

TV 유희대역 응용을 위한 무선 영상전송 시스템

A Wireless Video Streaming System for TV White Space Applications

박형열 · 고인창* · 박형철* · 신현철

Hyeongyeol Park · Inchang Ko* · Hyungchul Park* · Hunchol Shin

요 약

본 논문에서는 TV 유희대역에서 가능한 응용서비스중 하나로서, UHF 대역(470~806 MHz)에서 동작하는 무선 영상전송 시스템을 구현하였다. 이 시스템은 RF 송수신기 모듈, 디지털 모뎀, 카메라, 스크린으로 구성된다. RF 송수신기와 디지털 모뎀을 연동하여 VGA급 화질의 카메라 영상을 2.6 인치 LCD 스크린에 표시하는 방식이다. RF 송수신기 구조는 크기와 비용을 줄이기 위해 직접변환 방식을 채택하였다. 성능지표인 Image Leakage를 향상시키기 위하여 PLL의 출력에 3차 하모닉 제거필터를 사용하였으며, DC offset 문제 해결을 위해 DAC 출력노드에 Current steering technique을 이용하여 공통모드 전압을 조절하게 하였다. 또한, 채널대역폭은 국가별 표준을 맞게 6, 7, 8 MHz 중 선택이 가능하다. 출력 파워와 수신감도는 각각 +10 dBm, -82 dBm이다. 디지털모뎀은 Kintex-7급 FPGA에서 구현하였다. QPSK와 512ch OFDM 변조를 기반으로 전송속도는 약 9 Mbps이다. 개발된 송수신 모듈을 이용하여 VGA급 화질을 무선으로 송수신하는데 성공하였다.

Abstract

In this paper, a wireless video streaming system is designed and implemented for TV white space applications. It consists of a RF transceiver module, a digital modem, a camera, and a LCD screen. A VGA resolution video is captured by a camera, modulated by modem, and transmitted by RF transceiver module, and finally displayed at a destination 2.6-inch LCD screen. The RF transceiver is based on direct-conversion architecture. Image leakage is improved by low pass filtering LO, which successfully covers the TVWS. Also, DC offset problem is solved by current steering techniques which control common mode level at DAC output node. The output power of the transmitter and the minimum sensitivity of the receiver is +10 dBm and -82 dBm, respectively. The channel bandwidth is tunable among 6, 7 and 8 MHz according to regulations and standards. Digital modem is realized in Kintex-7 FPGA. Data rate is 9 Mbps based on QPSK and 512ch OFDM. A VGA video is successfully streamed through the air by using the developed TV white-space RF communication module.

Key words: TV Whitespace(TVWS), RF Transceiver Module, Video Streaming System

I. 서 론

무선 통신 보편화에 따른 무선 데이터 트래픽 수요 급증에 대처하기 위한 주파수 확보 및 이용 효율화 방안

「이 연구는 미래창조과학부 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신방송연구개발사업(14-911-01-001), 한국연구재단 일반연구자 지원사업(NRF-2012-R1A1A2038649) 및 (주)이모텔리의 지원으로 수행되었음.」

광운대학교 전파공학과(Department of Wireless Communications Engineering, Kwangwoon University)

*서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과(Department of Electronic and IT Media Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

· Manuscript received January 13, 2015 ; Revised March 25, 2015 ; Accepted March 27, 2015. (ID No. 20150113-007)

· Corresponding Author: Hunchol Shin (e-mail: hshin@kw.ac.kr)

대한 필요성이 점차 강조되고 있다. 이에 따라 TV 유휴 대역의 활용은 주파수 재사용 관점에서 관심이 증가하고 있다. TV 유휴 대역(TV White Space: TVWS)이란 방송 주파수 중 지역적으로 사용하지 않는 대역을 말하며, 국내에서는 470~698 MHz 대역에 존재한다. 이 대역은 기존 2.4 GHz와 5 GHz 대역 통신 대비 도달거리가 3배, 투과율은 9배, 커버리지 면적은 16배 우수하기 때문에 다양한 분야로의 활용이 예상되고 있다^[1].

TVWS 응용서비스에 활용하기 위한 무선 송수신기로, RF 송수신기, 기저대역 모뎀, 스펙트럼 센싱을 포함한 MAC 레이어로 구성된 시스템^{[2],[3]} 등이 제안된 바 있다. 이러한 시스템은 TV 대역에서 스펙트럼 센싱을 통해 비어있는 대역을 판단하고, 이를 이용하는 방식이다. 한편, 세계 최대 IT 업체중 하나인 Google에서는 미국 UHF 밴드에서 동작하는 TVWS 광대역 송수신기 구조를 제안한 바 있다^[4].

TVWS용 응용서비스로는 UHF 대역의 장점을 이용해서 건물내 또는 지하에서의 재난 정보 전송이나, 기존 WiFi에 비해 장거리 고속 전송이 가능한 Super Wi-Fi 서비스가 가능하다^[5]. 건물 및 터널 붕괴 시 첨단 인명탐색 장비를 TVWS 무선 송신기에 연결하여 동영상 정보를 전송 후, 이를 이용한 신속한 현장대응으로 대국민 안전 서비스 질을 높일 수 있다. 이외에도, LTE, WiFi의 전송 주파수를 TVWS 대역으로 변환하여 보낼 수 있는 RF 주파수 변환기^{[6],[7]}, 또는 차량 간에서의 비디오 전송을 구현^[8]하는 등 유휴대역을 활용하기 위한 서비스가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는, 이러한 다양한 TVWS 응용서비스 중 활용도가 특히 높을 것으로 예상되는 재해/재난 정보통신에 대응하기 위해, 직접변환 방식의 RF 송수신기 모듈과 FPGA로 구현한 디지털 모뎀을 이용하여 구현된 TV 유휴 대역 무선 영상전송 시스템을 설계하고 구현한다.

II. 설계 및 구현

2-1 무선 영상전송 시스템 구조

그림 1은 설계된 무선 영상전송 시스템의 구조도이다. 송신기는 카메라, 디지털 모뎀, RF 송수신기로 구성된다.

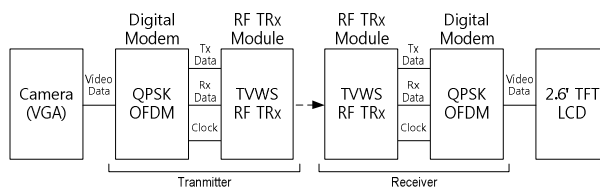


그림 1. 무선 영상전송 시스템 블록도

Fig. 1. Block diagram of wireless video streaming system.

카메라의 VGA급 영상을 QPSK, 512-channel OFDM 방식의 디지털 모뎀에서 신호 처리한 뒤, RF 송수신기에서 TVWS 중 비어 있는 채널을 택하여 무선 송신한다.

수신기는 송신기와 마찬가지로 RF 송수신기, 디지털 모뎀, LCD 스크린으로 구성된다. 송신기와 같은 전송주파수를 설정하여 영상 데이터를 수신한 뒤, 디지털 모뎀에서 송신기와 같은 방식으로 신호 처리하여 영상 데이터를 LCD 스크린으로 출력한다.

2-2 TVWS RF 송수신기

그림 2는 무선 영상전송 시스템에 사용된 TVWS RF 송수신기의 블록도이다. 국내 TV 유휴대역(470~698 MHz) 이외에도 DTV 전환 이후 재난통신망으로 고려중인 700 MHz 대역을 포함하여 470~806 MHz에서 동작하도록 하였다. 또한, 각 국가별로 다른 채널 대역폭을 만족하기 위해 6, 7, 8 MHz 중 선택 가능하게 한다. 송수신기 구조는 크기와 비용을 줄이기 위해 직접변환 방식을 사용하였다.

디지털 데이터 변환부는 ADC와 DAC가 하나의 칩에 직접화된 아날로그디바이스 社의 AD9963^[9]을 이용하였다. 그림 3(a)는 송신기의 블록도이다. 디지털 신호는 DAC에 입력되어 아날로그 신호로 변환되는데, DAC의

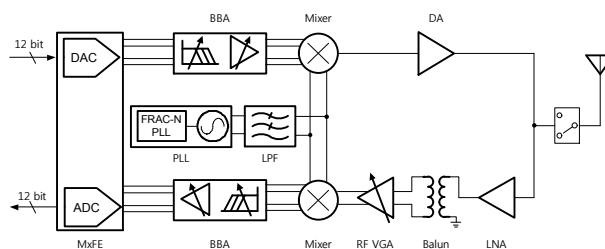


그림 2. TVWS RF 송수신기 블록도

Fig. 2. Block diagram of wideband RF transceiver.

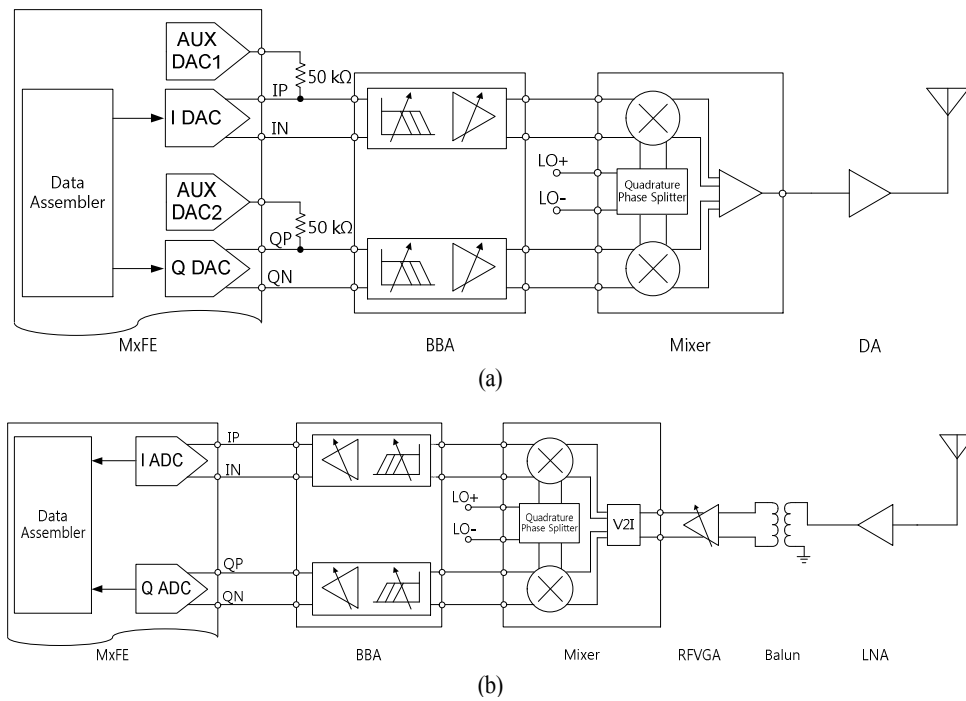


그림 3. (a) 송신기 블록도, (b) 수신기 블록도

Fig. 3. (a) Transmitter block diagram, (b) Receiver block diagram.

표 1. 사용된 송신기용 IC의 사양

Table 1. Specifications of transmitter IC.

Transmitter	BBA	Mixer	DA
Gain(dB)	-14~45	-3	14.7
OIP3(dBm)	35	26.6	40
OP1 dB(dBm)	3	9.6	20.7

샘플링 주파수에 따라 신호의 왜곡을 가져오는 Nyquist image 성분이 발생한다. 이를 Baseband Amplifier(BBA)^[10]의 저역통과필터로 제거하였다. 차단주파수를 3, 4 MHz 중 선택함에 따라 국가별로 차이가 있는 채널대역폭을 만족시킬 수 있다. 또한, 송신기의 출력 파워를 BBA의 가변이득 증폭기를 이용하여 조절할 수 있다. 이 신호는 Quadrature Modulator를 이용하여 RF로 변조되고, Driver Amp(DA)에서 증폭되어 안테나를 통해 방사된다. 송신기에 사용한 각 IC의 사양은 표 1에 나타내었다.

TVWS는 무엇보다 1차 면허 사용자인 DTV와 무선마이크에 대한 보호가 먼저이다. 미국 FCC의 TVWS 관련 규정^[11]에 따르면 이동/휴대용 TV Band Device(TVDB)의

최대 출력 파워는 6 MHz 대역폭 기준 100 mW 이하, 인접대역 존재 시 40 mW 이하로 규정하고 있다. 본 논문의 출력 파워는 10 dBm을 목표로 하였으며, 향후 국내 TV-DB에 관한 기술기준이 발표되면 송신기의 이득과 Power Amplifier(PA)로 이를 만족시키도록 한다.

DAC 출력의 DC offset은 RF 스펙트럼에서 Carrier Leakage로 나타난다. 이를 제거하기 위해, Current steering technique을 이용하였다. MxFE AD9963의 AUX DAC의 전압과 50 kΩ 저항 생성되는 전류를 이용하여 DAC 출력노드에 흘려준다. 따라서 IP, QP 노드의 공통 모드 전압을 조절 가능하고, DC offset의 영향을 최소화할 수 있다.

그림 3(b)은 수신기의 블록도이다. 수신기의 첫 단은 노이즈 성능을 위해 Low Noise Amplifier(LNA)를 사용한다. 만약 LNA에서 증폭된 신호의 크기가 Mixer의 입력 범위보다 크다면 출력 신호에 왜곡이 생긴다. 이에 따라, 이득범위가 -15~+15 dB인 RF Variable Gain Amplifier(RF VGA)를 이용하여 신호의 크기를 조절한다. Quadrature Demodulator에서 기저대역으로 변조된 신호는 BBA

에서 증폭되어 ADC에서 디지털데이터로 변환된다. 송신기와 마찬가지로 BBA의 저역통과 필터를 이용하여 Aliasing을 제거하였다. 또한, 수신기에서 발생할 수 있는 DC offset에 관한 문제는 BBA의 DC offset 보상 기능을 이용하여 해결하였다. 전체 수신기 IC의 성능은 표 2에 나타내었다.

직접변환 방식의 송신기에서 Image 대역의 Leakage를 줄이는 것이 중요하다^[12]. LO 주파수는 Mixer 내부의 Quadrature Phase Splitter에서 In-Phase와 Quadrature-Phase로 나누어지는데, LO의 3차 하모닉의 영향으로 IQ 위상에 미스매치가 발생함으로써 Image Leakage가 생긴다^[13]. 따라서 그림 4와 같이 PLL과 Mixer 사이에 3×470 MHz에서 26 dB의 감쇄를 갖는 저역통과대역 필터를 배치함으로써 3차 고조파를 제거하여 Image Leakage 성능을 향상시켰다.

그림 5(a)는 설계된 PCB 레이아웃이다. 전체 면적은 7×10 cm²이다. 그림 5(b)는 제작된 송수신기 모듈 사진이다. 5.5 V의 공급전압으로 총 1.8 A의 전류소모를 갖는다. 시스템의 고속화에 따라 PCB 레이아웃 또한, 전체 성능에 영향을 미친다. 따라서 레이아웃 또한, RF 신호 성능을 고려하여 설계하였고, 특히 전원선 임피던스를 고려하였다.

표 2. 사용된 수신기용 IC 사양

Table 2. Specifications of receiver IC.

Receiver	LNA	RFVGA	Mixer	BBA
Gain(dB)	14.7	-15~15	5.9	-14~45
NF(dB)	1.8	9	10.9	50~22
IIP3(dBm)	25.3	25	29.7	+10~-10

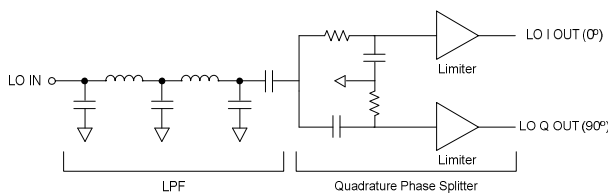
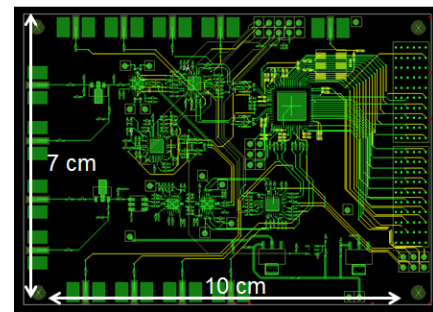


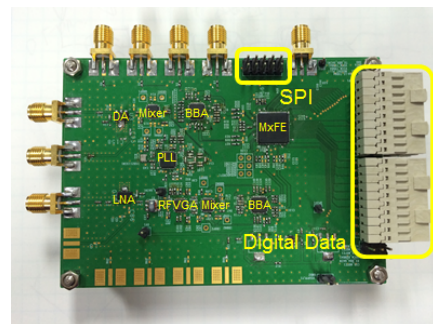
그림 4. RF 특성 향상법: 3차 하모닉 제거 필터

Fig. 4. Improve RF fidelity: Remove LO 3rd harmonic by LPF.



(a) PCB 레이아웃

(a) PCB layout



(b) 사진

(b) Photo

그림 5. RF 송수신기 모듈 구현

Fig. 5. Implementation of RF transceiver module.

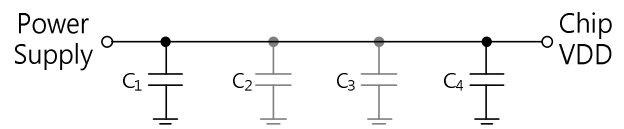


그림 6. 전원선 캐패시터 설계

Fig. 6. Design of power delivery routing capacitors.

그림 6처럼 공급전원과 칩 VDD 사이에 캐패시터 $C_1 \sim C_4$ 를 사용하여 전원선 임피던스를 낮출 수 있다. 하지만 고주파로 갈수록 4개의 캐패시터를 사용하는 것보다 C_1, C_4 총 2개의 캐패시터를 사용하는 것이 더 낮은 전원선 임피던스를 제공한다^[14]. 따라서 본 설계는 C_1, C_4 에 0.1 μ F, 1 nF 2개의 캐패시터를 이용하여 설계를 진행하였다.

그림 7은 RF 송수신기 모듈의 측정 셋업을 나타낸다. 송신기는 AD-DPGIOZ^[15]를 이용한 12-bit 디지털 사인파를 만들어 RF 송수신기 모듈에 입력한 후 PSA E4440A로

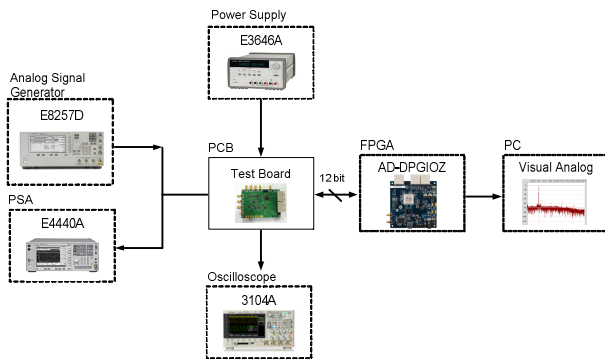
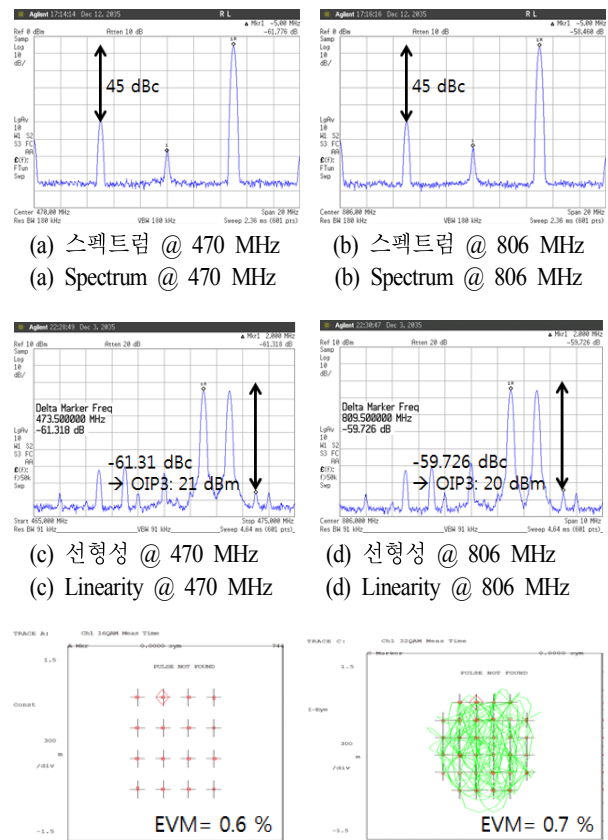


그림 7. RF 송수신기 모듈 측정 셋업
Fig. 7. RF transceiver measurement setup.

결과를 확인하였다. 수신기의 RF 입력은 Analog Signal Generator E8257D를 이용하여 RF 신호를 생성하였다. 그 후 복조 결과를 오실로스코프 3104A를 이용한 파형 측정과 AD-DPGIOZ를 이용한 ADC 후 디지털 데이터를 받아 PC 소프트웨어를 이용한 FFT 결과를 확인하였다.

그림 8은 송신기 측정 결과를 나타낸다. 그림 8(a), (c), (e)는 LO 주파수가 470 MHz일 때를 나타낸 것이고 그림 8(b), (d), (f)는 806 MHz일 때를 나타낸 것이다. 그림 8(a), (b)는 DAC에 5 MHz I/Q 싱글톤을 입력하여 RF 대역으로 변환된 스펙트럼이다. Image Leakage는 약 45 dBc, LO Leakage는 61.8 dBm이다. 그림 8(c), (d)는 투톤을 입력한 선형성 측정 결과이다. IMD가 약 61.3, 59.7 dBc가 나왔으며, 이로 인한 OIP3는 약 21 dBm이 있음을 확인할 수 있다. 그림 8(e), (f)는 HP VSA 89441a를 이용한 EVM 측정 결과이다. 데이터 입력은 송신기 BBA 입력에 Agilent VSG E4438c를 이용하여 랜덤 데이터를 넣어주었다. 측정된 EVM은 약 0.6, 0.7 %이다.

그림 9는 수신기 측정 결과이다. 그림 9(a), (b)는 LO 주파수가 470 MHz일 때, 신호발생기를 이용하여 472 MHz의 RF 신호를 입력하였다. 그림 9(a)는 오실로스코프를 이용한 측정 결과이다. 출력의 크기는 147 mVpp이고, 주파수는 2 MHz이다. 측정된 이득 범위는 -14~78 dB이다. 그림 9(c), (d)는 LO 주파수가 470 MHz일 때를 나타낸 것이고, 그림 9(e), (f)는 806 MHz일 때를 나타낸 것이다. 그림 9(c), (e)는 선형성 측정을 위해 입력을 LO+0.5 MHz, LO+1.5 MHz의 투톤을 넣어주었다. 측정된 IIP3는 약



(a) 스펙트럼 @ 470 MHz
(a) Spectrum @ 470 MHz
(b) 스펙트럼 @ 806 MHz
(b) Spectrum @ 806 MHz
(c) 선형성 @ 470 MHz
(c) Linearity @ 470 MHz
(d) 선형성 @ 806 MHz
(d) Linearity @ 806 MHz
(e) EVM @ 470 MHz 결과
(e) EVM @ 470 MHz
(f) EVM @ 806 MHz 결과
(f) EVM @ 806 MHz

그림 8. RF 송신기 측정결과
Fig. 8. RF transmitter measurement result.

-1.5 dBm을 갖는다. 그림 9(d), (f)는 약 2.8 dB의 잡음 지수를 나타낸다. 수신감도는 6 MHz 채널 대역폭에서 -82 dBm을 갖는다.

2-3 디지털 모델

Xilinx Kintex-7을 이용하여 디지털 모델을 구현하였다. 그림 10은 TVWS 영상전송 시스템의 디지털부를 보여준다. 모델은 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 기술을 이용한다. 그리고 오류 정정을 위해서 Galois field(28) 기반의 Reed-Solomon cde(255, 239)가 사용된다. OFDM Modem은 512 개의 서브 캐리어를 사용하고, 점유대역폭은 6 MHz이다. 서브캐리어의 변조 방식은 QPSK를 사용한다. 전송속도는 약 9 Mbps이다.

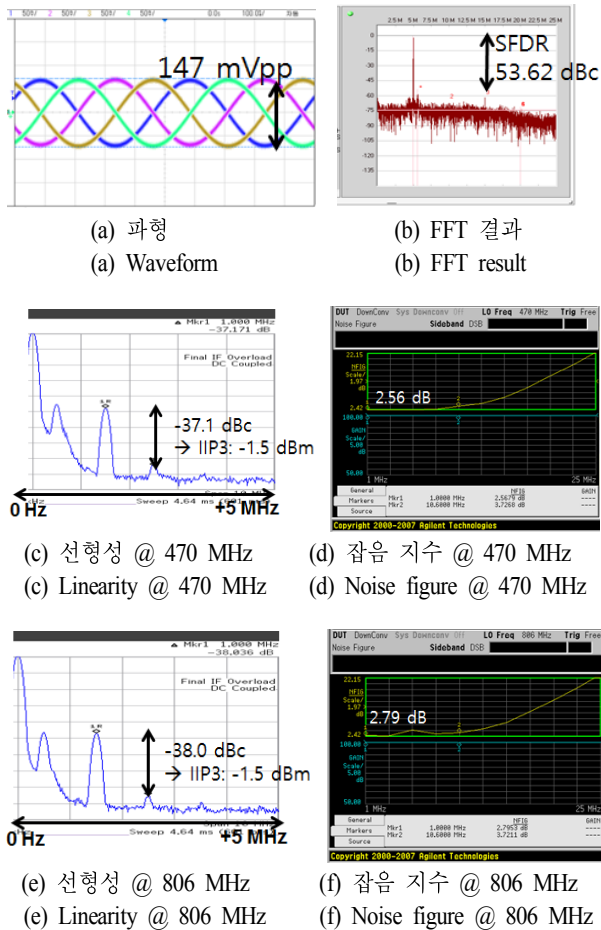


그림 9. RF 수신기 측정 결과

Fig. 9. RF receiver measurement result 2.

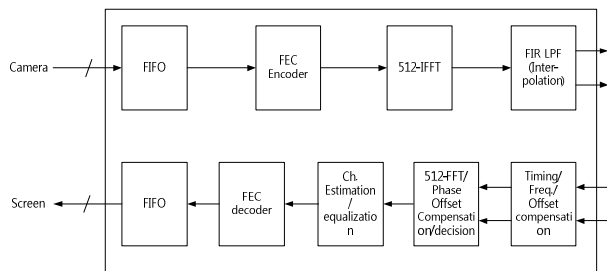


그림 10. 디지털 모뎀 블록도

Fig. 10. Digital modem block diagram.

24 영상 전송 실험 결과

그림 11은 구현된 영상전송 시스템이다. VGA 급 카메라

표 3. 제작된 시스템의 사양

Table 3. Specifications of proposed system.

Parameter	Specification
Power consumption	5.5 V, 1.8 A
Frequency rage	470~806 MHz
Channel bandwidth	6, 7, 8 MHz
Receiver	
Full path gain	-14~+78 dB
Noise figure	2.8 dB
Input-referred IP3	-1.5 dBm
Transmitter	
Image leakage	-45 dBc
LO leakage	-61.8 dBm
Output-referred IP3	21 dBm
EVM	0.7 %
Output power	10 dBm
PLL	
Phase noise @ 100 kHz	-115.48 dBc/Hz
OFDM digital modem	
Datarate	9 Mbps
Subcarrier modulation	QPSK
FFT size	512
Camera	
Color	16 bit
Resolution	640×480(VGA)
Frame rate	Maximum 4 fps

라로 찍은 영상을 무선 전송하여 왼쪽 LCD 스크린에 출력하였다. 수신기 입력 신호의 크기는 송신기와 수신기 사이의 무선 전송 거리에 따라 달라진다. 따라서 수신기의 이득을 조절하여 입력 신호를 수신기의 동작 영역으로 증폭시켰다. 전송주파수는 470 MHz를 사용하였으며, 실제 테스트 결과, 그림 11처럼 영상전송이 되는 것을 확인하였다. 전체 성능 요약은 표 3에 나타내었다.

III. 결 론

TVWS의 우수한 주파수적 특성 때문에, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 따라서 본 논문에서는 TV-

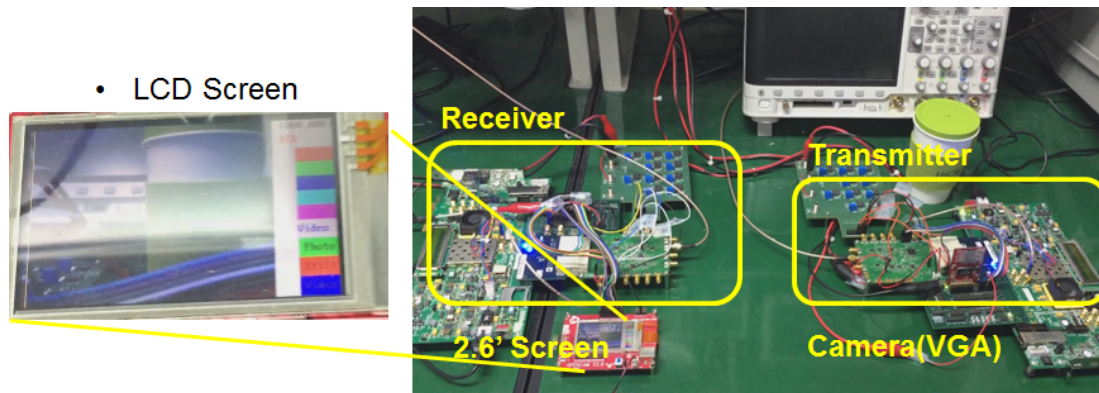


그림 11. 구현된 무선 영상전송 시스템

Fig. 11. Implemented video streaming system block diagram.

WS 중 UHF(470~806 MHz) 대역에서 동작하는 RF 송수신기 모듈을 설계하였다. 설계된 모듈은 크기와 비용을 줄이기 위해서 직접변환 방식을 사용하였으며, RF 성능을 향상시키기 위해 PLL 3차 하모닉 필터링과 DAC 출력의 공통 모드 전압을 맞춰주었다. 그리고 OFDM 기반 디지털 모뎀과 연동하여 TVWS VGA급 영상전송 시스템을 구현하였다. 설계된 모뎀의 변조방식은 QPSK를 이용하며, 6 MHz의 대역폭에서 9 Msps의 전송속도를 갖는다. 이는 재해/재난 정보전송과 같은 TVWS 응용 서비스에 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] 최주평, 정찬형, 이원철, "TV 화이트 스페이스 기술정책 및 서비스 동향", 한국전자과학회논문지, 24(5), pp. 21-31, 2013년 9월.
- [2] K. Kim, J. Min, S. Hwang, S. Lee, K. Kim, and H. Kim, "A CR platform for applications in TV whitespace spectrum", *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications(CrownCom)*, Singapore, pp. 1-6, May 2008.
- [3] M. A. Rahman, C. Song, and H. Harada, "Development of a TV white space cognitive radio prototype and its spectrum sensing performance", *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications(CrownCom)*, Osaka, pp. 231-235, Jun. 2011.
- [4] D. McCloskey, G. Phil, "Wideband transceiver architecture for TV whitespace applications", *IEEE Symp. New Frontiers in Dyn. Spectrum Access Netw. (DySPAN)*, Singapore, pp. 1-7, Apr. 2010.
- [5] T. Matsumura, H. Harada, "Prototype of UHF converter for TV white-space utilization", *Int. Symp. Wireless Personal Multimedia Communications(WPMC)*, Taipei, pp. 123-127, Sep. 2012.
- [6] 구재일, 정찬형, "TVWS 실험서비스와 시범서비스 사례연구", 2013년 한국통신학회 추계종합학술발표회, 라마다프라자 제주호텔, pp. 189-190, 2013년 11월.
- [7] M. Schrey, G. Varga, A. Ashok, I. Subbiah, and S. Heinen, "RF frequency converters for white space devices", *Int. Workshop Cognitive Cellular Systems(CCS)*, Germany, pp. 1-5, Sep. 2014.
- [8] T. Matsumura, K. Ibuka, K. Ishizu, H. Murakami, and H. Harada, "Prototype of FDD/TDD dual mode LTE base station and terminal adaptor utilizing TV white-spaces", *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications(CrownCom)*, Oulu, pp. 31-322, Jun. 2014.
- [9] Analog Device, "10-/12-Bit, low power, broadband Mx-FE", *AD9963 datasheet*, Aug. 2012. [Rev. A].
- [10] Analog Device, "31 MHz, dual programmable filters and variable gain amplifiers", *ADRF6516 Datasheet*, [Rev. B].

- [11] Federal Communication Commission(FCC), "Third memorandum opinion and order", *FCC*, 12-36, Apr. 2012.
- [12] Analog Device, "Correcting imperfections in IQ modulators to improve RF signal fidelity", *Application Note*, *AN-1039*, 2009.
- [13] Texas Instrument, "LO harmonic effects on I/Q balance

and sideband suppression in complex I/Q modulators", *Application Note*, *SLWA059*, May 2010.

- [14] Analog Device, "Techniques for high speed ADC PCB layout", *Application Note*, *AN-1142*, Jan. 2012.
- [15] <http://www.analog.com/en/evaluation/AD-DPGIOZ/eb.html>

박 형 열



2013년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
 2013년 3월~현재: 광운대학교 석사과정 재학중
 [주 관심분야] RF 송수신기 모듈, CMOS 저주파 발진기

박 형 철



1996년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
 1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 2003년 3월~2005년 2월: 하이닉스반도체

선임연구원

2005년 3월~2010년 2월: 한밭대학교 정보통신컴퓨터공학부 전임강사/조교수

2010년 3월~2013년 3월: 서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과 조교수

2013년 4월~현재: 서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과 부교수

[주 관심분야] 변복조 알고리즘, 통신 VLSI

고 인 창



2012년 2월: 서울과학기술대학교 전자IT미디어공학과 (공학사)
 2014년 2월: 서울과학기술대학교 전자정보공학과 (공학석사)
 2014년 3월~현재: 서울과학기술대학교 바이오IT소재융합과정 전자공학프로그램 박사과정 재학중

[주 관심분야] Digital MODEM, 신호처리 VLSI

신 현 철



1991년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)

1993년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1997년 4월~1997년 10월: 독일 Daimler-Benz Research Center 연구원

1998년 1월~2000년: 삼성전자 System LSI 선임연구원

2000년 4월~2002년 4월: 미국 UCLA 박사 후 연구원

2002년 5월~2003년 8월: 미국 Qualcomm 선임연구원

2010년 8월~2011년 8월: 미국 Qualcomm Corporate R&D Visiting Faculty

2003년 9월~현재: 광운대학교 전자융합공학과 교수

[주 관심분야] RF/Analog/Microwave Integrated Circuits and System