
센서노드용 RF 송수신기의 구현

강 상 기* · 최 흥 택**

Implementation of a RF Transceiver for Sensor Nodes

Sanggee Kang* · Heungtaek Choi**

본 연구는 군산대학교 정보통신기술연구소의 부분적인 지원으로 수행되었음.

요 약

교량감시, 문화재감시, 하천감시, 노약자보호, 도시관제 및 환경감시 등 많은 분야에서 USN(Ubiquitous Sensor Network)을 이용한 서비스가 시작되고 있고, USN을 구현하기 위해서는 RF 송수신기가 반드시 필요하다. 본 논문은 2.4GHz 대역에서 동작하는 센서노드용 RF 송수신기의 설계 및 제작에 대해서 기술한다. RF 송수신기의 설계과정으로 AGC의 범위 설정과 송수신기의 설계 과정이 기술되어 있다. 또한 설계된 RF 송수신기를 제작하여 성능을 시험하였으며, 수신감도, 동작범위, 주파수 안정도, 위상잡음, 송신전력, 송신대역평탄도와 스펙트럼 마스크의 측정 결과가 기술되어 있다.

ABSTRACT

USN(Ubiquitous Sensor Network) is used to provide many services such as bridge monitoring, cultural properties monitoring, river monitoring, protection of an old and feeble person, management and control of a city and circumstance monitoring, etc. A RF transceiver is needed for implementing USN. In this paper the implementation and the design of a RF transceiver for sensor nodes operating in 2.4GHz frequency band are presented. The design procedure of AGC, a receiver and a transmitter is described. And the performance of the implemented RF transceiver is also tested. The test results of receiver sensitivity, receiver dynamic range, frequency stability, phase noise, output power of transmitter, flatness and spectrum mask are presented.

키워드

RF 송수신기(RF Transceiver), 센서노드(Sensor node), USN(Ubiquitous Sensor Network)

* 군산대학교
** (주)이엔에스 웨이브

접수일자 2009. 03. 11
심사완료일자 2009. 03. 26

I. 서 론

IEEE 802.15.4에 기술된 규격으로부터 2.4GHz에서 동작하는 센서노드용 RF 송수신기의 설계 파라미터는 참고문헌 [1]에서 도출하였다. 도출된 설계 파라미터로써 송수신기는 low IF 구조를 이용하며, IF 주파수는 1.5MHz로 결정하였다. 수신기의 수신감도를 만족하기 위한 수신기의 잡음지수를 계산하였고, 여파기의 선택도와 LO의 위상잡음을 계산하였다. 그리고 송신기의 최대출력을 설정하였으며, 이를 기준으로 송신기의 방사규격을 만족하는 마스크 특성을 계산하였다.

본 논문은 참고문헌 [1]의 다음 단계로써 도출된 설계 파라미터를 만족하도록 RF 송수신기를 설계하고 제작한 RF 송수신기와 그 시험결과를 기술한다.

II. 송수신기 설계

수신기는 -85dBm ~ -20dBm의 동작범위를 가져야 한다. A/D 변환기는 A/D 변환기에 인가되는 기준전압에 따라서 입력받을 수 있는 신호의 최대전압이 달라지지만, 일반적으로 2Vpp의 신호를 인가받는다. 그림 1은 수신기에 인가되는 신호의 전력범위를 수용하기 위한 AGC 범위와 A/D 변환기의 SNR을 요약해서 표현한 것이다. 그림 1에서 -85dBm ~ -20dBm의 입력신호는 AGC를 통해서 -26dBm로 출력이 고정된 신호가 출력되며, -26dBm의 신호는 A/D 변환기의 성능을 최대화하기 위해서 30dB 증폭된 후 A/D에 인가된다. 따라서 A/D의 입력은 4dBm(1Vpp)이 인가된다. 통상적으로 A/D의 입력은 입력신호의 첨두값이 잘리는 것(clipping)을 방지하기 위해서 1bit 정도 여유를 두고 인가한다. A/D의 1bit는 전력으로 6dB의 값을 갖기 때문에 그림 1과 같은 동작범위를 갖는 A/D는 2Vpp를 가지며, 1bit의 여유가 있는 것으로 생각할 수 있다. 또한 그림 1에서는 A/D 변환기의 SNR을 69dB로 설정하였는데, 이 경우 표분화정리를 만족하는 A/D의 bit수는 12bit이다. 그림 1에서는 65 dB의 AGC 범위를 갖는 것으로 계산되어 있지만, 실제 사용하는 소자에 따라서 AGC의 범위는 줄어들 수 있다. 실제 사용한 소자의 AGC 범위는 45dB 정도가 되도록 하였기 때문에 수신기의 구성에서는 AGC 전단에 20dB 이득을 갖는 증폭

기를 추가하였다.

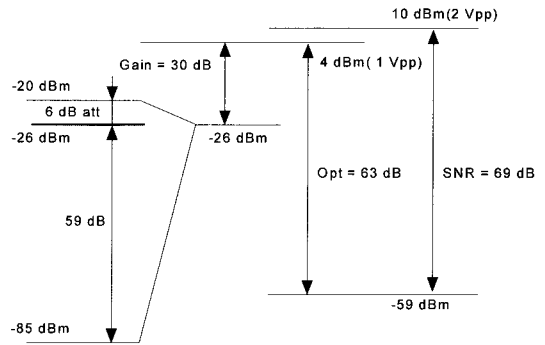


그림 1. 수신기의 AGC와 A/D 동작범위
Fig. 1. AGC and A/D range of the receiver

표 1은 수신기의 link budget 계산 결과이고, 표 2는 송신기의 link budget 계산 결과이다. 표 1은 복조기 전단까지 이득은 21.3dB이며, 복조기 다음에는 기저대역 증폭기가 30dB의 이득을 갖도록 설계되었음을 보여준다. 표 1의 복조기의 AGC 범위는 약 45dB 정도이다. 표 1에서 수신기의 선형성은 -85dBm을 수신할 때, 복조기에서 가장 많이 악화되며, 2-톤 IMD가 44.6dBc로 계산되었다. 일반적인 경우 입력신호의 전력이 큰 경우 선형성이 악화되지만, AGC의 경우에는 낮은 전력이 입력되면 이득을 높여 주어야 하기 때문에 큰 신호가 입력될 때 보다 낮은 전력이 입력될 때 선형성이 악화된다. 표 1에는 이와 같은 AGC의 특징이 잘 나타나 있으며, 2-톤 IMD가 45dBc 정도를 유지하는 경우 수신 성능에 큰 영향이 없을 것으로 판단한다[2]. 표 1에서 수신기의 잡음지수는 입력신호가 -20dBm이 인가되는 경우 9.9dB로 계산되었는데, 입력신호가 큰 경우에 AGC는 감쇠특성을 갖기 때문에 입력신호가 작을 때보다 잡음지수는 악화된다. 표 1에서는 -85dBm이 수신되는 경우와 비교해서 잡음지수는 1dB 악화되었다. A/D에 입력전력은 3dBm으로 계산되었는데, 수신기의 link budget에서 소자들의 이득을 최소값으로 계산하였기 때문이며, 이 값은 AGC 정밀도(± 3 dB) 범위 이내의 값이다.

송신기에는 출력전력의 가변을 위해서 1dB 간격으로 30dB 이상 가변범위를 갖는 가변감쇠기를 사용하였고, 계산된 최대 출력전력은 3.3dBm이다. 송신기의 선형성이 가장 열화되는 위치는 증폭기의 출력단에 위치한 스

위치로 62.1dBc의 2-톤 IMD를 갖는 것으로 계산되었으며, 수신기와 마찬가지로 45dBc 이상이므로 이 값은 선형성에 문제가 없는 것으로 판단된다. 송수신기는 모두 5V 전원을 사용하도록 구성되었으며, 소모전류는 수신기가 565mA, 송신기가 540mA 정도를 소모하는 것으로 계산되었다. 그림 2는 표 1과 표 2에서 계산된 소자들로 구성된 RF 송수신기의 블록도이다.

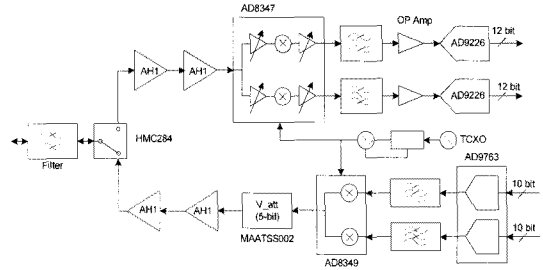


그림 2. 송수신기의 블록도
Fig. 2. Block diagram of the designed transceiver

표 1. 입력전력이 (a) -85dBm, (b) -20dBm 인 경우 수신기의 link budget
Table 1. Link budget (a) -85dBm and (b) -20dBm input power of the designed receiver

구분	Ant Port	Filter	SW (HMC284)	LNA (AH1)	LNA (AH1)	Demodulator (AD8347)	IF Filter	Demo (BB amp)	A/D (AD9226)	Digital Output
입력전력(dBm)	-85	-85	-86.7	-87.7	-75.7	-63.7	-26	-27	3	3
출력전력(dBm)	-	-86.7	-87.7	-75.7	-63.7	-26	-27	3	3	3
Comp. NF(dB)	-	1.7	1	3	3	11	1	-	-	-
Cas. NF(dB)	-	1.7	2.7	5.7	5.8	5.9	5.9	-	-	8.9
Comp. Gain(dB)	-	-1.7	-1	12	12	37.7	-1	30	0	0
Cas. Gain(dB)	-	-1.7	-2.7	9.3	21.3	59	58	88	-	-
Comp. IIP3(dBm)	-	100	49	29	29	-25	100	-	48	-
Cas. IIP3(dBm)	-	100	50.0	17.0	16.7	-62.7	-25.0	-	48.0	-
Linearity(dBc)	-	-	270.0	204.0	203.5	44.6	120.0	-	90.0	-
입력전압(V)	-	-	5	5	5	5	5	-	5	5
소모전류(mA)	-	-	-	150	150	65	-	-	100	565

(a) -85dBm input power

구분	Ant Port	Filter	SW (HMC284)	LNA (AH1)	LNA (AH1)	Demodulator (AD8347)	IF Filter	Demo (BB amp)	A/D (AD9226)	Digital Output
입력전력(dBm)	-20	-20	-21.7	-22.7	-10.7	1.3	-26	-27	3	3
출력전력(dBm)	-	-21.7	-22.7	-10.7	1.3	-26	-27	3	3	3
Comp. NF(dB)	-	1.7	1	3	3	11	1	-	-	-
Cas. NF(dB)	-	1.7	2.7	5.7	5.8	5.9	6.9	-	-	9.9
Comp. Gain(dB)	-	-1.7	-1	12	12	-27.3	-1	30	0	0
Cas. Gain(dB)	-	-1.7	-2.7	9.3	21.3	-6	-7	23	-	-
Comp. IIP3(dBm)	-	100	49	29	29	11	100	-	48	-
Cas. IIP3(dBm)	-	100	50.0	17.0	16.7	28.5	11.0	-	48.0	-
Linearity(dBc)	-	-	140.0	74.0	73.5	97.0	62.0	-	90.0	-
입력전압(V)	-	-	5	5	5	5	5	-	5	5
소모전류(mA)	-	-	-	150	150	65	-	-	100	565

(b) -20dBm input power

표 2. 송신기의 link budget
Table 2. Link budget of the designed transmitter

구분	D/A (AD9763)	Modulator (AD8349)	Dig-att (MAAT55002)	Amp (AH1)	Amp (AH1)	SW (HMC284)	Filter	Ant Port
입력전력(dBm)	-	-	-15	-18	-6	6	5	-
출력전력(dBm)	-	-15	-18	-6	6	5	3.3	3.3
Comp. Gain(dB)	-	-	-3	12	12	-1	-1.7	-
Cas. Gain(dB)	-	-	-3	9	21	20	18.3	18.3
Comp. OIP3(dBm)	-	19	43	41	41	48	100	-
Cas. OIP3(dBm)	-	-	16.0	27.8	37.3	36.1	34.4	34.4
Linearity(dBc)	-	68	68.0	67.6	62.7	62.1	62.1	62.1
입력전압(V)	5	5	5	5	5	5	-	5
소모전류(mA)	90	150	-	150	150	-	-	540

III. 시험 결과

가. 수신기의 잡음지수와 동작범위

수신기의 최소수신전력은 수신기의 잡음지수에 의해서 결정된다. 수신기의 잡음지수가 22dB 이하이면, 수신기의 SNR은 1dB 이상이 되어야한다[1]. 따라서 수신기에 -85dBm의 CW 신호를 인가하고 A/D 전단에서 SNR을 측정함으로써 수신기의 잡음지수를 측정하는 방법을 사용할 수 있다. 또한 2400 ~ 2483.5MHz의 주파수 범위에서 만족여부를 확인하기 위해서 전체의 동작 주파수 범위를 3개의 주파수로 구분하여, 2405MHz, 2450MHz 그리고 2480MHz에서 측정하였다. 그리고 -20dBm ~ -85dBm의 동작범위를 확인하기 위해서 -20dBm의 신호가 수신기로 인가되는 경우에도 수신기의 SNR이 유지되는 측정하였다.

그림 3은 2450MHz에 -85dBm의 CW가 되었을 때, A/D 전단에서 SNR이 29.025dB로 측정되었음을 보여준다. 그림 4는 -20dBm이 인가되었을 때 이며, SNR은 41.536dB로 측정되었다. 당연한 결과이지만 입력신호가 커질수록 SNR은 증가한다.

- 수신 선택도

수신기의 선택도는 원 수신 신호보다 더 큰 간섭신호가 원 신호와 가까이 있는 경우에 이 간섭신호에 의해서 수신 성능이 저하되는데, 수신 선택도는 그 영향을 측정하는 것이다. 수신 선택도 측정에서 수신기의 성능 저하에 가장 큰 영향을 미치는 것은 수신기의 LO 특성이며, 그 다음으로는 IF 여파기의 감쇠특성과 수신기의 비선형 특성이 수신 성능에 영향을 준다. IEEE 802.15.4에서는 수신 선택도를 인접채널과 근접채널 선택도 시험으로 구분하고 있으며, 원 수신신호의 주파수에서 +/- 5MHz와 +/-10MHz 떨어진 주파수에 간섭신호를 인가했을 때 수신기의 성능변화를 측정한다. +/- 5MHz 주파수 이격에서는 원 수신신호와 동일한 전력을 갖는 간섭신호를 인가하며, +/-10MHz 주파수 이격에서는 원 수신신호 보다 30dB 더 큰 간섭신호를 인가한다. 그림 5와 그림 6은 원 신호로부터 각각 -5MHz 그리고 +5MHz 이격된 주파수에 간섭신호를 인가했을 때, SNR이 각각 26.641dB와 26.149dB로 측정되었음을 보여준다. 원 신호로부터 각각 -10MHz 그리고 +10MHz 이격된 주파수에 간섭신호를 인가했을 때의 측정결과를 그림 7

과 그림 8이며, SNR이 각각 27.575dB와 27.258dB로 측정되었다.

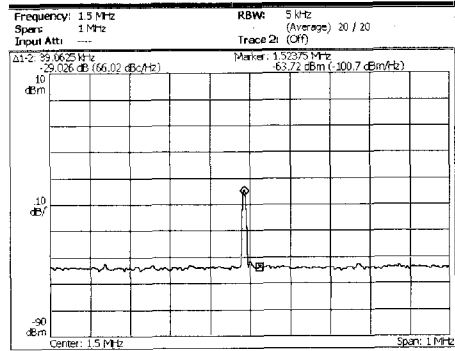


그림 3. -85dBm(@2450MHz) 입력시 SNR
Fig. 3. SNR of -85dBm input signal at 2450MHz

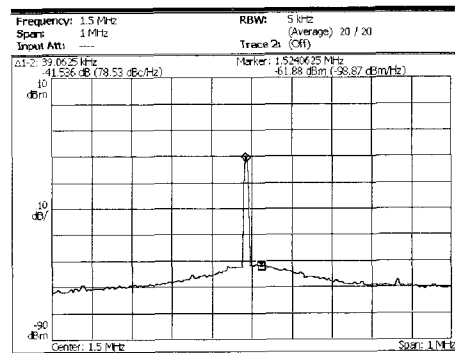


그림 4. -20dBm(@2450MHz) 입력시 SNR
Fig. 4. SNR of -20dBm input signal at 2450MHz

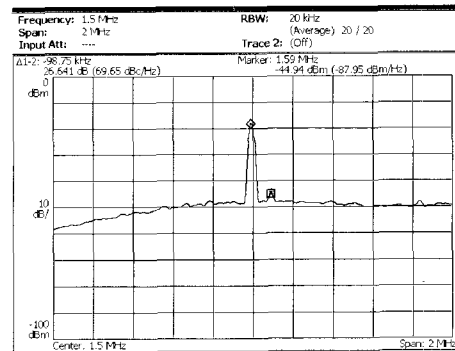


그림 5. -82dBm(@2445MHz) 간섭과 -82dBm(@2450MHz) 수신신호가 존재할 때 SNR
Fig. 5. SNR of -82dBm input signal at 2450MHz with adjacent channel interference of -82dBm at 2445MHz

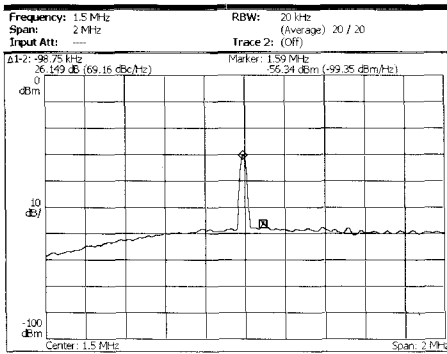


그림 6. -82dBm(@2455MHz) 간섭과 -82dBm(@2450MHz) 수신신호가 존재할 때 SNR

Fig. 6. SNR of -82dBm input signal at 2450MHz with adjacent channel interference of -82dBm at 2455MHz

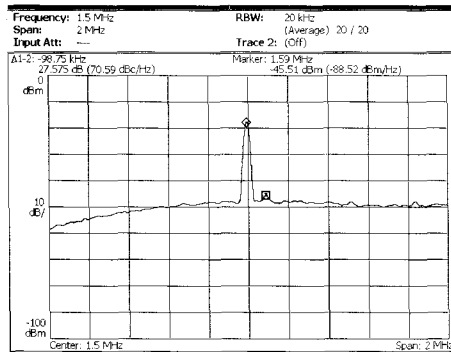


그림 7. -52dBm(@2440MHz) 간섭과 -82dBm(@2450MHz) 수신신호가 존재할 때 SNR

Fig. 7. SNR of -82dBm input signal at 2450MHz with adjacent channel interference of -52dBm at 2440MHz

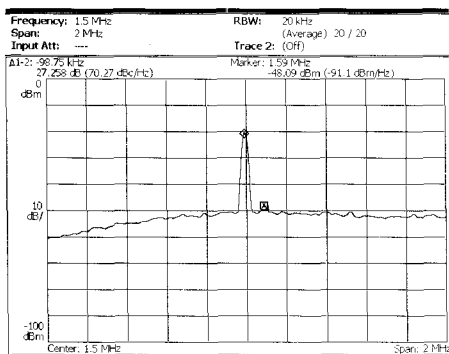


그림 8. -52dBm(@2460MHz) 간섭과 -82dBm(@2450MHz) 수신신호가 존재할 때 SNR

Fig. 8. SNR of -82dBm input signal at 2450MHz with adjacent channel interference of -52dBm at 2460MHz

나. 송신기

- 최대출력 전력 및 출력가변 범위

송신기의 출력과 스펙트럼 마스크의 측정을 위해서 matlab으로 IEEE 802.15.4 신호를 생성하였다. Matlab으로 생성한 데이터는 시험용 기저대역신호처리부에 포팅 후, 출력전력과 스펙트럼 마스크 측정용 신호원으로 사용하였다. 그림 9는 matlab으로 생성한 신호의 시물레이션 스펙트럼이다. 그림 10은 최대 출력전력을 측정한 것이며, 중심주파수 2450MHz에서 -0.61dBm으로 측정되었다. 그림 10의 스펙트럼이 분해능이 그림 9보다 낮은 이유는 시험용 기저대역 처리부의 메모리 크기가 작아 많은 데이터를 포팅한 신호를 생성할 수 없었기 때문이나, 송신기의 시험에는 큰 영향이 없었다. 그림 11은 30dB 감쇄시 출력전력이며, 이때 출력전력은 -30.77dBm으로 측정되었다.

- 스펙트럼 마스크

스펙트럼 마스크는 100kHz 분해능으로 측정하며, 그림 12는 스펙트럼 마스크의 측정결과이다. 그림 12로부터 $|f - f_c| > 3.5\text{MHz}$ 인 주파수 영역에서 -30dBm/100kHz 이하임을 알 수 있다.

- 송신대역 평탄도

송신대역 평탄도가 좋지 않은 경우에는 I, Q데이터가 찌그러지기 때문에 복조 성능이 악화된다. 송신대역 평탄도는 CW 신호의 출력으로 시험할 수 있다. 그림 13은 송신대역 평탄도를 측정한 결과이며, 관심주파수 대역인 2MHz 대역내에서 0.355dB의 평탄도를 유지함을 알 수 있다.

다. 주파수합성기

주파수 합성기의 성능은 주파수 안정도와 위상잡음 특성으로 나타낸다. LO의 주파수 안정도는 LO가 사용하는 기준주파수의 안정도에 의해서 결정되기 때문에 그림 14와 같이 기준주파수의 주파수를 측정하였다. RF 송수신기에서는 16MHz 기준주파수를 사용하였으며, 그림 14로부터 103Hz의 오차가 있음을 알 수 있다. LO는 주파수가 높을수록 성능이 열화된다. 때문에 원 송수신 신호의 주파수가 2480MHz일 때, 실제 LO의 주파수는 2478.5MHz이지만, LO를 2480MHz로 설정하고 주파수 안정도와 위상잡음을 측정하였다. 2480MHz는

16MHz의 155배이기 때문에 16MHz 기준주파수의 오차인 103Hz는 2480MHz에서 15.965kHz의 오차로 측정될 수 있다. 그림 15는 LO를 2480MHz로 설정하고 주파수 안정도와 위상잡음을 측정한 것으로 주파수 오차는 8.234kHz이며, 위상잡음은 100kHz 주파수 이격에서 -111.57dBc/Hz로 측정되었다. 그림 15의 측정에서 1MHz 이격주파수에서 위상잡음은 약 -130dBc/Hz이므로 5MHz 주파수 이격에서 -120dBc/Hz는 충분히 만족함을 알 수 있다.

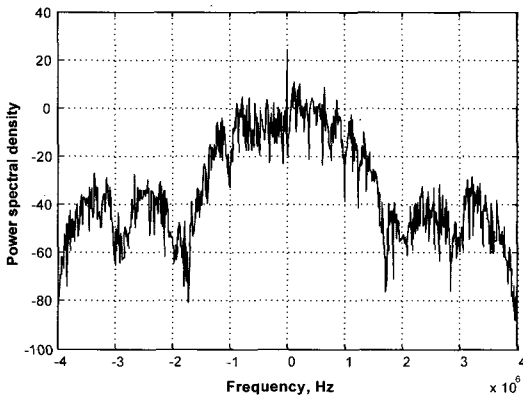


그림 9. 송신신호의 시뮬레이션 스펙트럼
Fig. 9. A simulated signal spectrum of transmitter

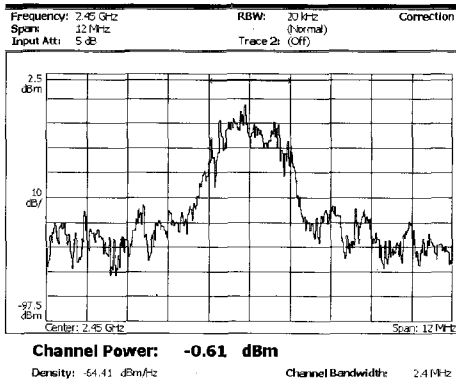


그림 10. 최대출력전력(@ 2450MHz)
Fig. 10. Maximum output power at 2450MHz

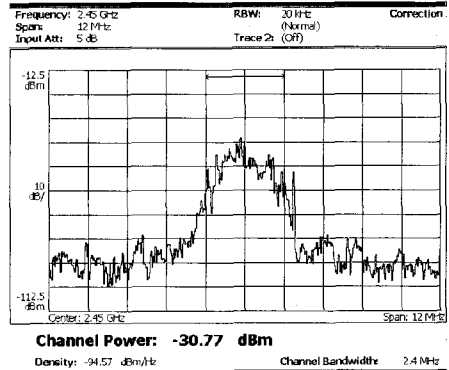


그림 11. 30dB 감쇄시 출력전력(@ 2450MHz)
Fig. 11. Output power with 30dB attenuation at the center frequency of 2450MHz

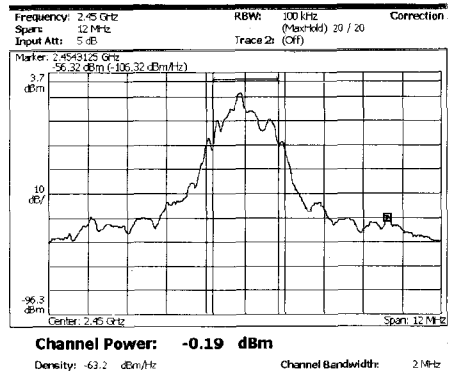


그림 12. 스펙트럼 마스크(@ 2450MHz)
Fig. 12. Spectrum mask at the center frequency of 2450MHz

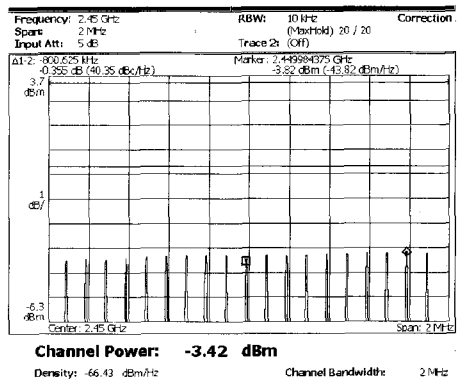


그림 13. 송신대역 평탄도(@ 2450MHz)
Fig. 13. Transmit channel flatness at the center frequency of 2450MHz

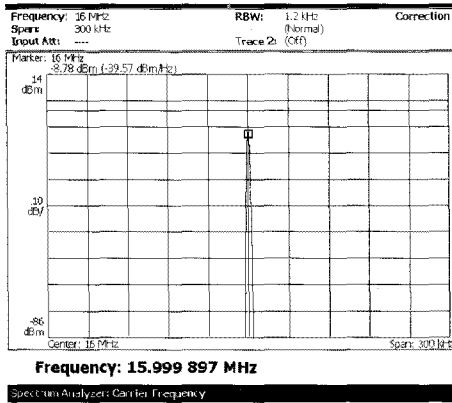


그림 14. 16MHz 기준신호
Fig. 14. 16MHz reference signal

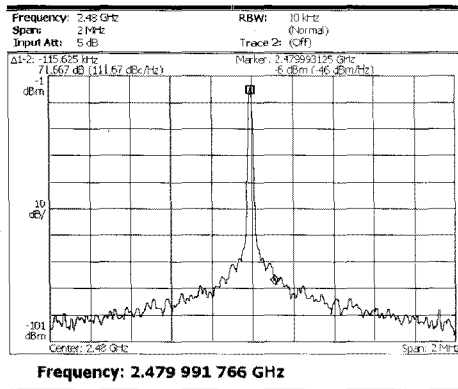


그림 15. 주파수 오차와 100kHz에서 위상잡음(@ 2480MHz)
Fig. 15. Frequency error and phase noise(@ 100kHz offset) of 2480MHz LO

IV. 결론

본 논문에서는 2.4GHz 대역의 센서노드용 RF 송수신기를 설계 및 제작하였다. 제작된 RF 송수신기의 성능을 시험한 결과는 모두 규격을 만족한다. 본 논문에서 제작한 송수신기는 하이브리드 형태이나, SoC를 제작하기 위한 전 단계로써 필요한 자료를 확보하기 위한 test bed로 사용가능하다. 또한 본 논문의 시험과정은 다른 RF 송수신 시스템의 시험에도 유용하게 적용될 수 있다.

참고문헌

- [1] 장상기, 최흥택, “센서노드용 RF 송수신기의 설계”, 해양정보통신학회 논문지, 13권 5호, pp. 854 ~ 859, 2009. 5.
- [2] 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.
- [3] 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.

저자소개



장 상 기(Sanggee Kang)

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

1994년 단국대학교 전자공학과(공학석사)
2004년 충남대학교 전자공학과(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 BeNE Global 전무이사
2008 ~ 현재 (주)이앤에스 웨이브 전무이사
※관심분야: RF/MW 부품 및 시스템, 이동통신