

논문 2016-53-2-1

# 무선 프론트홀 네트워크에서의 광라디오파 시스템

## ( Optical Radio Wave Systems in Wireless Fronthaul Networks )

조 상 원\*, 김 아 정\*, 최 진 식\*\*

( S. W. Cho, Ajung Kim<sup>Ⓞ</sup>, and J. S. Choi )

### 요 약

본 논문에서는 무선 및 이동통신을 위한 클라우드 무선 가입자 네트워크를 지원하는 프론트홀에서 무선 라디오파의 광섬유 전송망의 기술을 제안하고 구현한다. 하향 링크는 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) (O기법을 사용하였고 상향방향의 전송은 SC-FDMA (single carrier-frequency multiple access) 방식으로 구현하였다. 64, QAM, 16QAM, QPSK 등 다양한 변조 방식에 대해 시스템 파라미터를 도출하고 측정치를 기반으로 성능을 분석하였다.

### Abstract

In this paper, we propose a Radio over Fiber system for small cell applications and for mobile fronthaul networks supporting cloud-radio access networks(RAN). We built a system with a downlink employing orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) techniques and an uplink using single carrier-frequency multiple access(SC-FDMA). System parameters are evaluated for various subcarrier modulations and the results of link performance measurements are analyzed.

**Keywords** : Fronthaul networks, C-RAN, optical signal transmission, Optical OFDM, RoF

### I. 서 론

인터넷 서비스와 스마트폰의 보급으로 인해 모바일 트래픽이 급증하면서, 통신 수요에 부응하는 ISP (Internet Service Provider) 사업자의 수익 모델로서, 셀의 크기가 줄고 수가 증가되는 무선 통신망 구조로 진화하고 있다. 기존의 기지국의 형태인 D-RAN (Distributed RAN)구조는 이러한 추세에 따라 증가하는 셀의 수와 함께, 인터넷 서비스 사업자들의 CAPEX /OPEX 또한 증가하는데, 이를 극복하기 위하여 새로운 통신망 형태인 C-RAN(Centralized/Cloud Radio Access network)이 제안되었다.

C-RAN은 remote site에 실외용 RRH(Remote Radio Head)만 설치하고 BBU(Baseband Unit)는 중앙기지국

에 모아서, RRH와 BBU사이를 RRH당 각각 한 개의 전용 광케이블로 연결하여 관리한다. 이 구조의 분리된 RRH에 대해서는 온도 조절을 위한 냉방장치가 필요하지 않고 안테나 전원만 필요하므로 유지비용을 최소화할 수 있으며 옥외설치로 인해 공간 임차비용도 줄어들 뿐 아니라, BBU를 중앙기지국에 모아서 운영하기 때문에 전력공급 및 냉방이 더 용이한 구조이다.

무선 및 이동 통신망이 C-RAN 구조로 발전하면서 BBU와 RRH 사이의 프론트홀 구간에 인터페이스 규격이 필요하게 되었다. 현재는 CPRI(Common Public Radio Interface), OBSAI(Open Base Station Architecture Initiative), ORI(Open Radio Interface)등의 규격이 사용 되고 있으며, 국내에서는 CPRI가 널리 사용되고 있다. 이와 더불어 최근 폭증하는 데이터 수요를 위한 기존 프론트홀 구간의 용량증대와 비용절감을 위해 이를 네트워크로 구성하는 시도로서, CPRI over OTN(Optical Transport network), CPRI over WDM/PON, RoE(Radio over Ethernet), RoF(Radio

\*정회원, 세종대학교 광공학과(Sejong University)

\*\*정회원, 한양대학교 컴퓨터공학과(Hanyang University)

Ⓞ Corresponding Author(E-mail: akim@sejong.ac.kr)

Received : October 23, 2015

Revised : January 17, 2016

Accepted : January 22, 2016

over Fiber)등의 다양한 기술들이 제안되고 있다<sup>[1~2]</sup>. 본 논문에서는 C-RAN을 지원하는 프론트홀 네트워크 구성 기법 중 RoF 기술을 기반으로 한 시스템을 구현, 분석한다. 2장에서는 이동통신망에서의 프론트홀 네트워크의 요구사항을 고찰, 분석한다. 3장에서는 2.1GHz 대역의 RoF 시스템 설계와 구현 방법을 설명한다. 하향 방향 링크는 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)을 사용하였고 상향 방향 링크는 SC-FDMA(single carrier-frequency division multiple access) 방식인 시스템을 구현하였다. 4장의 측정 분석에서는 다양한 변조 방식에 대해 시스템 파라미터를 도출하고 측정치를 기반으로 전송용량, EVM(Error Vector Magnitude)등을 측정 분석하여 차세대 프론트홀 네트워크의 솔루션을 검증하도록 한다.

## II. 프론트홀 요구사항 및 기술

D-RAN 구조와 C-RAN구조에 대한 비교는 그림 1에 나타나 있다. C-RAN구조에서 BBU/BU(Data Unit)와 RRH/RU(Radio Unit)사이의 프론트홀 구간은 수십 km 분리되어 있어서 이들 사이를 연결하는 시스템의 요구사항이 존재한다<sup>[3]</sup>.

CPRI표준규격에 따르면 BER(bit error rate)은 최대  $10^{-12}$ 으로 제한되어 있다. 왕복 지연속도는 프론트홀 구간에서는 정의되지 않았으나 일반적 가입자 네트워크에서 400 $\mu$ s 이내로 제한되며 광케이블 전송 지연 제외하고 5 $\mu$ s이내이어야 한다. 주파수 에러는  $\pm 2$ ppb(parts per billion)까지 허용하며 지터는  $\pm 32$ ns로 제한한다.

지연 정확도는  $\pm 16.276$ ns로 제한되고, 데이터 압축은 50%까지 가능하다. EVM은 프론트홀 구간에서 아직 표준화 되지 않았으나 3GPP(3<sup>rd</sup> generation partnership project)에서 정의한 LTE표준에 의하면 신호가 송신될 때 eNodeB에서 변조 방식에 따라 QPSK의 경우 17.5%, 16QAM은 12.5%, 64QAM은 8% 이내의 값을 가지도록 제한되어 있다. 이 EVM 기준은 BBU와 RRH 사이를 포함한 프론트엔드에서 백홀 사이에서의 값이므로 프론트홀 구간만을 고려할 때 이 기준은 보다 엄격해 질 것으로 보인다. 이는 표1과 같이 종합할 수 있다<sup>[4]</sup>.

이러한 프론트홀 구간의 요구사항을 만족시키면서 네트워크화를 실현시키는 프론트홀 네트워크 기술들에 대한 연구도 태동되고 있다. CPRI over OTN은 초지연성에 부합되는 구조로써 ITU-T G.872에 규정된

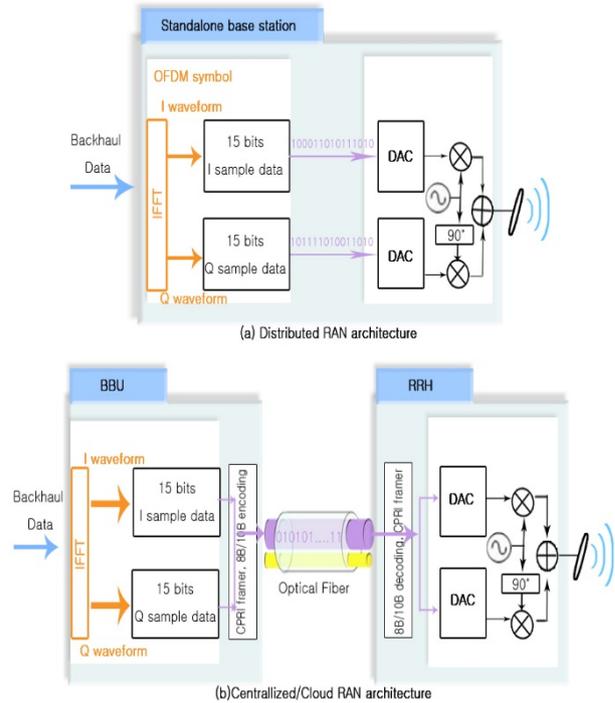


그림 1. (a) D-RAN과 (b) C-RAN의 구조  
Fig. 1. (a) D-RAN vs. (b) C-RAN architecture.

OTN은 광망요소들로 구성되며 ITU-T의 SG15 G.709 Appendix에서는 무선 액세스 망에서 쓰는 CPRI over OTN의 매핑 방식을 정의하고 있다<sup>[5~6]</sup>. CRPI over WDM/PON은 광케이블에 CPRI신호를 광다중화하여 전송하는 방식으로 전송 용량이 증대될 수 있는 기술이나 광스위치 등의 고비용 요소들이 ISP 사업자의 선택에 장애가 될 수 있다<sup>[7]</sup>. RoE는 프론트홀에 이미 많이 보급되어 있는 이더넷 스위치를 사용하는 기술로 적은 비용으로 구현이 가능하나<sup>[8]</sup>, 초지연 패킷 스위칭을 위한 시간 민감성 네트워크 기법을 필요로 한다.

이러한 기법들을 기반으로 지터 및 지연 정확도등 프론트홀 네트워크 요구사항을 정의하고 이동통신망의 요구사항을 만족시키기 위해 많은 연구가 진행되고 있으나, 이러한 기술들은 CPRI신호를 캡슐화하거나 매핑시키는 디지털 전송 기술들로써 급증하는 추세의 모바일 트래픽을 수용하려면 많은 양의 전송회선을 필요로 하게 된다. 즉, 8X8 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 안테나를 사용하고, LTE 채널 대역폭이 20MHz 인 시스템의 경우, 셀 내 최대 IP 처리량은 600Mbps이므로 이 트래픽을 전송하는데 요구되는 대역폭도 600Mbps이 된다.

그러나 이를 CPRI로 전송할 시, 주파수를 2채널 할당

표 1. 프론트홀에서의 요구사항  
Table 1. Requirements of fronthaul.

Parameters	Fronthaul requirements
BER	$10^{-12}$
Roundtrip latency	400 $\mu$ s
Roundtrip latency without fiber	5 $\mu$ s
Frequency error	$\pm 2$ ppb
Jitter	$\pm 32$ ns
Latency Accuracy without fiber	$\pm 16.276$ ns
Digital data compression	50%
EVM *	QPSK: 17.5% 16QAM: 12.5% 64QAM: 8%

(\*는 3GPP specification에서의 요구사항임)

하고, 샘플링 속도 30.72MHz, IQ 샘플 속도 15bit, 8B/10B 코딩, 상향 방향 링크 및 하향 방향 링크를 사용하고 3개의 섹터를 지원한다면, 최대 110Gbps ( $8 \times 2 \times 30.72M \times 15 \times 2 \times 10 / 8 \times 2 \times 3$ )의 대역폭이 요구된다. 이를 현재 주로 사용되는 2.5Gbps의 광케이블 시스템을 사용해 전송하려면 약 45회선이 필요하게 되는데 이는 ISP 사업자에게 비용부담이 될 뿐만 아니라, 실제로 네트워크를 구현하는데 어려움이 있다. 그에 비해 아날로그신호를 전송하는 RoF의 경우 MIMO 안테나 수와 채널의 대역폭, 섹터 수만 고려하면 되므로 전송한 CPRI와 같은 조건의 신호를 전송했을 경우 RoF는 약 2GHz정도의 대역폭만 필요하게 되어 CPRI를 기반으로 하는 디지털 전송방식보다 전송대역폭이 매우 적다<sup>[9]</sup>. 그러나 전송대역폭의 측면에서는 매우 우수하지만 다른 프론트홀 요구사항을 만족시키기 위해서는 다이내믹 레인지의 증대 등 연구가 필요할 것으로 보인다.

### III. RoF 시스템 구현

현재 이동통신망 구조는 프론트홀과 백홀, 또는 가입자 네트워크와 메트로 네트워크로 구분되어 있다. 그러나 광 네트워크 비용 절감을 위해 이러한 구분된 네트워크가 통합되는 추세로 전환되고 있으며, 이에 따라 고속 장거리 전송기술이 가입자 네트워크에 도입되면서 OFDM과 같은 코히런트 기법이 사용되고 있다. 현

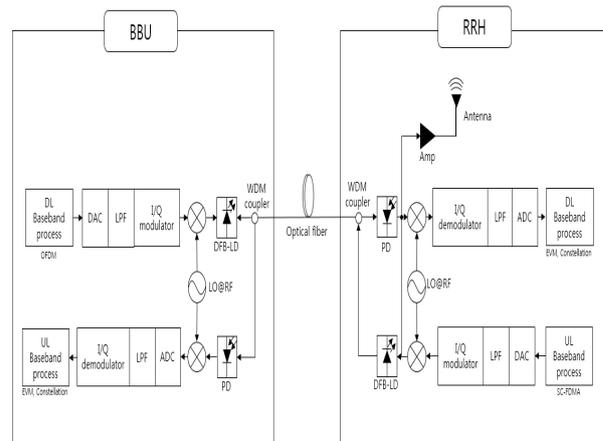


그림 2. 시스템 구성도  
Fig. 2. System configuration.

C-RAN구조에서는 BBU에서 생성된 기저대역 디지털 신호를 프론트홀 네트워크상에 전송한 후 RRH에서 무선 신호로 변환하기 위해서는, RRH에 DAC (Digital-to-Analog Converter)와 LO(Local Oscillator) 설치를 필요로 하게 되어, RRH에 부하부과가 발생한다. 그러나 OFDM 기반의 광라디오 신호를 생성시켜 RRH에 전송하게 되면 다수인 RRH에서의 부하를 덜 수 있고, 중앙처리기능 효과를 가져오게 되므로 경제적 이고 C-RAN구조에 부합되는 전송기법이 될 수 있다.

이에 CPRI 기반의 프론트홀 구간을 보완할 기술로 OFDM신호 기반의 RoF시스템을 구현하고 전송, 측정하였다.

시스템에서는 E-UTRA(Evolved Universal Terrestrial Radio Access)네트워크 eNodeB(eNB)를 구현해 하향 방향 링크로는 OFDM 신호를 전송하였고, 상향 방향 링크는 SC-FDMA방식을 사용하여, 실제 무선 단말기에서 전송되는 RF신호 방식을 재현하고자 하였다. 그림 2는 구현된 시스템 구성도이다.

BBU의 송신 기저대역신호처리부에서 생성된 OFDM 신호는 DAC를 통해 IQ데이터를 아날로그 신호로 변환하여 LPF(Low Pass Filter)와 IQ변조를 거친 후 LO로 주파수를 2.1GHz 대역으로 변환한다. 이 후 파장이 1550nm인 DFB-LD(distributed feedback laser diode) 직접 변조시켜 E/O변환된 신호는 10km의 광케이블로 전송된다. 이어서 RRH내의 PD를 통해 O/E변환된 아날로그 신호가 무선 단말기로 전송되어 안테나를 통해 전파된다. 측정에서는 안테나로 분기 시키지 않고 분석을 위해 이 RF 신호를 LO를 사용하여 다시 기저대역 신호로 변환을 시킨 후 스펙트럼을 관찰하였다. 이 후

IQ 복조 및 LPF, ADC (Analog-to-Digital Converter) 를 수행한 후 수신 기저대역신호처리부에서 신호처리를 통해 신호 정상도를 관찰하여 EVM 등 성능지표를 측정하였다. 마찬가지로 상향 방향 링크 또한 분석을 위해 RRH의 송신 기저대역신호처리부에서 SC-FDMA 신호를 생성하고 LO를 통해 2.1GHz 대역으로 변환시킨 후 파장이 1310nm인 DFB-LD를 통해 E/O변환을 거쳐 10km의 fiber 상에서 전송하였다. 이어서 BBU의 PD를 통해 O/E변환을 거친 후 LO를 변환하고, 스펙트럼을 관찰하였고 수신 기저대역처리부에서 신호처리를 통한 시스템 성능지표를 측정을 하였다.

하향 방향 링크의 송신 기저대역신호처리부를 보면 이진데이터를 입력 받아 S/P(Serial-to-Parallel) 변환을 거친 후 QPSK, 16QAM, 64QAM 등으로 변조시킨다. 이후 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)를 수행하고서 보호구간을 위한 CP(Cyclic Prefix)를 삽입해 준다. 변환된 신호는 P/S(Parallel-to-Serial) 변환을 거친다. RF 단말기를 구현한 수신 기저대역신호처리부에서는 송신부의 역 프로세싱이 진행되며 등화기를 통해 주파수 동기화, 위상 에러, 샘플 타이밍 에러 등을 보정한 후 복조를 한다. 상향 방향 링크의 SC-FDMA 방식은 송신 기저대역신호처리부에서 이진 데이터를 S/P 변환, QPSK, 16QAM, 64QAM 등의 변조 후에 DFT (Discrete Fourier Transform)처리를 하고 IFFT를 수행한다. OFDM 에 DFT 과정이 추가된 형태이다. 수신 기저대역신호처리부에서는 역으로 FFT 수행 후에 IDFT 처리를 하고 등화기 실행한다. 위 과정에서 PN 시퀀스를 사용하여 신호를 발생시켰고, FFT 사이즈는 512이고 16%의 CP를 사용하였다.

#### IV. 시스템상의 전송 결과 및 성능 측정

구현된 시스템 상의 실험에서는 안테나로의 분기시키지 않고 분석을 위해 RF 신호를 기저대역으로 변환시켜서 수신 기저대역신호처리부에서 신호처리를 수행하며 여러 시스템 파라미터를 측정하였다. 신호의 정상도 관찰 외에 CNR(carrier-to-noise ratio)에 따른 EVM을 측정하였는데 그 관계는 식(1)과 같다.

$$\text{CNR(dB)} = -20 \log_{10}(\text{EVM}/100\%) \quad (1)$$

3GPP의 LTE 요구사항에 따르면 EVM값은 QPSK, 16QAM, 64QAM 변조 방식에 따라 각각 17.5%,

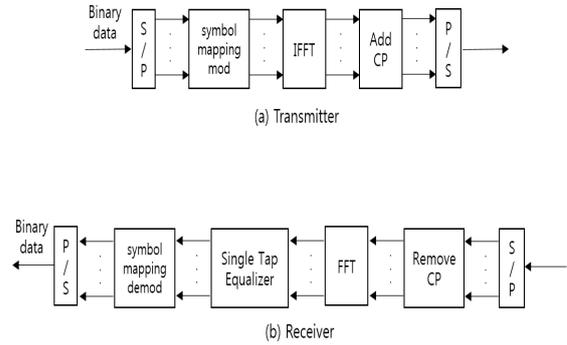


그림 3. (a) 송신부와 (b) 수신부의 기저대역 신호처리부  
Fig. 3. Baseband signal processing of (a) a Transmitting part and (b) a Receiving part.

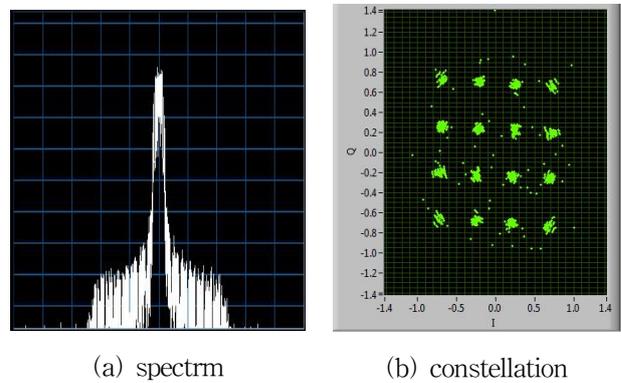


그림 4. 하향 방향 링크에서 수신된 16QAM OFDM 신호의 (a) 스펙트럼 및 (b) 정상도  
Fig. 4. (a) Spectrum and (b) constellation of downlink received 16QAM OFDM signals.

12.5%, 8% 이내로 제한하고 있으며 이에 해당하는 CNR 값은 각각 15dB, 18dB, 22dB이다. 그러나 이 EVM 제한치는 프론트홀 구간을 포함한 eNB 범위의 값이므로 프론트홀 구간에서는 CNR에 마진 5dB를 고려하여 최소 허용 기준 CNR을 20dB, 23dB, 27dB로 간주하였다.

하향 방향 링크의 16QAM OFDM 신호를 수신한 결과 CNR값이 23.54dB일 때 EVM는 6.65%로 측정되었다. 그림 4는 하향 방향 링크에서 수신된 16QAM OFDM 신호에 대한 스펙트럼과 정상도이다. OFDM 신호의 전송에 대해 프론트홀 구간만의 시스템 마진을 고려하면 CNR은 23dB 수준에서 EVM 요구조건을 만족시킬 것으로 보인다.

상향 방향 링크에서는 PN시퀀스로 데이터를 생성한 후 QPSK, 16QAM, 64QAM으로 변조시키고 SC-FDMA로 다중화하였다. 전송 프레임은 PUSCH(physi

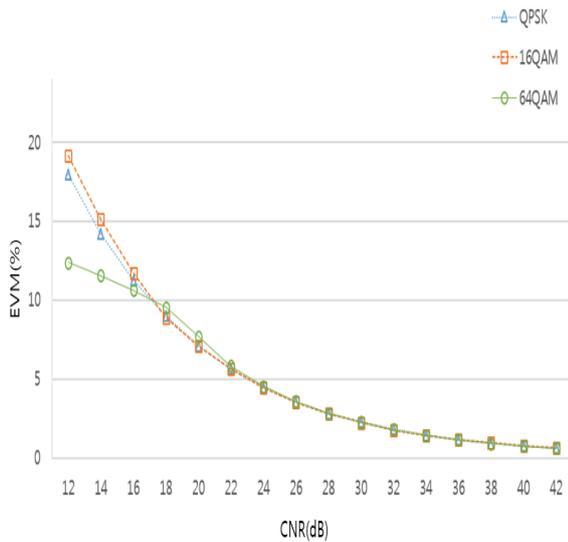


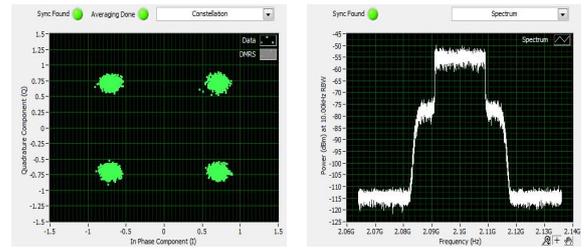
그림 5. 상향 방향 링크에서 CNR에 따른 여러 변조기법에 대한 EVM 측정그래프(△,□,○는 각각 QPSK, 16QAM, 64QAM에 대한 측정결과임)

Fig. 5. Experiment results of EVM versus CNR curve. (△,□,○ represent for the measurement of QPSK, 16QAM, and 64QAM signals respectively)

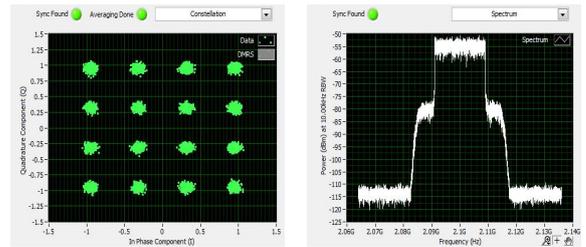
cal uplink control channel)를 구현하였으며 참조신호는 DRS(demodulation reference signal)를 사용하였다. 전송한 후 서로 다른 CNR값에 따라 EVM을 측정하였다. 그림4 는 상향 방향 링크에서 변조기법에 대한 CNR에 따른 EVM 측정값을 보여준다.

CNR의 범위가 12dB부터 42dB까지의 EVM를 측정 한 결과, 16QAM의 경우 이론적인 값과 근접한 값을 얻었고 CNR이 18dB에서 20dB사이의 범위 구간에서 EVM은 64QAM의 경우 9.57%, 16QAM 9.03%, QPSK 8.86%의 측정결과를 얻었다. CNR이 24dB 이상이면 변조 기법에 따른 EVM 측정치의 차이가 거의 없이 상기한 변조방식에 대해 EVM이 각각 4.49%, 4.46%, 4.53%인 결과를 보였다.

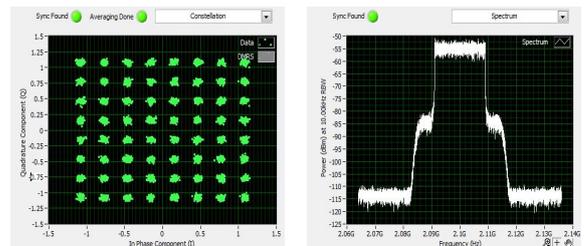
표1에서의 EVM의 요구사항은 3GPP에서 정의된 eNB구간에서의 규격이다. eNB에는 DAC, 증폭기, 기저대역신호처리부, RF변환 등 BBU와 RRH의 모든 운영장비를 포함하므로, 기저대역신호처리와 증폭기에서 생기는 손실 등을 고려하여 프론트홀 네트워크에서 5dB CNR 마진을 감안하면, 허용 EVM 값은 QPSK일 때 10%, 16QAM 7.08%, 64QAM 4.47% 이하가 요구되며, CNR이 20dB, 23dB, 27dB 이상에 해당하는 값이 이 EVM 요구조건을 만족할 것으로 보인다. 그림 6은 변조기법에 따른 상향 방향 링크의 수신 신호 정상도 및 스펙트럼을 (a) QPSK, (b) 16QAM, (c) 64QAM의 경우에



(a) QPSK



(b) 16QAM



(c) 64QAM

그림 6. 변조기법에 따른 상향링크 수신 신호 정상도 및 스펙트럼 (a) QPSK (b) 16QAM (c) 64QAM의 경우  
Fig. 6. (a) QPSK, (b) 16QAM, (c) 64QAM of uplink received Constellation and spectrum.

대해 측정된 것으로서, 이는 CNR 값이 각각 20dB, 23dB, 27dB일 때 관측한 결과이다.

결론적으로 프론트홀 네트워크에서 EVM 요구사항은 eNB시스템 전체의 EVM에 비해 마진을 고려하여 QPSK, 16QAM, 64QAM에 대해 각각 10%, 7%, 4% 수준이 타당하다고 제안할 수 있다.

프론트홀 네트워크에서 LTE 신호의 광 라디오파를 광케이블에서 전송시 주파수 효율성을 증대시키기 위해서는 64QAM 기법을 사용하여, 수신신호 CNR 27dB 이상의 신호품질이 요구되며, 더불어 이에 대한 송수신기의 다이내믹 레인지의 향상 등이 시스템 개발에 기여할 것으로 보인다.

## V. 결 론

본 논문에서는 BBU와 RRH를 분리 운영하는 C-RAN을 지원하는 프론트홀 네트워크 기법으로서

RoF 시스템을 설계 구현하여, 측정 분석하였다. 시스템 설계를 위해 프론트홀 네트워크에서의 요구사항을 고찰하고 CPRI와 RoF의 전송용량을 비교 분석하였다. RoF 시스템을 구성하여 다양한 변조나 다중 기법 기반의 신호를 전송하고 BBU기능을 구현한 기저대역 프로세싱을 통해 EVM 등 시스템 성능에 대한 검증을 수행하였다. RoF는 4G, 5G, Wibro 등 다중 무선 데이터 트래픽의 폭주에 대해 RRH 증설 등 업그레이드를 용이하게 하고, 기존의 D-RAN 구조에 비해 설치 운용 비용을 절감시킬 수 있는 차세대 프론트홀의 솔루션으로서, 향후 백홀 통합의 진보된 차세대 RAN 구성에 활용될 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 지원사업의 연구결과로 수행되었다(R0127-15-1048, IITP-2015-R0992-15-1017)

### REFERENCES

- [1] Anna Pizzinat, "C-RAN architecture and fronthaul challenges", LTE Backhaul Summit 2013, Amsterdam, Jun 2013.
- [2] Chih-Lin I, Yannan Yuan, Jinri Huang, Shijia Ma, Chunfeng Cui, Ran Duan, "Rethink Fronthaul for Soft RAN", IEEE Communications Magazine, pp. 82-88, September 2015
- [3] Anna Pizzinat, "Things You Should Know About Fronthaul", Journal of Lightwave Technology, vol. 33, no. 5, pp. 1077-1083, March 2015
- [4] CPRI Interface Specification, v. 6.1
- [5] Jesoo Ko, Ji-Wook Youn, Bheom-Soon Joo Jong Hyun Lee, Won Hee Lee, Sung Kyu Hyun, "CPRI/OBSAI Transport System based on the Low Latency OTN for the Radio Access network", The summer conference of Institute of Electronics and Information Engineers, vol.37-1, pp. 1894-1897, Jun 2014
- [6] Jesoo Ko, Ji-Wook Youn, Bheom-Soon Joo Jong Hyun Lee, Won Hee Lee, Sung Kyu Hyun, "Mapping and Multiplexing Method of CPRI signals into ODUk Frame", The summer conference of Institute of Electronics and Information Engineers, vol.37-1, pp. 1887-1889, Jun 2014
- [7] Sungman Kim, Sil-Gu Mun, Sangsoo Lee, "Required Specification Analysis of CPRI Link of 4G Mobile networks for Using WDM-PON Transmission", The Journal of Korea Information and Communications Society, vol. 37B, no. 7, pp. 499-504, July 2012
- [8] [http://www.ieee1904.org/3/meeting\\_archive/2015/02/tf\\_1502\\_ashwood\\_1.pdf](http://www.ieee1904.org/3/meeting_archive/2015/02/tf_1502_ashwood_1.pdf)
- [9] S. Kim, "Required Specificatio Anlysis of Radio over Fiber system for LTE-Advanced Fronthaul link", The Journal of Korea Institute of Electronic Communication Sciences, vol. 9, no. 8, pp. 915-919, September 2014

---

저 자 소 개

---

조 상 원(학생회원)

2015년 세종대학교 광전자공학과 학사 졸업.  
2015년~현재 세종대학교 석사과정 연구생  
<주관심분야 : 이동통신, 광통신, Radio over Fiber  
시스템 개발>

최 진 식(정회원)

1985년 서강대학교 전자공학과 학사 졸업  
1987년 KAIST 석사 졸업  
1995년 KAIST 박사  
1995년~2001년 공주대학교 교수  
2001년~2004년 한국정보통신대학교 교수  
2004년~현재 한양대학교 정교수  
<주관심분야 : SDN, 패킷 네트워크통신>

김 아 정(정회원)

1988년 서울대학교 물리학과 학사 졸업  
1995년 Northwestern 대 석사  
1996년 Northwestern 대 박사  
1998년 Motorola center for Telecom at NWU,  
Research Associate  
1998년~2003년 삼성전자, 삼성종합기술원  
연구원  
2003년~현재 세종대학교 정교수  
<주관심분야 : 유무선 시스템, 광통신, 보안>