

RF단 프로세싱에 의한 스펙트럼 센싱 시스템 설계

Spectrum Sensing System Design Using RF Front-End Processing

홍준기 · 한상민

Jun Gi Hong · Sang-Min Han

요약

본 논문에서는 RF단에서의 프로세싱에 의한 무선 스펙트럼 인지 시스템을 제안하였다. 기존의 Cognitive Radio 시스템이 신호의 하향 변환과 복조의 과정을 거쳐 수신된 신호를 분석함에 의해 스펙트럼과 신호를 인지하는데 반해, 제안된 시스템은 RF 단 프로세싱에 의한 신호 수신 및 검출에 의한 센싱 방법을 제안하였다. 이를 위해 제안된 수신기는 초재생(super-regeneration) 회로 방식으로 설계되었으며, FDM에 활용할 수 있는 채널 선택성과 채널 가변성을 갖도록 하여 기존 초재생 회로가 단일 채널로만 사용이 가능하였던 한계를 극복하였다. 제작된 제안 시스템은 킨칭(quenching) 신호를 이용한 채널 할당 최적화를 위한 설계를 수행하였으며, 실험결과 5 MHz의 채널 간격에 대한 채널 선택성을 검증하였다.

Abstract

In this paper, a wireless spectrum sensing receiver system is proposed. While a conventional Cognitive Radio(CR) system utilizes frequency down-conversion and demodulation to recognize wireless spectral signal, the proposed one is able to recover and sense valid signal at an RF front-end. It has been designed with a super-regeneration type circuit with a channel selectivity and variability for FDM applications with which a conventional single-channel super-regeneration circuit could not provide. From experimental evaluation, the implemented system has been optimized for channel allocation with quenching signal, and verified for 5 MHz-channel spacing.

Key words: Cognitive Radio, Spectrum Sensing, Super-Regenerative Receiver(SRR), RF Front-End Processing

I. 서론

이제까지의 무선 통신 서비스는 정부로부터 한정된 주파수 자원을 할당 받는 것으로 사업권을 인정받아 독점적 주파수를 점유하는 방식으로 이루어져 왔다. 각 국가별로 ISM 대역으로 지정된 일부 주파수에 대해 소출력 근거리 서비스를 위한 제한적인 비허가 주파수를 사용하는 것이 허용되고 있다. 그러나 ISM 대역은 IEEE 802.15 WG내의 WiFi, Bluetooth, ZigBee, UWB, RFID, NFC 등의

수많은 근거리 무선 서비스에 의해 거의 모든 지역에서 간섭으로 인한 서비스 품질이 저하되는 현상을 가져왔다^{[1]~[3]}. IEEE 802.22에서 제안된 Cognitive Radio는 유휴 무선 채널의 공유 기술을 제시하였으나, 선순위 허가 사용자 인지 프로세싱에 의한 시간 지연 및 수신기의 복잡도 증가 등의 문제를 안고 있다^{[3]~[5]}.

본 논문에서는 근거리 저전력 저속 데이터 센서 시스템을 위한 스펙트럼 인지 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 RF단에서의 프로세싱에 의해 스펙트럼 인지와

「본 연구는 순천향대학교 학술연구비와 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업의 지원을 받아 수행되었음(2009-0065-375).」

순천향대학교 정보통신공학과(Department of Information and Communication Engineering, Soonchunhyang University)

· Manuscript received December 31, 2014 ; Revised February 3, 2015 ; Accepted February 10, 2015. (ID No. 20141231-06S)

· Corresponding Author: Sang-Min Han (e-mail: smhan@sch.ac.kr)

복조가 가능하도록 설계되었으며, 채널 할당의 최적화 방안이 적용되었다. 기존의 IEEE 802.22에서 제안된 시스템들이 신호의 하향 변환과 복조의 과정을 거쳐 수신된 신호를 분석함에 의해 스펙트럼과 신호를 인지하는데 반해, 제안된 시스템은 RF단의 프로세싱에 의한 신호 수신 및 검출에 의해 센싱이 수행된다. 따라서 제안된 시스템은 빠른 채널 인지 및 데이터 복조 시간을 가지며, 매우 간단한 회로 설계에 의해 근거리 센서 네트워크의 주파수 채널 인지 시스템으로 활용이 가능하다. 유휴 채널의 인지를 위한 스펙트럼 센싱은 신호 수신을 통해서만 가능하므로 본 논문에서는 수신기 시스템으로 구성된 RF 스펙트럼 센싱 기술을 제안하였으며, 전체 송수신 시스템을 위한 송신기는 기존 방식에 의해 설계가 가능할 것이다. 본 논문의 구성은 제 1장 서론에 이어 제2장에서는 RF 채널인지 시스템의 구성과 동작원리를 설명하고, 제3장에서 시스템 상세 설계 및 구동 원리를 기술하였다. 제4장에서는 제작된 시스템의 채널 인지 성능을 평가하고, 제5장에서 결론을 맺었다.

II. RF 채널 인지 시스템

본 장에서는 제안된 시스템의 동작 원리 및 구성을 기술하였다. 제안된 RF 채널 인지 수신기 시스템은 수신기에서 설정된 주파수 채널에서 복원 가능한 자기 신호인 유휴 채널 신호 이외의 신호에 대해서는 수신 동작을 일으키지 않는 초재생(super-regeneration) 방식을 채용하였다^{[6]~[10]}. 그림 1은 FDM(Frequency Division Multiplexing) 방식의 무선 주파수 할당을 보이고 있다. 수신기가 유휴 채널을 확보하기 위해 주파수 채널을 Channel 1에서 Channel n까지 스캔하게 되고, 각 채널의 채널 유휴 여부와 유휴 채널 존재 여부를 확인하는 과정을 거친다. 이 과정에서 타 간섭 채널에 의해 사용 채널의 수신이 불가능할 경우, 다시 채널의 스캔 과정을 통해 새로운 채널을 설정하는 과정을 반복하게 된다.

본 논문에서는 채널 인지 시스템의 구현을 위해 초재생 수신기(Super-Regenerative Receiver: SRR)의 자기 수신 방식을 활용한 시스템 아키텍처를 제안하였다. SRR은 초재생 발진기(Super-Regenerative Oscillator: SRO)를 기본

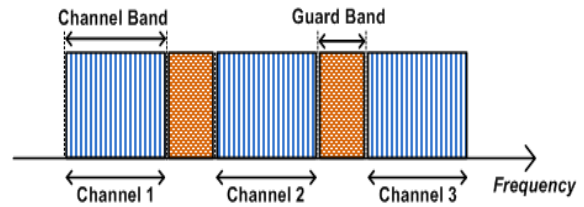


그림 1. 무선 주파수 채널 할당
Fig. 1. Wireless frequency channel allocation.

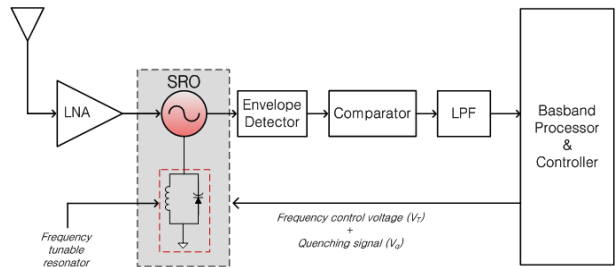


그림 2. 제안된 RF단 프로세싱에 의한 무선 채널 인지 시스템 구성도
Fig. 2. Block diagram of the proposed wireless spectrum sensing system using RF front-end processing.

개념으로 설계되며, 이는 지정된 채널 대역(locking range)에 들어오는 입력 스펙트럼 가운데, 자기 신호만을 동조하여 출력하게 된다. 입력 대역 내에 각 채널별 인지가 가능한 협대역 채널 형성과 채널 가변 능력을 제시하였다.

그림 2는 제안한 RF단 프로세싱에 의한 무선 채널 인지 시스템의 구성도이다. 제안된 시스템은 저잡음 증폭기(LNA)와 SRO, 포락선 검파기(envelope detector), 비교기(comparator)로 구성되어 있다. 안테나를 통해 수신된 신호는 2단으로 구성된 LNA에 의해 증폭이 되고, SRO로 입력된다. SRO는 채널 인지를 위해 버랙터 다이오드를 이용하여 주파수 가변 가능한 공진부를 설계하였다. 또한, 수신 디지털 데이터의 검출을 위하여 포락선 검파기와 비교기가 사용되었다.

III. RF단 프로세싱을 갖는 무선 스펙트럼 센싱 시스템 설계

본 장에서는 제안된 시스템의 상세 설계 및 동작에 대해 기술하였다. 그림 3은 제안된 시스템의 회로도를 보이

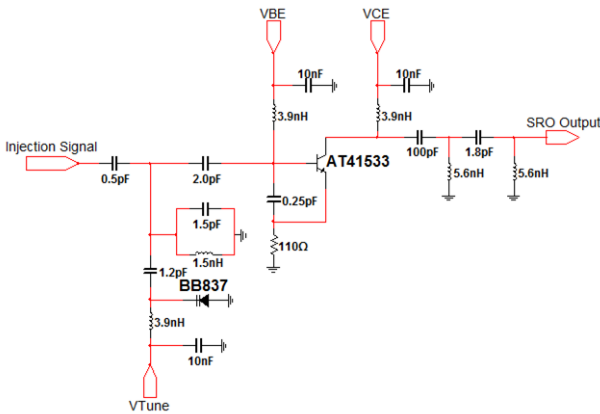


그림 3. 제안된 SRO 회로도
Fig. 3. Schematics of the proposed SRO.

고 있다. SRO는 Avago Technologies사의 AT-41533 트랜지스터로 사용하여 정파환(positive feedback) 루프로 구성하여 발진 조건을 설정하였으며, 주파수 가변 공진기는 LC-tank에 Infineon Technology사의 BB837 버랙터 다이오드를 사용하여 발진주파수가 가변이 가능하도록 설계하였다.

SRO는 주입동기 발진기의 원리로 구성되어 있다. 주입동기 발진기는 주입신호를 자유 발진하는 발진기의 입력에 인가하여 얻어지게 되는데, 안정한 입력신호가 주입되면 발진기는 안정화되고, 주입신호를 증폭하게 된다^[8]. SRO는 자유공진에 의한 발진과 입력된 신호에 의한 주입동기 발진시, 발진기의 출력신호가 발생하는 과도적(transient) 시간차가 발생하게 되는데, 이러한 시간차를 이용하여 그림 3의 BJT 트랜지스터 V_{CE} 전압을 인가하는 부분에 킨칭(quenching) 신호를 이용하여 SRO의 발진을 주기적으로 중지하게 된다^{[9][10]}.

SRO의 출력을 검파기가 검파할 수 있도록 트랜지스터 베이스 제어 전압인 V_{BE} 와 킨칭 신호의 레벨을 조절하여 threshold level에 맞추었다. 킨칭 신호의 주파수는 Nyquist 이론에 따라 데이터의 전송율의 2배 이상으로 설정하였다. 입력 신호는 신호발생기(Agilent N5191A)를 이용하여 펄스 변조 신호를 생성하여 시스템 수신 신호로 사용하였다. 포락선 검파기는 Analog Device사의 AD-8318로 구성하였으며, 비교기는 Analog Device사의 ADCMP563으로 구성하였다. SRO의 출력이 검파기에 입력되게 되면

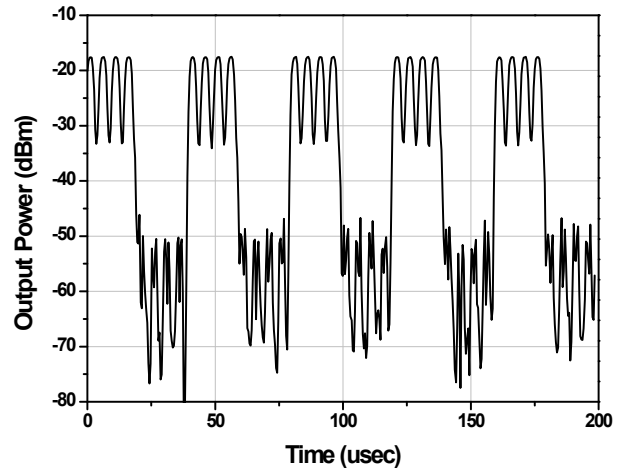


그림 4. 4배 킨칭 신호에 따른 SRO의 출력
Fig. 4. Measured SRO output for $\times 4$ sampled quenching.

포락선 검파기를 거쳐 복조되게 된다.

그림 4는 킨칭 신호에 따른 SRO의 수신출력을 보여주고 있다. 입력신호의 데이터율은 50 kbps이다. 이 때 킨칭 신호는 Nyquist 이론을 만족하는 데이터 전송율의 4배인 200 kbps로 설정하였다. 킨칭 신호가 입력 데이터 신호보다 4배 샘플링을 했기 때문에 신호가 “On”이 되었을 때 4개의 신호로 샘플링되는 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 SRO의 동기 입력 여부에 따른 출력 스펙트럼을 확인한 결과이다. SRO의 주파수 가변 제어 전압인

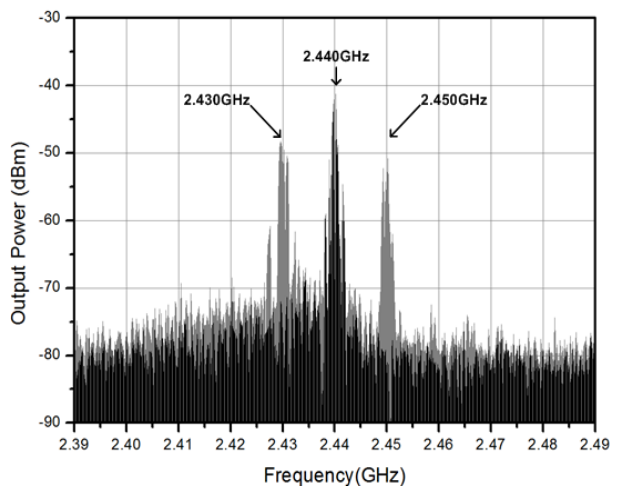


그림 5. 채널 동기 여부에 따른 SRO 스펙트럼 출력
Fig. 5. SRO output spectrum for channel selection.

V_{tune} 을 0.25 V로 인가하여 자유 발진 주파수를 2.443 GHz로 고정하였을 때, 2.440 GHz의 주파수를 입력한 결과, 동기 대역폭 내의 주파수로 동조되어 2.440 GHz에서 출력을 확인할 수 있다. V_{tune} 을 고정한 상태에서 주입동기대역 외의 주파수인 2.430 GHz, 2.450 GHz를 입력하면 비동조 발진을 하게 된다. 이때는 포락선 검파기가 검파할 수 없는 출력레벨을 갖는 스펙트럼이 나타나게 된다.

IV. 채널 인지 성능 평가

본 장에서는 다중 채널에 대한 제안 시스템의 채널 형성 및 채널 인지 성능을 평가하였다. 기존의 SRR 시스템은 저전력으로 대역 내의 신호 감지 및 복조를 수행할 수 있으나, 1개 채널이 차지하는 대역이 매우 넓어 다중 채널을 이용하는 FDM 방식을 시스템으로 응용이 불가능하였다. 본 논문에서는 다중 채널 응용을 위한 협대역 채널 형성과 채널 인지 능력을 평가하였다.

그림 6은 채널 형성 및 채널 인지 성능 평가를 위한 측정 셋업이다. 파형 발생기(Agilent 33220A)의 데이터율을 50 kbps로 설정하여 신호 발생기(Agilent N5181A)를 이용하여 2.4 GHz 대역의 펄스 변조 신호를 생성하였으며, 무선 채널의 감쇄와 수신 신호 전력 레벨의 측정을 위해 송수신단 사이에 가변 감쇄기와 방향성 결합기를 연결하였다. 10-dB 방향성 결합기를 사용하여 수신 신호 레벨을 실시간으로 전력 측정기(Agilent U2000A)를 통해 측정하면서 채널의 변화를 평가하였다. SRO의 출력을 측정하기 위해 SRO의 출력단으로 연결된 부분에 스펙트럼 분석기(Agilent N9344C)를 연결하였으며, 최종단 수신 디지털 신

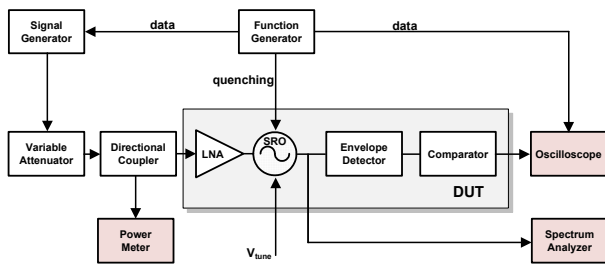


그림 6. 채널 인지 성능 평가를 위한 측정 셋업
Fig. 6. Measurement setup for performance evaluation of channel sensing.

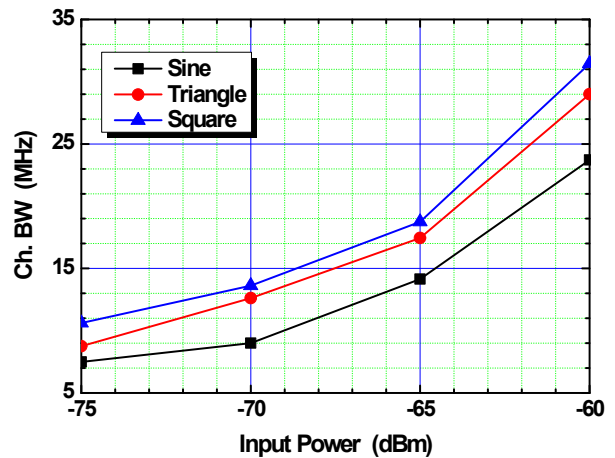


그림 7. 킨칭 신호의 파형에 따른 채널 대역폭 변화
Fig. 7. Channel bandwidth variation for various quenching signal shapes.

호를 측정하기 위해 오실로스코프를 연결하였다. 송신된 50 kbps 신호의 복원 확인을 위해 파형 발생기에서 생성된 신호는 분리하여 수신부 오실로스코프로도 연결되었다. 킨칭 신호의 데이터율은 200 kbps로 설정되었으며, SRO의 LC-tank 공진 주파수 변화를 위한 제어 전압과 비교기의 임계 전원 등의 제어 신호 등이 사용되었다.

그림 7은 각 채널별 검출 대역폭을 최소화하여 다수의 채널을 형성하기 위한 수신 인지 채널 최적화 실험의 결과를 보이고 있다. 수신 채널의 대역폭은 SRR 출력의 포락선을 구성하는 킨칭 신호의 파형에 영향을 받게 된다. 따라서 본 논문에서는 킨칭 신호의 파형을 변화시키면서 1개의 채널이 점유하는 대역폭의 변화를 수신 전력에 따라 분석하였다. 그림 7의 그래프에서 보이는 바와 같이, 채널 대역폭은 기존의 SRR 시스템이 사용하는 사각 펄스에 비해 사인파를 사용할 경우, 좁은 대역폭을 나타낼 수 있다. 이는 Fourier 변환에 의해 각 파형의 주파수 스펙트럼을 관찰하였을 때 나타나는 주 스펙트럼(main lobe)의 대역폭으로도 설명이 가능하다. 삼각파의 경우도 사각파와 비교하여 좁은 채널 대역을 나타내었으나, 사인파보다는 넓은 대역에서 수신됨을 알 수 있었다. 주파수 채널 에지(edge)에서는 샘플링되는 4개의 출력 신호가 점차 정상적인 복원이 되지 않는 것을 확인할 수 있는데, 최소 1개의 샘플링 신호가 정상적인 검출 신호의 진폭에 1/

2 미만이 되는 것을 정상 수신기의 임계점으로 설정하였다. 본 제안 시스템에서 채용한 펄스 변조 방식의 비트 수신 여부는 수신기 ADC의 에너지 검출 알고리즘에 따라 민감하게 선택되므로, 본 논문에서의 채널 대역폭 형성을 위한 비트 검출 기준은 상대적인 연구의 결과로 판단하여야 한다.

위 실험을 포함한 킨칭 신호 및 시스템 제어 신호의 추가적인 최적화를 통해 최소 채널 대역폭으로 설정된 5 MHz의 채널 간격을 갖는 시스템 채널 인지 성능 평가를 실험하였다. 평가 방법은 각 설정된 채널에 대해 인접 채널의 신호 인지 여부, 그리고 고정된 단일 채널 신호 입력에 대해 수신기 채널 설정에 의한 인접 채널 인지 여부로 평가하였다. 제안된 채널 인지 시스템은 설정된 주파수 채널의 스캔시 자기 신호에서는 채널 인지와 함께 복원 신호를 동시에 출력하도록 설계되어 있다. 따라서 인지된 동조 주파수 채널에 대해서는 입력된 신호의 복원 신호

가 입력되며, 그 외의 채널에서는 출력이 발생하지 않거나 복원되지 않는다. 이와 같은 채널 인지 성능을 그림 8에서 나타내었다.

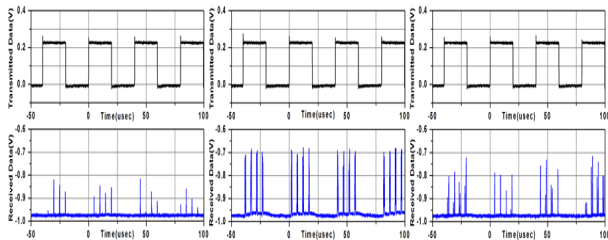
그림 8(a)는 수신기의 수신 채널을 중심주파수 2.427 GHz에 고정된 상태에서 입력되는 채널을 5 MHz 채널 간격으로 입력되었을 경우를 나타내고 있다. 인접채널인 2.422 GHz와 2.432 GHz의 입력 신호는 정상 복원이 어려운 상태로 수신된 반면, 동조 채널 신호는 완벽하게 복원된 4개의 샘플링 신호가 수신됨을 알 수 있다. 또한, 그림 8(b)는 2.427 GHz를 중심주파수로 하는 단일 채널이 수신될 경우, 수신기의 채널 동조에 따른 수신 성능을 평가하고 있다. 수신 동조가 일치하는 V_{tune} 의 전압이 0.25 V일 때는 완벽한 복원이 되고 있으나, 양측 인접 채널인 2.422 GHz와 2.432 GHz를 위한 수신 동조 제어 전압 $V_{tune}=0$ V와 0.50 V에서는 신호가 거의 검출되지 않는 것으로 확인되었다.

V. 결 론

본 논문에서는 RF 단에서의 프로세싱에 의한 스펙트럼 인지 수신기 시스템을 제안하였다. 제안된 무선 채널 인지 시스템은 수신 신호를 기저 대역으로 변환 복원하지 않고, 특정된 주파수 대역의 유효 신호 수신 시에만 검출 데이터가 출력되는 RF단 프로세싱에 의한 스펙트럼 센싱을 수행하였다. 또한, 킨칭 신호 및 시스템 설정의 최적화를 통한 최소 채널 대역폭 설정을 수행하였으며, 기존에 제시된 채널과 비교하여 2개 가까이 많은 채널수를 확보할 수 있음을 제시하였다. 제안된 시스템은 근거리 저전력 센서 네트워크에 응용되어 다수의 근거리 서비스가 혼재되어 있는 ISM 대역에서 기존의 스펙트럼 인지 기술보다 빠른 속도로 유휴 채널을 확보하는 기술을 채용함으로써 수신기의 저전력 소모와 주파수 스펙트럼의 효율을 극대화할 것으로 기대된다.

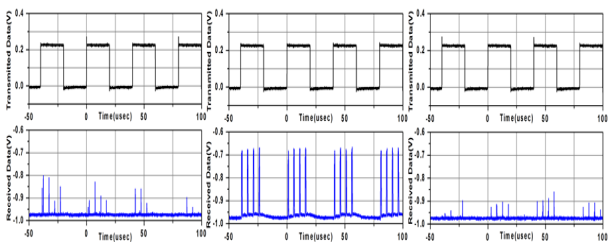
References

- [1] <http://www.ieee802.org/15/>
- [2] 김창주, "Cognitive Radio 기술 및 표준화 동향", 전자과학기술, 20(3), pp. 9-16, 2009년 5월.



(a) 수신 신호 채널 변경에 따른 채널 검출(수신 주파수=2.422 GHz, 2.427 GHz, 2.432 GHz)

(a) Spectrum sensing for received signal channel variation(Received freq.=2.422 GHz, 2.427 GHz, 2.432 GHz)



(b) 수신기 수신 채널 변경에 따른 데이터 검출($V_{tune}=0$ V, 0.25 V, 0.50 V)

(a) Spectrum sensing for receiver tuning-channel variation($V_{tune}=0$ V, 0.25 V, 0.50 V)

그림 8. 시스템 채널 인지 성능 평가

Fig. 8. System performance evaluation for channel cognition.

- [3] 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, Mar. 2014.
- [4] T. Dellsperger, T. Burger, L. Maurer, T. Christen, Am Mayer, S. Sital, D. Bateman, and M. Muck, "RF transceiver architecture for cognitive radio user equipment", *E2RII White Paper*, Jun. 2007.
- [5] S. -M. Han, W. -S. Yoon, Y. -S. Kim, K. Lee, J. Lee, and J. Lim, "Channel cognitive super-regenerative receiver system", in *Proc. Asia-Pacific Microw. Conf. 2011*, Melbourne, Australia, pp. 1350-1353, Dec. 2011.
- [6] E. Holzman, R. Robertson, *Solid-State Microwave Power Oscillator Design*, Artech House Publishers, 1922.
- [7] R. Adler, "A study of locking phenomena in oscillators", *Proc. IRE*, vol. 34, no. 6, pp. 351-357, Jun. 1946.
- [8] K. Kurokawa, "Injection locking of microwave solid-state oscillators", *Proc. IEEE*, vol. 61, no. 10, pp. 1386-1410, Oct. 1973.
- [9] F. X. Moncunill-Geniz, P. Pala-Schonwalder, and O. Mascals, "A generic approach to the theory of superregenerative reception", *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fund. Theory Appl.*, vol. 52, no. 1, pp. 54-70, Jan. 2005.
- [10] A. Vouilloz, M. Declercq, and C. Degollain, "A low-power CMOS super-regenerative receiver at 1 GHz", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 36, no. 3, pp. 440-451, Mar. 2001.

홍 준 기



2010년 2월: 순천향대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2013년 6월~현재: 순천향대학교 정보통신공학과 석사과정
 [주 관심분야] Low-power RF Transceivers, Microwave & RF Front-end System

한 상 민



1996년: 고려대학교 전파공학과 (공학사)
 1998년: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
 2003년: 고려대학교 전파공학과 (공학박사)
 2003년 10월~2004년 11월: 미국 University of California, Los Angeles(UCLA), Post-Doc. 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
 [주 관심분야] RF Systems, Low-Power Transceivers, Active Integrated Antennas