
센서노드용 RF 송수신기의 설계 파라미터

강상기* · 최흥택**

Design Parameters of a RF Transceiver for Sensor Nodes

Sanggee Kang* · Heungtaek Choi**

본 연구는 군산대학교 정보통신기술연구소의 부분적인 지원으로 수행되었음.

요 약

USN(Ubiquitous Sensor Network)을 이용한 많은 시범사업들이 진행되었으며, 최근에는 환경감시 분야에서 활용이 많은 관심을 받고 있다. USN의 센서노드로부터 정보를 획득하기 위해서는 RF 송수신기가 반드시 필요하다. 본 논문은 IEEE 802.15.4의 규격을 만족하면서 2.4GHz 대역에서 동작하는 센서노드용 RF 송수신기의 설계에 대해서 기술한다. 본 논문에는 구현하려는 송수신기의 구조와 IEEE 802.15.4의 요구 규격이 기술되어 있으며, 이 규격으로부터 도출된 RF 송수신기의 설계 파라미터로서 수신기의 잡음지수, 필터의 선택도, 주파수합성기의 위상잡음, 송신기의 선형성과 스펙트럼 마스크가 기술되어 있다.

ABSTRACT

Many pilot projects are developed using USN(Ubiquitous Sensor network). Recently USN has more attention to be used for the applications of circumstance monitoring. In order to acquire information from sensor nodes, sensor nodes need a RF transceiver. In this paper we describe the design of a RF transceiver, based on IEEE 802.15.4, for sensor nodes operating in 2.4GHz frequency band. The architecture to be implemented and the electrical performance specifications satisfied IEEE 802.15.4 are presented. The noise figure of a receiver, selectivity, phase noise of a frequency synthesizer, transmitter's linearity and spectrum mask are derived as a design parameters from the specifications of IEEE 802.15.4.

키워드

규격(Specification), 센서노드(Sensor Node), RF 송수신기(RF Transceiver), USN(Ubiquitous Sensor Network), IEEE 802.15.4

* 군산대학교

** (주)이엔에스 웨이브

접수일자 2009. 03. 11

심사완료일자 2009. 03. 31

I. 서 론

USN은 어디서나 센서를 통해서 수집된 센서주변의 상황 정보를 확인 할 수 있는 수단을 제공한다. USN은 단일망 또는 복합망으로 구성될 수 있기 때문에 사용자에 제공하고자하는 서비스에 따라서 시스템들의 규모는 상당히 다를 수 있다. 최근에는 USN의 활성화와 직접적인 시장의 창출을 위해서 시범서비스를 통한 연구개발이 많이 진행되고 있다[1]. 이와 같은 시범 서비스들은 모두 정보를 수집하기 위해서 센서노드를 이용한다. 본 논문에서는 센서노드를 SoC(System on Chip)화하기 위한 전단계로써 하이브리드 형태로 시스템을 구성하고, 시스템의 성능을 확인하기 위한 센서노드용 RF 송수신기의 설계에 대해서 기술한다.

누구나 쉽게 센서노드에서 획득한 정보를 수집할 수 있어야 하기 때문에 센서노드에서 이용하는 주파수는 사용자가 쉽게 접속할 수 있어야 한다. 우리나라의 경우 2.4 ~ 2.4835GHz 대역이 미국과 같이 ISM 대역으로 지정되지는 않았지만, 이 주파수 대역을 사용하기 위한 무선기기의 기술기준이 상당히 광범위하게 기술되어 있어, 무선기기의 출력이 10mW 이하라면 대부분의 디지털 통신시스템이 이 대역을 사용할 수 있다[2,3]. 따라서 본 논문에서도 2.4GHz 대역을 이용하는 RF 송수신기를 설계한다.

현재까지 발표된 규격 중에서 IEEE 802.15.4가 센서노드로써 이용이 가장 근접한 것으로 알려져 있는데, 그 이유로는 IEEE 802.15.4의 프로토콜이 간단하기 때문에 H/W의 구성이 용이하고, duty 또한 작아 소모 전력과 타 시스템에 미치는 간섭이 적으며, 네트워크를 구성할 수 있는 노드의 수가 많은 등 다른 규격 보다 센서노드로 활용성이 뛰어나기 때문이다[4]. IEEE 802.15.4는 MAC과 PHY에 대한 규격만 기술되어 있기 때문에 스택이 탑재되어야 원하는 서비스가 가능하다. 본 논문에서는 IEEE 802.15.4의 규격을 바탕으로 2.4GHz 대역의 RF 송수신기를 설계하기 위한 설계 파라미터를 도출한다.

II. 송수신기의 성능규격과 구조

IEEE 802.15.4에 기술된 RF 송수신기의 대표적인 전 기적 성능규격은 표 1과 같다. 표 1에서 최대송신전력은

국내 소출력 무선기기들의 출력을 고려해서 설정하였다. 표 1의 성능 규격을 만족하는 송수신기를 설계하기 위해서는 우선 송수신기 성능 규격으로부터 송수신기의 설계에 필요한 설계 파라미터를 도출해야하지만, 그 보다는 송수신기의 구조에 대한 검토가 선행되어야 한다.

향후 CMOS를 이용한 SoC를 위해서 송수신기의 구조는 low IF 방식으로 선택하였다. Low IF 구조는 A/D와 D/A의 성능 부담을 줄일 수 있으면서도 구조가 간단한 장점이 있다. 그러나 low IF 구조로 시스템을 설계하는 경우에는 점유주파수 대역폭(2MHz)과 채널간격(5MHz)을 고려해서 IF를 선정해야 한다. 부적절한 IF를 선택하게 되면, 그림 1에 나타난 것과 같이 인접채널에 의해서 생성되는 이미지 신호가 IF 대역에 원 수신신호와 중첩되어 나타난다. 따라서 이미지 신호에 의한 간섭이 발생되어 원하는 신호를 수신할 수 없다.

표 1. RF 송수신기의 전기적 성능규격
Table 1. Electrical performance specifications of RF transceiver

| 순번 | 항 목 | 내 용 |
|----|-----------|-------------------------|
| 1 | 전송방식 | TDD |
| 2 | 동작주파수 범위 | 2.4 ~ 2.4835GHz |
| 3 | 변조방식 | OQPSK |
| 4 | 수신전력 | -20 ~ -85dBm |
| 5 | 송신전력 | 0dBm ± 3dB(30dB 제어) |
| 6 | 대역폭(채널간격) | 2MHz(5MHz) |
| 7 | 대역내평탄도 | 0.5dB 이내 |
| 8 | 스퓨리어스 | -30dBm/100kHz |
| 9 | 수신채널 선택도 | 인접채널: 0dB 근접채널: 30dB |
| 10 | 주파수오차 | ± 40ppm |

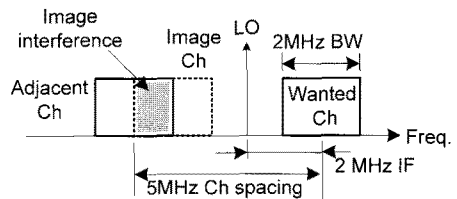


그림 1. 부적절한 IF 설정에 의한 간섭의 발생
Fig. 1. Interference occurred by an improperly selected IF

그림 1은 원하는 채널의 신호(Wanted Ch)가 IEEE 802.15.4에 기술된 중심주파수로 수신되며, 수신기의 LO는 2MHz IF가 되도록 설정되어 있는 경우로 수신신호의 주파수 하향변환 과정을 설명해준다. 그림 1과 같이 LO가 수신신호 보다 낮은 주파수에 위치하면 이미지 신호는 원 수신채널 보다 아래에 있게 된다. LO의 주파수가 원하는 수신신호의 주파수 보다 낮은 경우에는 주파수 하향변환 할 때 IF에서 원 수신신호의 주파수 역전 현상은 발생하지 않는다. 만약 IF를 1.5MHz로 설정하고, 주파수 하향변환 후에 저역통과여파기로 인접채널의 불필요한 신호들을 제거한다면, 그림 1과 같은 간섭문제는 제거할 수 있다. 그림 2는 이와 같은 관계를 보여주며, 인접채널 신호는 DC로부터 6.5MHz 떨어진 지점에 중심주파수가 있다. 이 인접채널 신호는 A/D 전단에서 제거되어야 한다. 인접채널 간섭에 의한 영향은 LO의 위상잡음의 영향이 가장 크지만, 수신기의 성능규격 중에서 인접채널과 근접채널 간섭에 대한 항목을 고려해서 그림 3과 같은 감쇄특성을 갖는 저역통과필터를 A/D 전단에 사용해야 한다.

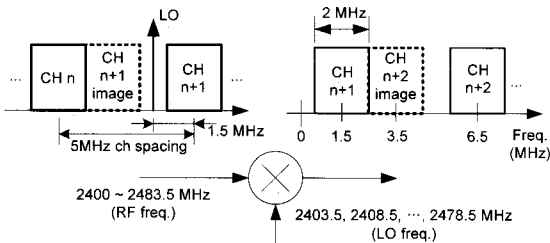


그림 2. 1.5MHz IF 주파수에서 주파수 하향변환
Fig. 2. Down conversion with 1.5MHz IF

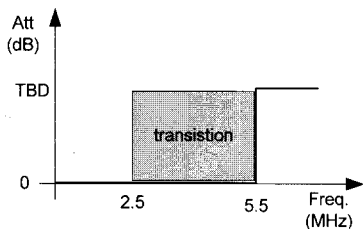


그림 3. A/D 전단의 저역통과필터의 감쇄특성
Fig. 3. Attenuation characteristics of low pass filter followed by A/D

III. 송수신기 설계 파라미터

가. 수신기의 잡음지수

수신기를 설계하기 위해서 가장 먼저 계산해야 할 파라미터는 수신기의 잡음지수와 잡음전력을 결정하는 것이다. IEEE 802.15.4에 기술된 수신 신호의 SNR에 대한 BER(Bit Error Rate)성능은 다음과 같다[4].

$$BER = \left(\frac{8}{15}\right) \times \left(\frac{1}{16}\right) \times \sum_{k=2}^{16} -1^k \binom{16}{k} e^{(20 \times SNR \times (1-k/k))} \quad (1)$$

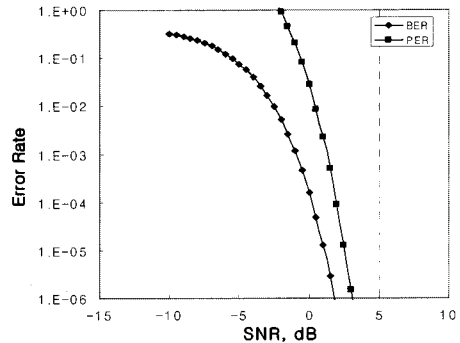


그림 4. 수신신호의 SNR에 대한 IEEE 802.15.4의 BER과 PER 특성
Fig. 4. BER and PER performance of IEEE 802.15.4 according to SNR of the received signal

BER을 PER(Packet Error Rate)로 변환하는 경우에는 패킷을 22byte로 설정하였다. 그림 4는 신호의 SNR에 따른 BER과 PER 시뮬레이션 결과이다. 그림 4에서 PER 1%는 대략 0.3dB 이상의 SNR에서 유지됨을 알 수 있지만, 여유도를 고려해서 1dB 이상의 SNR이 필요한 것으로 계산한다. 따라서 그림 4의 결과로부터 다음과 같이 수신기의 잡음지수를 계산할 수 있다.

$$-85dBm = 63dB + NF - 174dBm/Hz + (S/N)_{req} + M \quad (2)$$

여기서 대역폭은 2MHz, 최소수신 신호의 세기는 -85dBm이다. 3dB의 구현 마진(M)을 고려하면, 잡음지수(NF)는 22dB이며, 이 경우 잡음전력은 -86dBm이다.

수신기의 잡음전력은 IEEE 802.15.4에 기술된 다른 시험 항목으로부터 수신기 설계에 필요한 설계파라미터를 도출하는 기준이 되기 때문에 중요하다.

나. 주파수합성기의 성능과 수신선택도

송수신기의 성능규격을 기술한 표 1에서 주파수 오차는 ±40ppm이며, 이 값은 2.4GHz 대역에서 ±96kHz로 상당히 완화된 규격이다. 주파수합성기의 위상잡음과 필터의 선택도는 수신채널 선택도로부터 유추할 수 있다.

수신기의 잡음지수는 수신기의 입력단에서 S/N과 출력단에서 S/N의 비로 계산된다. 만약 수신기 자체의 잡음지수에 의한 잡음전력 이외에 다른 간섭원에 의해서 잡음전력이 증가한다면, 수신기의 최소수신감도는 악화된다. 수신기의 선택도 시험에서는 수신기의 입력단에 원 수신신호와 간섭(인접채널 또는 근접채널)신호를 인가하기 때문에 수신감도보다 큰 신호가 수신기에 인가되어야 원하는 성능을 갖게 된다. 즉 선택도 시험에서는 원 수신신호의 크기를 3dB 증가시키도록 되어 있는데, 그 이유는 인접채널 또는 근접채널 신호에 의한 간섭잡음 전력이 수신기의 잡음지수에 의한 잡음전력 만큼 추가되기 때문이다. 인접채널 또는 근접채널 신호에 의해서 추가되는 간섭잡음의 발생은 수신 주파수합성기의 위상잡음과 주파수 하향 변환된 이후에 사용되는 여파기의 선택도에 의해서 결정된다. 따라서 선택도 시험에서는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$N_{NF} + N_{PN} + N_{Sel} \leq -83dBm \quad (3)$$

여기서 N_{NF} 는 수신기의 잡음지수에 의한 잡음전력, N_{PN} 는 주파수합성기의 위상잡음에 의한 잡음전력 그리고 N_{Sel} 는 주파수 변환된 다음에 여파기로 제거되지 않은 신호에 의한 잡음전력을 의미한다. 따라서 N_{PN} 과 N_{Sel} 은 인접채널 시험에서 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$N_{PN} = -82dBm + PN + 63dB \quad (4)$$

$$= -19dBm + PN$$

$$N_{Sel} = -82dBm - Sel \quad (5)$$

여기서 PN 은 위상잡음, Sel 은 여파기의 선택도이다. 따라서 식 (3)은 다음과 같이 전력으로 표현된다.

$$10^{-8.6} + 10^{\frac{-19 + PN}{10}} + 10^{\frac{-82 - Sel}{10}} \leq 10^{-8.3} \quad (6)$$

동일한 방법으로 근접채널에 대해서는 다음과 같은 관계가 있다.

$$N_{PN} = -52dBm + PN + 63dB \quad (7)$$

$$= 11dBm + PN$$

$$N_{Sel} = -52dBm - Sel \quad (8)$$

$$10^{-8.6} + 10^{\frac{11 + PN}{10}} + 10^{\frac{-52 - Sel}{10}} \leq 10^{-8.3} \quad (9)$$

식 (6)와 식 (9)를 만족하는 N_{PN} 과 N_{Sel} 는 각각 그림 5와 그림 6과 같은 특성을 갖는다. 그런데 그림 5와 그림 6은 각각 중심주파수로부터 ±5MHz와 ±10MHz에서의 위상잡음 성능이기 때문에 주파수합성기의 위상잡음이 아니라 VCO의 위상잡음으로 생각해야 한다. 또한 10MHz는 5MHz와 비교해서 2배의 주파수 이격밖에 되지 않기 때문에 그림 5와 그림 6으로부터 VCO는 중심주파수로부터 5MHz 주파수 이격에서 -120dBc/Hz 이하의 위상잡음 특성을 가져야 함을 알 수 있다. 따라서 이와 같은 위상잡음을 기준으로 하면, 여파기의 선택도는 5MHz 주파수 이격에서 4dB 이상, 10MHz 주파수 이격에서 34dB 이상의 감쇄가 있어야 한다. 이와 같은 감쇄특성을 갖는 저역통과여파기의 특성은 그림 7과 같다. 그림 7은 그림 3의 주파수특성을 인접채널 및 근접채널 시험으로부터 유추한 결과이다.

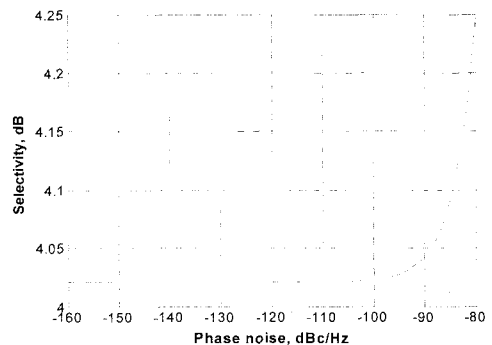


그림 5. 인접채널로부터 계산된 위상잡음과 선택도
Fig. 5. Phase noise and selectivity calculated from adjacent channel selectivity

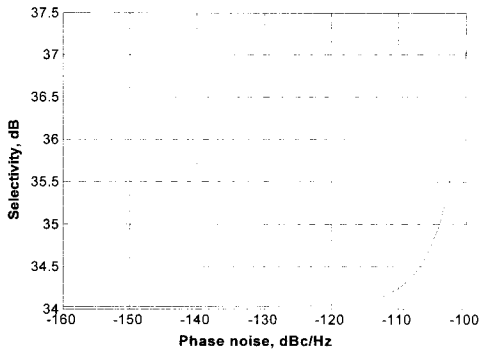


그림 6. 근접채널로부터 계산된 위상잡음과 선택도
Fig. 6. Phase noise and selectivity calculated from alternate channel selectivity

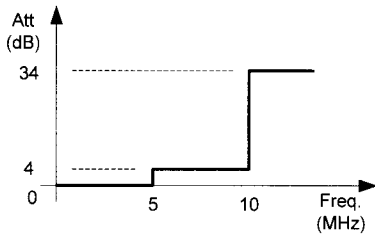


그림 7. 저역통과필터의 감쇄특성
Fig. 7. Attenuation characteristics of low pass filter

다. 송신기의 출력과 선형성

출력 신호의 왜곡을 줄이기 위해서는 송신 경로를 구성하는 개개의 소자들의 입/출력 단자에서 신호의 PAPR(peak-to-average power ratio)이 동일하게 유지되어야 한다. 신호의 PAPR은 디지털 기저대역 신호의 통계적 특성에 의해서 결정되며, IEEE 802.15.4의 2.4GHz 규격을 따르는 경우 송신 신호는 등포락선이며, MSK(변조지수=0.5) 변조와 같은 특성을 갖는다. IEEE 802.15.4에서는 half sine으로 파형 성형한 OQPSK 변조를 하며, 이 신호는 두개의 CW 신호의 합 보다 침두 전력의 값이 작기 때문에 PAPR은 3dB 미만이다. 따라서 송신기의 선형성은 2-톤 IMD(Intermodulation Distortion)가 45dBc 이상 유지하면 선형적인 것으로 생각할 수 있다[5].

송신스펙트럼 마스크의 규정은 표 2와 같다. 표 2의 스펙트럼 마스크의 규격은 그림 8과 같은 스펙트럼 특성을 갖는다. 그림 8에서는 상대값을 표현하기 위한 기준 전력을 0dBm로 설정하였다.

표 2. 스펙트럼 마스크
Table 2. Spectrum Mask

| 주파수 | 상대규격 | 절대규격 |
|---------------------------|--------------|---------------|
| $ f-f_c > 3.5\text{MHz}$ | -20dB/100kHz | -30dBm/100kHz |

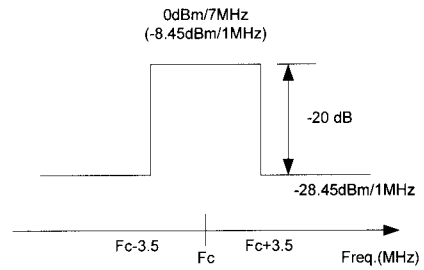


그림 8. 스펙트럼 마스크
Fig. 8. Spectrum mask

지금까지 송수신기의 구조, IF 주파수, 수신기 잡음지수, 선택도, 주파수 합성기의 위상잡음, 송신기의 선형성 등을 기술하였다. 기술한 RF 송수신기의 설계 파라미터를 정리하면 표 3과 같다.

표 3. RF 송수신기 설계 파라미터
Table 3. Design parameters of a RF transceiver

| 구분 | 항목 | 내용 |
|---------|----------|-------------------|
| 일반 규격 | 전송방식 | TDD |
| | 동작주파수 범위 | 2.4 ~ 2.4835GHz |
| | 변조방식 | OQPSK |
| | 송수신기구조 | Low IF(IF 1.5MHz) |
| | 대역폭 | 2MHz |
| 송신기 | 채널간격 | 5MHz |
| | 최대송신전력 | 0dBm ± 3dB |
| | 송신전력가변범위 | 30dB, 1dB step |
| 수신기 | 스퓨리어스 | 그림 8 |
| | 잡음지수 | 22dB |
| 주파수 합성기 | 여파기감쇄특성 | 그림 7 |
| | 주파수안정도 | ±40ppm |
| | 위상잡음 | -120dBc/Hz(@5MHz) |

IV. 결론

본 논문에서는 IEEE 802.15.4를 기반으로 2.4GHz 대역에서 동작하는 RF 송수신기의 설계 파라미터를 도출하였다. Low IF를 RF 송수신기의 구조로 결정하였으며, 수신기의 잡음지수, 여파기의 선택도, 송신기의 선형성, 스펙트럼 마스크, 주파수합성기의 위상잡음을 계산하였다. 본 논문에서 기술한 설계 파라미터는 2.4GHz 센서노드용 RF 송수신기의 설계에 직접 적용이 가능하며, 설계 과정은 타 시스템의 송수신기의 설계에 유용하게 활용될 수 있다.

참고문헌

- [1] 한국정보사회진흥원, 2007년도 RFID/USN 사업추진 현황, 2007.
- [2] FCC, Part 15 - Radio Frequency Devices, Feb. 2006.
- [3] 방송통신위원회고시 제 2008-74호: 신고하지 아니하고 개설했을 수 있는 무선국용 무선기기
- [4] IEEE Std 802.15.4b, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs), 2005.
- [5] Sanggee Kang, Bongkyum Kim and Kisuk Yoo, "Review of IS-97 in the RF Designer's point of view", CIC '98, pp. 559 - 562, 1998.

저자소개



강 상 기(Sanggee Kang)

1988년 단국대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년 삼성반도체통신
 1989 ~ 1992년 해군통신장교

1994년 단국대학교 전자공학과(공학석사)
 2004년 충남대학교 전파공학과(공학박사)
 1994 ~ 2005년 한국전자통신연구원 선임연구원
 2005년 ~ 현재 군산대학교 전자정보공학부 조교수
 ※ 관심분야: RF/MW 부품 및 시스템



최 흥 택(Heungtaek Choi)

1984년 고려대학교 전자공학과 (공학사)
 1986년 고려대학교 통신공학과 (공학석사)

1994 고려대학교 통신공학과(박사수료)
 1987 ~ 1994년 한국전자통신연구원 선임연구원
 1995 ~ 1997년 코오롱그룹 부장
 1997 ~ 2000년 팬택 & Motorola 부장
 2000 ~ 2003년 (주)아이티모바일 대표이사
 2004 ~ 2005년 (주)아이티모바일시스템즈 대표이사
 2006 ~ 2008년 BcNE Global 전무이사
 2008 ~ 현재 (주)이엔에스 웨이브 전무이사
 ※ 관심분야: RF/MW 부품 및 시스템, 이동통신