

# IEEE 802.15.4g용 SUN RF 송수신 시스템 설계에 대한 연구

김재영<sup>1\*</sup>, 이승식<sup>1</sup>, 서영호<sup>2</sup>, 김창완<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국전자통신연구원 WPAN응용연구실, <sup>2</sup>동아대학교 전자공학과

## Design of a SUN RF Transceiver for IEEE 802.15.4g

Jae-Young Kim<sup>1\*</sup>, Seung-Sik Lee<sup>1</sup>, Yong-Ho Seo<sup>2</sup> and Chang-Wan Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of WPAN Application Research, ETRI

<sup>2</sup>Department of Electronics, Dong-A University

**요 약** 스마트 유틸리티 네트워크(SUN)용 무선전송 기술은 에너지 절약 지능형 그린 홈 네트워크 개발의 핵심 요소 기술일 뿐 아니라, 향후 ZigBee 기술을 대체하여 다양한 분야에 활용될 차세대 WPAN 기술이다. SUN 무선 전송 기술은 IEEE 802.15.4g SUN PHY-Layer 표준으로 지하나 반 지하 또는 복잡한 건물 주변과 같은 열악한 전파환경에서도 높은 링크 이득과 안정적인 전송속도의 제공이 가능한 비 면허 무선 전송기술이다[1][2][3]. 본 논문은 IEEE 802.15.4g SUN 표준을 만족시키는 RF 송수신기 칩 개발을 위해, RF 송수신기에 대한 시스템 단위 모의실험 환경을 구축하고, 시스템 설계에 필요한 설계 방법, 요구 사양 도출 및 시스템 예상 성능에 대한 내용이다. 또한 상기 시스템 단위 모의실험 결과를 바탕으로 실제 제작한 RF 송수신기 칩의 성능은 IEEE 802.15.4g SUN PHY-Layer 표준의 요구 사양 보다 우수하였다.

**Abstract** Smart Utility Network (SUN) is not only a core technology of intelligent green home networks but also a future technology which can be applicable to various areas instead of ZigBee. SUN should be compliment with IEEE 802.15.4g standard and can provide high link margin and stable communication data-rate for poor communication surrounding. This paper describes how to design the system simulation environment for the SUN RF transceiver, and also reports the required block-level specification for each circuit and various implementation impairments. Finally, the measured performances of the fabricated RF transceiver, which has utilized the system simulation results, completely satisfies the IEEE 802.15.4g SUN PHY standard.

**Key Words** : CMOS, Link-budget, RF Transceiver, SUN, System Simulation, WPAN

## 1. 서론

스마트 유틸리티 네트워크(Smart Utility Network: SUN)는 스마트 그리드(Smart Grid)를 수용 가능한 지역에서 전력 공급자와 수요자간의 양방향 무선통신 인프라로 사용되어 저탄소 녹색 산업을 대표하는 그린 홈네트워크 개발의 핵심 기술로 부각되고 있다. 스마트 유틸리티 네트워크 핵심기술은 전기, 가스, 수도와 같은 유틸리티 관련 정보를 공급자와 사용자 사이에 자유롭게 정보를 교환할 수 있도록 할 수 있는 차세대 근거리 무선 전

송기술이다. 또한, 기존의 Zigbee 무선 전송 기술보다 지하나 반 지하 또는 복잡한 건물 주변과 같은 열악한 전파 환경에서도 높은 링크 이득과 Scalable한 전송속도를 제공할 수 있는 장점이 있다.

스마트 유틸리티 네트워크용 무선 전송기술은 2012년 확정된 IEEE802.15.4g SUN PHY-Layer 표준을 만족시켜야 하며 저전력/저가격으로 구현되어야 한다. Fig. 1은 SUN의 네트워크 개념도를 보여 주고 있는데 SUN은 기간망과 연계하여 실내 환경뿐만 아니라 실외 환경에서도 소비자의 다양한 정보를 서비스 제공자에게 전달 할 수

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(12기술혁신C01)에 의해 수행되었습니다.

\*Corresponding Author : Jae Young Kim(ETRI)

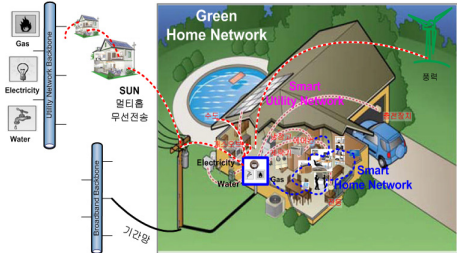
Tel: +82-42-860-5675 email: jyk@etri.re.kr

Received March 6, 2013

Revised March 19, 2013

Accepted April 11, 2013

있음을 보여주고 있다. Fig. 2는 SUN 응용을 보여 주는 것으로 수도사용 계측 자동화, 전력 사용량 계측 자동화, 개인 건강관리, 빌딩 자동화 등의 다양한 응용이 가능함을 보여준다[4].



[Fig. 1] Conception of SUN.



[Fig. 2] Application Examples of SUN.

현재 국내외에서 개발된 기존의 Zigbee 와 Bluetooth 계열 RF 송수신기들은 IEEE 802.15.4g에서 요구하는 통신 거리(1km), 데이터 전송율(수 Mbps), 출력 파워(+10dBm)등을 만족 시킬 수가 없기 때문에 IEEE 802.15.4g 표준을 지원하는 새로운 칩셋을 서둘러 개발되어야한다.

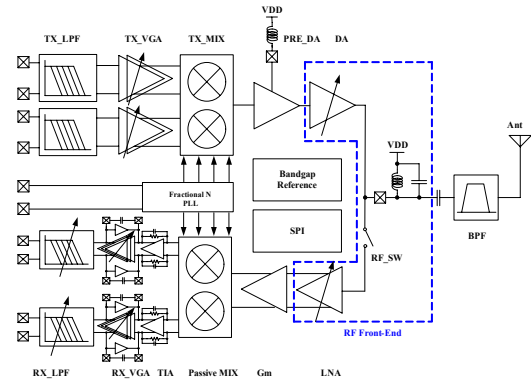
본 논문은 IEEE 802.15.4g SUN 표준을 만족시키는 RF 송수신기 칩의 성공적인 개발을 위해, RF 송수신기에 대한 시스템 단위 모의실험 환경을 먼저 구축하고, 모의 실험을 통해 시스템 설계 기법, 요구 사양 도출, 그리고 구현 시 예상되는 성능 등에 대한 내용이다. 또한, 상기 시스템 단위 모의실험 결과를 바탕으로 실제 제작한 RF 송수신기 칩의 성능을 IEEE 802.15.4g SUN PHY-Layer 요구사항과 비교하였다.

## 2. SUN OFDM RF 시스템 시뮬레이션

### 2.1 SUN OFDM RF 시스템 요구 사항

IEEE 802.15.4g SUN PHY 표준은 OFDM/DSSS/FSK 3가지 방식을 지원하는데 본 논문에서는 OFDM 방식의 RF 송수신기에 대한 시스템 시뮬레이션과 칩 개발에 대해서만 논한다.

Fig. 3은 개발하고자 하는 IEEE 802.15.4g SUN OFDM 방식을 지원하는 RF 송수신기의 블록다이어그램이다. RF 송수신기는 크게 송신부, 수신부, 구리고 국부 신호 발생기 부분으로 나누어 진다. 직접변환방식 구조 (Zero-IF)를 선택하여 1개의 PLL로 송수신에 필요한 국부 발진 신호를 공급한다. IEEE 802.15.4g OFDM PHY에서 제시하는 RF 송수신기에 요구되는 성능들은 Table 1에 정리하였다.



[Fig. 3] Block Diagram of the OFDM RF Transceiver.

[Table 1] Requirement Spec. of OFDM PHY.

|    | 항목             | Spec.   | Unit |
|----|----------------|---------|------|
|    | Supply voltage | 1.8     | V    |
| RX | NF             | < 10    | dB   |
|    | IIP3           | > -20   | dBm  |
|    | IP2            | > +20   | dBm  |
|    | Voltage gain   | 10 ~ 80 | dB   |
|    | Dynamic range  | 70      | dB   |
| TX | Output Power   | > +0    | dBm  |
|    | Gain rage      | -5 ~ 10 | dBm  |
|    | OP1dB          | > +13   | dBm  |

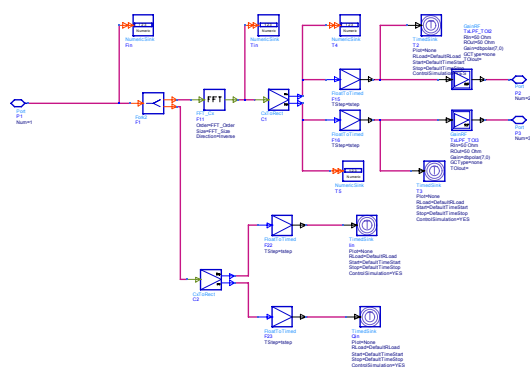
### 2.2 송신부 시뮬레이션

IEEE 802.15.4g OFDM PHY 표준에서는 각각의 MCS(modulation and coding schemes)별로 송신 출력 신호에 대한 EVM (Error Vector Magnitude) RMS(Root Mean Square)를 Table 2과 같이 요구하고 있다. Table 2에서 보는 바와 같이 MCS6일 경우 요구하는 EVM 값이

가장 높은 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 OFDM 송신단이 +10 dBm의 전력을 전송 할 때 -19 dB 이상의 EVM 값을 확보하도록 ADS 툴을 이용하여 송신단을 구성하는 각 블록별 입/출력 임피던스, 선형특성 (OIP3), 전력 이득(Ap)등을 검토 하여 결과를 도출 하였다.

[Table 2] EVM Spec. for MCSs.

| MCS  | RMS error |
|------|-----------|
| MCS0 | -10dB     |
| MCS1 | -10dB     |
| MCS2 | -10dB     |
| MCS3 | -10dB     |
| MCS4 | -13dB     |
| MCS5 | -16dB     |
| MCS6 | -19dB     |



[Fig. 4] Proposed Baseband Source of OFDM.

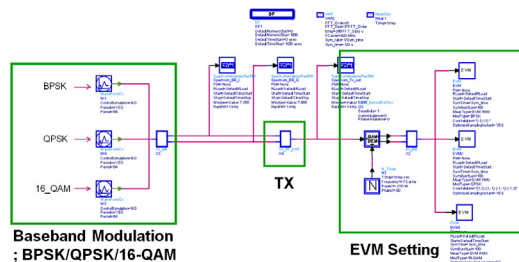
[Table 3] Sub-Carrier Spec. for Each Option.

|        |       | Opt1   | Opt2   | Opt3   | Opt4   |
|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| BW     | KHz   | 1200   | 600    | 400    | 200    |
| FFT    | tones | 128    | 64     | 32     | 16     |
| guard  | tones | 23     | 11     | 5      | 1      |
| DC     | tones | 1      | 1      | 1      | 1      |
| Active | tones | 104    | 52     | 26     | 14     |
| pilot  | tones | 8      | 4      | 2      | 2      |
| data   | tones | 96     | 48     | 24     | 12     |
| Sbu.BW | tones | 10.416 | 10.416 | 10.416 | 10.416 |

본 논문에서는 송신단 시뮬레이션을 위해 Table 1의 요구사항을 만족하는 Fig. 4의 OFDM 기저대역 신호원을 ADS툴을 이용하여 직접 제안한 구조로 설계하였다. OFDM PHY는 Table 3에선 보는 바와 같이 4개의 Option

을 두고 채널대역폭, sub-carrier 수, 전송속도를 조절할 수 있다. Option 1~4까지 각각 128/64/32/16의 FFT tone 및 1200/600/400/200 KHz의 채널 대역폭을 갖는다. 또한 OFDM의 Symbol rate은 8.3 KHz 이며 각 subcarrier사이의 주파수 간격은 10.416 KHz이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 MR-OFDM 신호원의 FFT 및 Modulation Type은 외부에서 임의로 입력하여 Option 1~4를 선택할 수 있도록 설계하였고, 각 Modulation된 신호의 크기가 동일하도록 Modulation-dependent normalization factor KMOD를 BPSK는 1, QPSK는 1/sqrt(2) 그리고 16 QAM은 1/sqrt(10) 적용하였다.

Fig. 5는 RF 송신기의 출력 파워와 EVM 특성을 확인 하기 위해 구성한 모의실험 환경을 보여주고 있다. Fig. 5에서 DAC로부터 전달된 각 Option별 Modulated (BPSK, QPSK, 16QAM) OFDM 신호의 입력 파워 크기를 -2 dBm (0.5 Vpp @50 ohm)으로 가정하고 LPF 입력에 인가 시켜서, 송신단을 구성하는 LPF, VGA, UP-MIXER, DA의 파라미터값(입/출력 임피던스, OIP3, 그리고 Power gain)들을 조정하여 송신단의 출력파워가 +10 dBm이 되는지 그리고 EVM (RMS)값이 -19 dB 이상을 만족시키는 지를 확인하였다. 각 Modulation(BPSK, QPSK, 16QAM)된 신호는 이상적 수신기로 Demodulation하여 EVM 값을 측정하였다. 본 시뮬레이션에는 EVM은 I/Q mismatch, 송신기 선형 특성, 국부발진기신호의 위상잡음에 의한 영향만을 고려하였다.

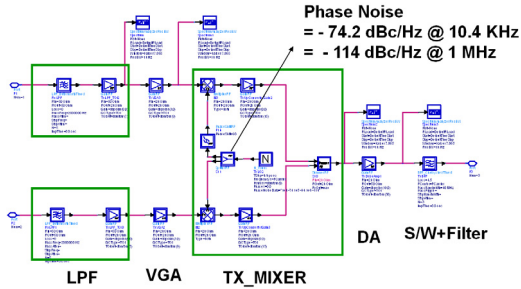


[Fig. 5] System Simulation Test-bench for TX.

Fig. 5의 RF 송신기는 Fig. 6과 같이 직접변환방식 구조로 LPF, VGA, I/Q TX-MIXER, DA, 그리고 BPF로 구성되어 있다. Fig. 6에서 BPF 모델은 RF 스위치, 트랜스퍼머, 그리고 BPF 모두를 포함한 것이고 총 손실 값은 4.5 dB를 적용하였다. PLL의 위상잡음은 일반적으로 900 MHz 대역에서 사용되는 LC VCO의 위상잡음값(-74.2 dBc/Hz@10.4 KHz, -114 dBc/Hz@10.4 MHz)를 적용하였다.

Table 4는 위의 Fig. 6의 MR-OFDM 송신단의 최종 출

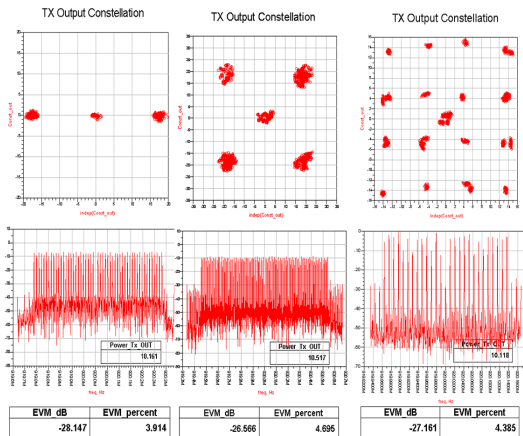
력단에서 관찰한 각 Option 별 EVM 시뮬레이션 결과 값이다. Table 4에서 보는 것처럼, +10 dBm 전송시 EVM값은 -27 dB 이상으로 표준에서 요구하는 사양 -19 dB보다 우수함을 알 수 있다.



[Fig. 6] RF Transmitter Block.

[Table 4] TX EVM Simulation Results.

| BW    | TX EVM(dB) |      |      |      |      |
|-------|------------|------|------|------|------|
|       | 표준         | OPT1 | OPT2 | OPT3 | OPT4 |
| MCS 0 | -10        | -27  | -28  |      |      |
| MCS 1 | -10        | -27  | -28  | -29  |      |
| MCS 2 | -10        | -26  | -27  | -28  | -31  |
| MCS 3 | -10        | -26  | -27  | -28  | -31  |
| MCS 4 | -13        |      | -27  | -28  | -31  |
| MCS 5 | -16        |      | -27  | -27  | -31  |
| MCS 6 | -19        |      |      | -27  | -31  |



[Fig. 7] TX Simulation Results for Option 4.

Option 1~4에 대해 QPSK 및 16QAM 신호를 송신단 입력에 인가하였을 경우 가장 높은 EVM 성능을 요구하는 Option4의 시뮬레이션 결과를 Fig. 7과 같다. 16개 FFT tone으로 구성된 600 KHz BW의 OFDM signal을 생성하며 QPSK/16QAM modulation시 각각 -31/-31 dB의

EVM값을 보여준다.

### 2.3 수신부 시뮬레이션

IEEE 802.15.4g OFDM PHY는 10dB 이하의 수신단 전체 잡음 지수(NF)과 6dB 이하의 Implementation loss가 규정되어 있으며, 각 Option별 Sensitivity Level을 Table 5과 같이 다르게 규정하고 있다. 그러므로 이러한 정보를 이용하여 수신기가 요구하는 최소 SNR(signal-to-noise ratio) 값과 Link margin을 간단한 수식을 통해 각 옵션별 및 MCS별로 구해 낼 수가 있다. Table 6은 요구사항이 가장 높은 Option 4에 대해 계산된 SNR값과 Link margin을 나타내었다.

[Table 5] Required RX Sensitivity Level.

|       |     | Opt1 | Opt2 | Opt3 | Opt4 |
|-------|-----|------|------|------|------|
| MCS 0 | dBm | -103 | -105 |      |      |
| MCS 1 | dBm | -100 | -103 | -105 |      |
| MCS 2 | dBm | -97  | -100 | -103 | -105 |
| MCS 3 | dBm | -94  | -97  | -100 | -103 |
| MCS 4 | dBm |      | -94  | -97  | -100 |
| MCS 5 | dBm |      | -91  | -94  | -97  |
| MCS 6 | dBm |      |      | -91  | -94  |

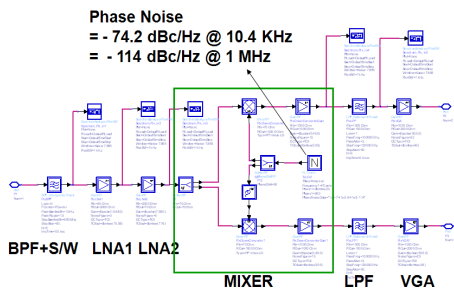
[Table 6] Calculated RX Sensitivity Level for Option 4.

|                         | MCS4  | MCS5  | MCS6  |
|-------------------------|-------|-------|-------|
| TX PWR(dBm)             | 10    | 10    | 10    |
| Ant Gain(dB)            | 0     | 0     | 0     |
| 1Km Loss(dB)            | 91.7  | 91.7  | 91.7  |
| Ant Gain(dB)            | 0     | 0     | 0     |
| RX PWR(dBm)             | -81.7 | -81.7 | -81.7 |
| Required SNR(dB)        | 5     | 8     | 11    |
| BW(KHz)                 | 200   | 200   | 200   |
| Noise PWR(dBm)          | -121  | -121  | -121  |
| NF(dBm)                 | 10    | 10    | 10    |
| Implementation Loss(dB) | 6     | 6     | 6     |
| Link Margin(dB)         | 18    | 15    | 12    |
| RX Sensitivity(dBm)     | -100  | -97   | -94   |

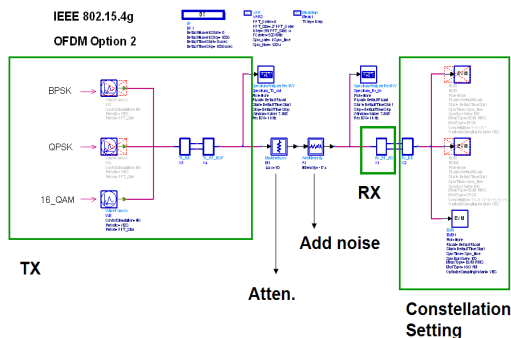
Table 6의 Link margin을 만족하는 수신 시스템 구현을 위해 Fig. 8과 같이 직접 변환 방식의 수신기를 구성하였다. 또한 PLL의 위상잡음은 송신기와 동일하게 일반적으로 900 MHz 대역에서 사용되는 LC VCO의 위상잡음값(-74.2 dBc/Hz@10.4 KHz, -114 dBc/Hz@10.4 MHz)을 적용하였다. 수신단 시스템 시뮬레이션에서는 송신단과 동일하게, 수신기 내부 각 블록에 대해 I/Q mismatch, 선형 특성, 국부발진기신호의 위상잡음에 의한 영향만을 고려하였다.

현실적인 상황을 고려하여 이상적인 송신단을 사용하

지 않고 Fig. 6의 송신기를 수신기 입력에 연결하여 수신기의 시뮬레이션을 진행 하였다. Fig. 9와 같이 BPSK/QPSK/16-QAM에서 진행 하였다.

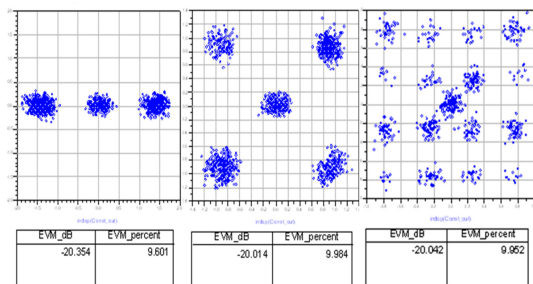


[Fig. 8] RF Receiver Block Diagram.



[Fig. 9] RX System Simulation Platform.

Fig. 9의 수신단 EVM 시뮬레이션 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 16QAM 수신 신호에 대한 EVM이 -29dB 이하임을 알 수 있다. 수신 sensitivity 시뮬레이션 결과는 Table 7과 같이 정리 할 수 있다. IEEE 802.15.4g 표준화 요구 사항과 Table 7을 비교하면 수신 Sensitivity level 관련하여 전 MCS와 option에서 예상되는 시스템 성능이 표준화 성능에 만족함을 알 수 있다.



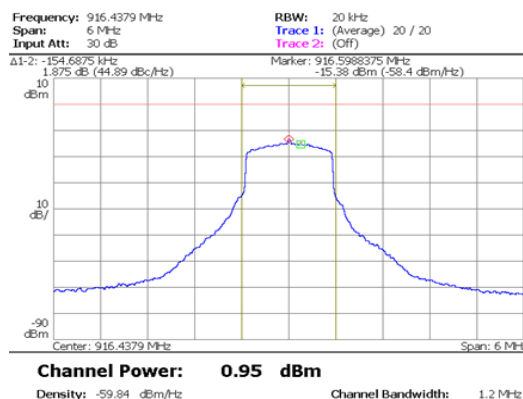
[Fig. 10] RX EVM Simulation Results.

[Table 7] Simulated RX Sensitivity Level.

|       |     | Opt1 | Opt2 | Opt3 | Opt4 |
|-------|-----|------|------|------|------|
| MCS 0 | dBm | -115 | -116 |      |      |
| MCS 1 | dBm | -110 | -115 | -116 |      |
| MCS 2 | dBm | -100 | -110 | -115 | -112 |
| MCS 3 | dBm | -97  | -100 | -110 | -107 |
| MCS 4 | dBm |      | -97  | -105 | -105 |
| MCS 5 | dBm |      |      | -97  | -100 |
| MCS 6 | dBm |      |      | -94  | -98  |

### 2.4 측정 결과

앞에서 기술한 RF 송수신기에 대한 시스템 시뮬레이션 결과를 기초로 하여 RF 칩을 CMOS 0.18-um 공정으로 실제 제작하였다. 제작된 칩의 송수신 측정 결과를 Fig. 11과 Table 8에 제시하였다. Fig. 11은 RF 송신단에서 측정된 출력 스펙트럼으로 Fig. 7의 파형과 유사하고 수신 sensitivity level도 시뮬레이션 결과와 매우 유사하며 표준에서 요구하는 사양을 모두 만족시킴을 알 수 있다.



[Fig. 11] Measured TX Spectrum.

[Table 8] Measured RX Sensitivity Level.

|       | opt | Sensitivity (dBm) | Mea. PER | Stand. (PER<10%) |
|-------|-----|-------------------|----------|------------------|
| MCS 0 | 1   | -114              | <1%      | -103             |
| MCS 1 | 1   | -108              | <1%      | -100             |
| MCS 2 | 1   | -106              | <1%      | -97              |
| MCS 3 | 1   | -100              | <1%      | -94              |
| MCS 5 | 3   | -96               | <8%      | -91              |

### 3. 결론

본 논문은 IEEE 802.15.4g SUN 표준을 만족하기 위한 OFDM RF 송수신기의 시스템 설계에 대한 내용으로 RF 칩 설계에 필요한 시스템의 설계 사양을 구하기 위한 성

능 시뮬레이션을 진행 하였다. 모의실험 결과 송신 EVM 은 송신 전력 +10dBm일 경우 -27dB이상으로 요구 사항 -19dB보다 우수하였고, 수신 성능의 지표인 Sensitivity level은 16QAM MCS6에서도 만족함을 Table 7에서 보여 준다. 상기 시스템 설계 내용을 기반으로 만들어진 RF 송수신기 칩은 모의실험 결과와도 매우 비슷한 결과를 보였다.

### References

- [1] Trung-Kien Nguyen, Viet-Hoang LE, Quoc-Hoanf Duong, Seok-Kyun, Sang-Gug Lee, Nak-Seon Seong, Nae-Soo Kim, and Cheol-Sig Pyo, "Low-Power Direct Conversion Transceiver for 915MHz Band IEEE 802.15.4b Standarf Based on 0,18um CMOS Technology," *ETRI Journal*, Vol 30, NO.1, pp. 33-46, Feb. 2008.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.4218/etrij.08.0107.0034>
- [2] Wolfram Kluge, Frank Poegel, Matthias Lange, Tilo Ferchland, Lutz Dathe, and Dietmar Eggert, "A Fully Integrated 2.4-GHz IEEE 802.15.4-Compliant Transceiver for ZigBee Application," *IEEE JSSC.*, vol. 41, NO. 12, pp. 2767-2775, Feb. 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2006.884802>
- [3] Chin-Sean Sum, H. Harada, Zhou Lan, and Funafa, R, "Smart Utility Networks in TV White Space," *IEEE Comm. Magn.*, vol. 49, pp. 132-139, July. 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2011.5936166>
- [4] Wan-Ki Park, Intark Han, and Kwang-Roh Park, "ZigBee based Dynamic Control Scheme for Multiple Legacy IR Controllable Digital Consumer Devices," *IEEE CE. Trans.*, vol. 53, pp. 172-177, Feb. 2007.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TCE.2007.339521>

#### 김 재 영(Jae Young Kim)

[정회원]



- 1990년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학학사)
- 1992년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1996년 8월 : 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1996년 9월 ~ 1999년 2월 : (주) 대우전자

- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야>

에너지 IT, 센서무선통신, RF 회로 설계

#### 이 승 식(Seung-Sik Lee)

[정회원]



- 1996년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학학사)
- 1998년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2007년 9월 : 충북대학교대학교 정보통신공학과 (공학박사)
- 1998년 3월 ~ 2000년 7월 : LG 정보통신 주임연구원

- 2000년 8월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 책임 연구원

<관심분야>

RF CMOS Chip 설계, 정보통신

#### 서 영 호(Yong-Ho Seo)

[정회원]



- 2009년 2월 : 동아대학교 전자공학과 (공학학사)
- 2011년 2월 : 동아대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 동아대학교 박사과정

<관심분야>

RF/Analog 집적회로 설계, 다중밴드 무선 송수신기

#### 김 창 완(Chang-Wan Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학학사)
- 2003년 2월 : ICU 전자공학과 (공학석사)
- 2006년 2월 : ICU 전자공학과 (공학박사)
- 1997 3월 ~ 2001년 2월 : LG 정보통신 주임연구원

- 2006년 2월 ~ 2001년 2월 : 한국전자통신연구원 선임 연구원

- 2007년 8월 ~ 현재 : 동아대학교 조교수

<관심분야>

RF CMOS Chip 설계, 다중밴드 무선 송수신기