS '11), Phoenix, AZ, USA, pp.227-230, Jan. 2011.

저 자 소 개



윤 원 상 (Won-Sang Yoon)

1997년 고려대 전파공학과(공학사). 1999년 고려대 통신시스템학과(공학석사). 2010년 고려대 컴퓨터·전파통신공학과 (공학박사). 1999년 3월~2015년 8월 : 한화탈레스 수석 연구원. 2015년 9월~현재 : 호서대학교 전자공학과 조교수
관심분야 : RF transceivers, Reconfigurable antenna systems, RF sensor systems



한 상 민 (Sang-Min Han)

1996년 고려대 전파공학과(공학사). 1998년 고려대 전파공학과(공학석사). 2003년 고려대 전파공학과(공학박사). 2003년 10월~2004년 11월 : 미국 UCLA Post-Doctoral Research Fellow. 2005년 1월~2007년 8월 : 삼성종합기술원 전문연구원. 2013년 8월~2014년 7월 : 미국 Georgia Institute of Technology, Research Faculty. 2007년 9월~현재 : 순천향대학교 정보통신공학과 부교수
관심분야 : Low-power RF transceivers, Active integrated antenna systems, Spectrum sensing.