

1. 서론

초고속 이동통신망은 디지털 유닛 (Digital Unit: DU)과 라디오 유닛 (Radio Unit: RU)으로 분리되는 CPRI (Common Public Radio Interface)/OBSAI (Open Base Station Architecture Initiative)기반의 디지털 광 전송 방식 기반의 모바일 프론트홀을 사용하는 클라우드 기지국으로 빠르게 전환되고 있는 추세이다[1]. 하지만 광대역 서비스 제공이 가능한 4세대(LTE-A: Long Term Evolution-Advanced) 및 5세대 이동통신망에서는 기존의 디지털 기반 광 전송 기술을 활용할 경우, 망 구축 비용이 과다하여 상용망 구축에 어려움이 예상되고 있다[2]. 따라서, 보다 단순하고 경제적인 클라우드 기지국의 구축 및 운용이

있고, 디지털 신호 처리 과정에서 발생하는 신호 지연에 의한 서비스 품질 열화를 피할 수 있다[4]. 또한 점대점, 스타 및 링 등 다양한 망 구조에 대한 지원이 가능한 장점도 제공한다[5]. 반면에 IF 다중화에 의한 잡음, 아날로그 광신호의 비선형성 때문에 발생하는 전송거리 제한 및 전송 성능 열화, DU의 대용량화에 따른 고속 대용량 데이터 정합, 광대역 디지털 IF 처리, 다중 IF용 RF 주파수 상/하향 변환 문제 등을 동시에 해결해야 하는 과제를 안고 있다[6].

본 고에서는 상술한 구조적, 경제적 장점을 수용하면서 동시에 여러 기술적 난제들에 대한 해결이 가능한 RoF 기반 차세대 모바일 프론트홀 구축을 위해 필요한 주요 핵심 요소 기술에 대해 열거하고 각각에 대한 구체적인 특징 및 장단점을 기술하였다. 더불어

특집 ■ 광통신

광기반 모바일 프론트홀 기술

조승현, 정환석, 이종현*

가능한 새로운 형태의 모바일 프론트홀용 광통신 기술이 요구되고 있으며, 구조가 단순하고 비용 효율적인 아날로그 RoF (radio over fiber) 광 전송 방식이 유력한 후보 기술로서 전세계적으로 거론되고 있다[3].

아날로그 RoF 광 전송 방식 기반의 차세대 모바일 프론트홀 기술은 이동통신용 디지털 기저대역 신호를 임의의 IF (Intermediate Frequency) 캐리어에 실어 주파수 영역에서 다중화한 후 저가의 직접 변조형 광원과 직접 검출 방식의 광검출기를 이용해 전송함으로써 DU/RU 플랫폼을 단순화 및 저가화할 수

모바일 프론트홀 관련 국내외 기술 및 시장 동향에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

2. 모바일 프론트홀 기술 개요

LTE (Long Term Evolution), LTE-A 및 WiMAX(Worldwide Interoperability for Microwave Access)를 포함한 광대역 이동통신 기술의 비약적인 발전으로 인해 기존의 이동통신 기지국이 수용해야 하는

* 한국전자통신연구원 광인터넷연구부

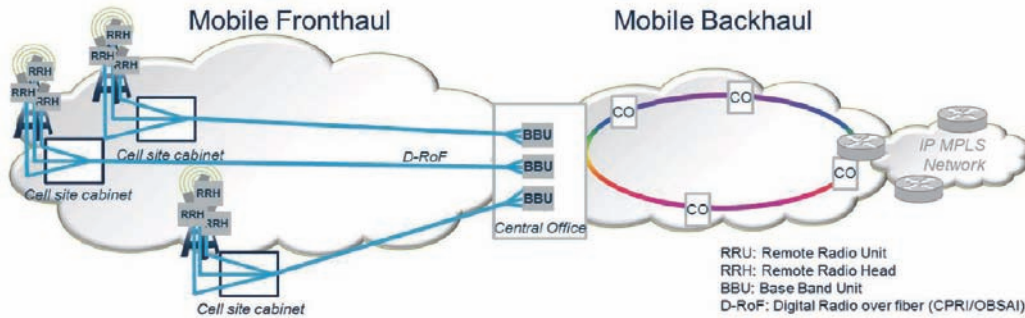
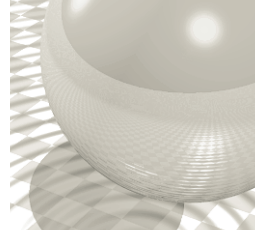


그림 1. 모바일 프론트홀 기술 개념도

트래픽 처리용량이 한계에 도달하고 있다 [7]. 이에 서비스 제공자들은 더 많은 수의 기지국을 증설해야 하는 문제에 직면하였고, 이는 결국 서비스 제공자들로 하여금 CAPEX (Capital Expenditure)와 OPEX (Operating Expenditure) 부담을 증가하는 결과를 초래하고 있다. 최근, 이를 개선하기 위한 기술로서 클라우드형 또는 중앙 집중화된 이동통신 기지국 구현 및 운용 기술 (Centralized-RAN or Cloud RAN 기술)이 출현하였고 이에 대한 연구가 현재 전세계적으로 활발하게 진행되고 있는 실정이다[8].

모바일 프론트홀은 <그림 1>과 같이 클라우드 컴퓨팅 개념을 도입하여, 전화국사에 이동통신 기지국의 디지털 신호 처리 기능을 담당하는 BBU (base band unit) 또는 DU를 두고, 설치비용 및 임대비용이 많이 소요되는, 옥외에는 최소한의 RF 소자들로 구성된 RRH (remote radio head) 또는 RU를 설치하여 운용하는 클라우드형 이동통신기지국 망에서 DU와 RU 사이를 연결해 주는 광 전송망을 지칭한다. 지금까지는 모바일 프론트홀 광 전송 기술로서 CPRI(common public radio interface) 또는 OBSAI (open base station architecture initiatives) 기반의 프로토콜을 사용하는 디지털 기반의 광 전송 방식이 주로 사용되어 왔다[5,9]. 기존의 CPRI/OBSAI 기술이 DU-RU 간 무선 신호를 양자화하여 디지털로 전송하는 것과 달리, RoF (Radio over Fiber) 기반 모바일 프론트홀 기술은 협대역의 이동통신용 기저대역 신호를 IF (intermediate frequency) 기반의 주파수 다중화 방식과 비용 효율적인 직접 광 변조 방식을 사용하여 전송함으로써 1) RU는 단순화 및 저가화하고, 2) DU는 고집적, 대용량화함으로써 비용

효율적인 차세대 모바일 프론트홀 구현 및 운용 기술로 인식되고 있다[2].

향후 이동통신용 클라우드 기지국이 LTE-A를 거쳐 5세대 이동통신기술로 발전하면서 모바일 프론트홀 관련 장비 수요 및 이로 인한 구축비용은 급격히 증가할 전망이다. 이는 <그림 2>에서 나타난 바와 같이 현재의 이동통신망 구축비용 중 기지국 임차료 및 전송비용이 약 50%를 차지하고 있다는 사실과, 수년 내에 LTE-Adv. Rel. 10 이상의 표준규격에 기반한 이동통신 기술 적용 시 RU-DU간 20.65Gbps 이상의 대역이 소요되며, 이를 지원하기 위한 광전송 비용이 급증할 것으로 예상되므로 기지국의 소형화와 광 전송 비용 (광섬유, 광모듈) 절감이 가능한 RoF 기반 모바일 프론트홀 기술이 차세대 이동통신 기지국 구축 및 운용을 위해 반드시 필요하게 될 것이다.

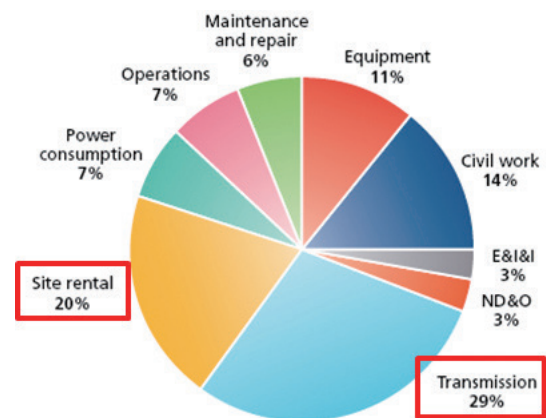


그림 2. 이동통신망 구축 비용 분석 결과

3. RoF 기반 아날로그 광 전송 기술

RoF 기반 차세대 모바일 프론트홀에서는 <그림 3>과 같이 이동통신 기저대역 신호를 서로 다른 중간 주파수(IF: Intermediate Frequency)로 변환 후, 직접 아날로그 광신호로 DU로부터 RU까지 혹은 그 반대로 전달하며, DU와 RU에서 디지털화 과정을 거치지 않으므로 기본 대역폭 이상의 속도 증가가 없는 장점을 제공한다. 또한 DU와 RU를 연결하는 형태에 따라 점-대-점(point-to-point) 전송망, 점-대-다점(point-to-multi point)형 전송망, 링형 전송망 등으로 구성이 가능하다. 이처럼 구조가 단순하고, 최소 전송 대역폭만 필요하므로 경제적인 구축과 운용이 가능하여 차세대 이동통신 기저국 기술로 적합하다는 평가를 받고 있다. 하지만 IF 다중화에 의한 잡음 및 아날로그 광신호의 비선형성 때문에 전송거리 제한 및 EVM(Error Vector Magnitude) 성능 열화가 발생할 수 있는 단점 또한 제공한다.

RoF 기반 아날로그 광신호를 전송하기 위한 아날로그 광전송 기술은 1) 광신호를 전기신호로, 또는 전기 신호를 광신호로 변환하는 아날로그 광 송수신기 기술, 2) 전광 변환 과정에서 발생하는 비선형성을 보상하기 위한 등화기 기술, 3) RU와 DU 간에 아날로그 신호를 전송하기 위한 아날로그 광링크 기술로 구성된다.

아날로그 전기 신호를 광신호로 변환하여 광섬유를 통해 전송하기 위한 광송수신기는 <그림 4>와 같이 입력되는 신호의 크기 정보와 비례하는 레이저 인가 전류를 이용해 직접 변조함으로써 광신호를 생성하며, 광수신기는 직접 검출 방식을 사용하여 광신호를

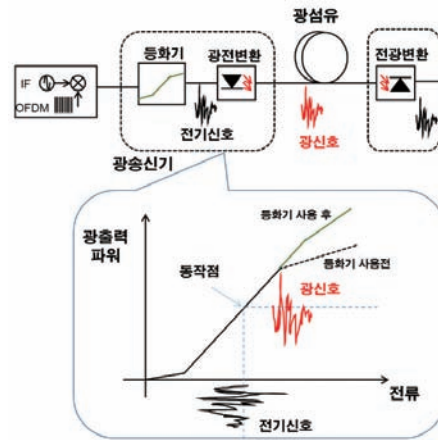


그림 4. 아날로그 광송수신기 구조 및 동작 원리

전기신호로 변환한다. 아날로그 광 송수신기는 기존의 CATV (Cable Television) 또는 DAS (distributed antenna system) 등의 응용분야에서 사용되어 오던 일반적인 아날로그 광 송수신기와 유사하나 모바일 프론트홀 분야에 적용되기 위해서는 혼변조 왜곡 특성 개선, IF 운영 주파수 대역 내에서의 주파수 평탄도 확보 및 DU-RU간 감시 제어 정보 교환을 위한 IF 기반 제어 채널 구현 및 운용 방법등의 부가적인 요소 기술들이 추가되어야 한다[10].

등화기는 전류 (또는 전기신호)와 광 출력간의 선형적 관계가 유지되는 영역을 증가시켜 광 송수신기에 인가할 수 있는 RF 신호의 크기를 증가시키는 역할을 수행한다. 아날로그 전치왜곡 회로(Analog Pre-distortion Circuit)기반의 등화기는 가격이 저렴하고 직접화가 가능하여 시스템에 적용하기 용이하다는 장점을 갖고 있다. RoF 기반 모바일 프론트홀 광링크의 비선형 왜곡

보상을 위한 등화기는 현재 대칭형 및 비대칭형 등화기에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 대칭형 등화기는 입력 RF 신호의 경로를 대칭적으로 나누어 홀수 차 항의 비선형성을 보상하는 구조를 가지며, 보상 대역이 넓고 사용 소자의 숫자를 줄일 수 있어 IF 다중화 기반 모바일 프론트홀 광링크 구축시 매우 유용하다[11]. 이에 대한 구조를 <그림 5>에

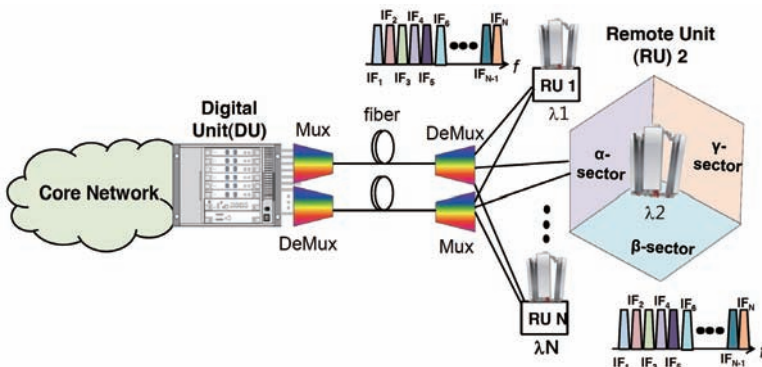


그림 3. 중간주파수를 사용하는 RoF 기반 차세대 모바일 프론트홀 기술 개념

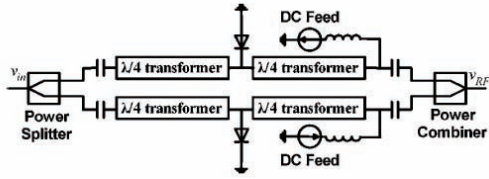
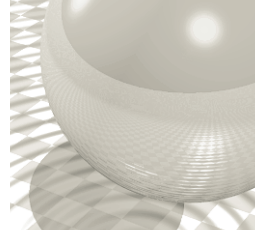


그림 5. 대칭형 등화기 회로 구조 [11]

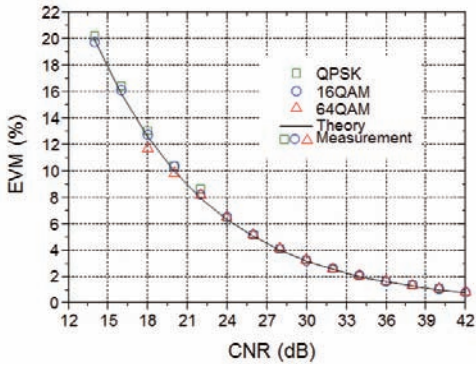


그림 6. LTE 신호 전송시 변조방식별 CNR과 EVM의 관계

나타내었다. 반면에 비대칭형 등화기는 2차, 3차 비선형 항을 독립적으로 보상 가능하며, 다수의 tank circuit을 이용해 보상 주파수의 범위 조절이 가능하므로 IF 운용 대역폭이 좁은 경우 사용 가능한 기술이다[12].

아날로그 광 링크 기술은 기저대역 이동통신 신호를 왜곡 없이 전송하기 위한 광 링크 운용 변수의 최적화를 담당한다. 상술한 최적화된 광 링크 운용 변수 도출을 위해서는 LTE 기반 이동통신 신호를 IF 다중화하여 광 전송할 경우, 아날로그 광 링크에서 요구되는 IF 채널당 광 변조지수 대비 최소 CNR (Carrier-to-Noise Ratio)에 대한 분석 및 전송 성능인 EVM과 CNR사이의 관계 분석 등이 있다. <그림 6>에는 IF에 LTE신호를 전송할 때 변조방식에 따른 EVM 과 CNR의 관계를 참고로 제시하였다.

4. DU-RU 플랫폼 기술

클라우드 기지국은 클라우드 컴퓨팅 개념을 이동통신 네트워크에 적용시킨 것으로서, 범용 서버 기반의 플랫폼 구성 및 가상화를 통해 기지국 기능을

동적으로 수행할 수 있으며, 무선 자원의 유연한 관리 및 네트워크 진화가 용이한 기술이다. 이를 위해 기존 이동통신 기지국에서 하나의 장비로 구성되어 있던 DU와 RU를 분리하여 DU는 별도의 DU센터에 위치시켜 집중화 및 가상화하고, 서비스 대상 지역에 RU만을 원격으로 배치하여 DU와 RU를 연결하는 구조를 가지게 된다. DU의 기본 기능을 포함하여 지원하는 다수 셀의 무선자원을 통합 관리하는 제어 서버, 각 서비스 지역에 설치가 용이하도록 소형화된 RU와 이 구간을 연결하는 광링크로 구성된다.

이러한 구성이 가능하도록 하는 주요 핵심 기술로는 첫째로, DU와 RU 사이의 물리적 전송 규격, 데이터 프레임과 시간 동기화 관련 정보, 제어 정보 등을 포함한 DU-RU간 인터페이스 규격을 정의하고 이에 맞게 구현하는 DU-RU 분리 운용 기술을 들 수 있다. 둘째로, DU의 기저대역 신호 및 프로토콜 처리를 수행하는 부하의 동적 할당 및 확장성을 위해 클라우드 컴퓨팅 개념의 모바일 네트워크 도입이 필요하다. 이를 위해 많은 양의 연산을 필요로 하는 기저대역 신호처리를 다수의 프로세서를 활용해 유연하게 처리할 수 있는 범용 프로세서 기반의 기저대역 신호처리 플랫폼 기술을 들 수 있다. 셋째로, 다수 셀의 무선자원에 대한 효율적 할당 및 통합 관리 제어 기술을 들 수 있다. 무선자원을 통합 관리하는 주요 핵심 기능으로는 기지국간 협력 전송, 자원 조율, 부하 분산 등이 있다.

DU-RU 간의 연결 형태는, <그림 8>의 상단에 도시된 바와 같이 CPRI 형태의 기저대역 디지털 신호를 광케이블로 전송하는 디지털 링크형 DU-RU 구조로서, DAC (Digital to Analog Converter) 또는 ADC (Analog to Digital Converter) 컴포넌트들이 RU에 속해져 있어서 RU의 복잡도가 커지고 가격 또한 높아진다. 반면에 RoF 기반 모바일 프론트홀 구조에서는 <그림 8>의 하단에

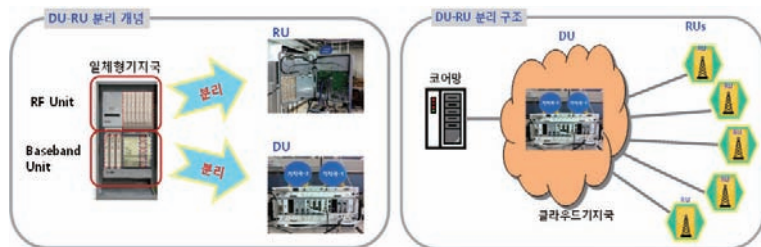


그림 7. DU-RU 분리 개념

광기반 모바일 프론트홀 기술

도시된 구조와 같이 DU-RU 간의 연결을 위해 아날로그 IF (Intermediate Frequency) 신호를 광케이블로 전송하는 형태로서, DAC 및 ADC 컴포넌트들이 DU 블록에 위치함으로써 RU의 복잡도를 줄인 compact-RU 구조를 활용하여, 비용 효율적이며 DU 집중화가 극대화된 구조를 갖는 차세대 클라우드 기지국에 적합하다.

아날로그 RoF 기반의 차세대 모바일 프론트홀 구축을 위해서는 기존의 디지털 방식 모바일 프론트홀 구성요소들 중 DU 및 RU의 광인터페이스 관련 기능 블록들의 변경이 필요하다. 이에 RoF 기반 모바일 프론트홀 지원이 가능한 DU 플랫폼의 구성도를 <그림 9>에 나타내었다. 대용량 DU 기저대역 데이터 처리기술은, 만약 LTE 서비스의 한 서비스 밴드의 점유대역폭이 20MHz라면, I, Q 데이터가 30.72Mbps의 속도를 가지므로 이에 따라 12개의 밴드를 전송하기 위한 총 데이터량은 $30.72\text{Mbps} \times 2(I/Q) \times 12(\text{밴드수}) \times 16 \text{ bit (ADC/DAC resolution)} = 12\text{Gbps}$ 정도의 속도가 상하향 링크 각각 전달되므로, 이 환경의 기저대역에서 움직이는 고속의 데이터를 처리하는 기술을 의미한다. DU의 광대역 digital-IF 기술은, 대용량 DU를 개발하기 위해서 광링크를 통하여 송수신하고자 하는 여러 개의 IF 밴드가 결합된 넓은 대역의 신호를 디지털 신호 처리를 통해 IF 주파수대로 상하향 변환하는 기술이다 [13]. 이처럼 1GHz 대역폭 이상의 광대역 신호들을 광대역 digital-IF 기술을 사용하지 않고, 아날로그 IF 기술을 활용하여 구현한다면, IF 밴드 수만큼의 ADC, DAC 컴포넌트의 수가 추가적으로 필요하며 각각의 ADC, DAC 경로간의 crosstalk 문제나 신호 경로별 간섭문제가 심각하게 작용할 수 있어 구현 및 제작에 어려움이 발생할 뿐만 아니라 복잡도와 그에 따른 비용이 많이 늘어날 것이다. 그 뿐만 아니라 기존의 Double Conversion

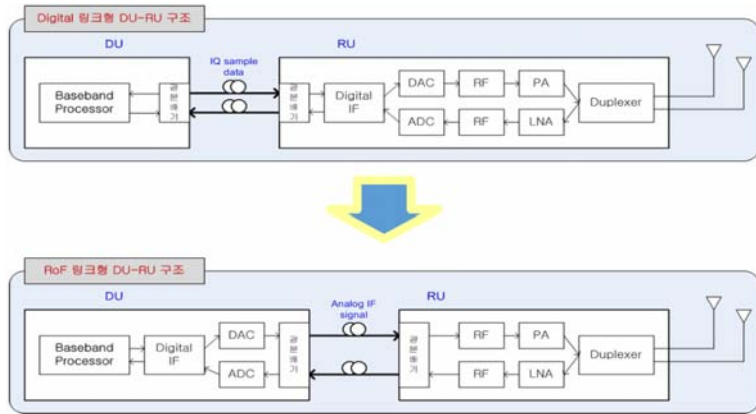


그림 8. Digital 링크형 및 RoF 링크형 DU-RU 구조

방식이나 Direct Conversion 방식의 IF 트랜시버에 비하여 Digital-IF 기술을 채택한 트랜시버는 여러가지 장점을 갖는다. 먼저 아날로그 소자의 수를 대폭 줄임으로써 이들이 갖는 비선형에 의한 신호 왜곡, 비정상적인 이득조절에 의한 신호 포화, DC 오프셋, I-Q 신호이득의 불일치, I-Q 위상 불일치 등을 극복하여 시스템 성능에 큰 향상을 가져온다. 더욱이 디지털 신호처리 영역이 커지므로 타 통신 방식에서의 재구성 이용이하고, 단일 칩화가 가능하며, 개별 칩의 성능차 거의 없어서 기존 아날로그 방식이 갖는 튜닝에 소요되는 시간과 노력을 줄일 수 있다. 다만 소모전력 문제로 인하여 주로 기지국에서 사용된다는 점과 아날로그-디지털 변환에 고속의 ADC/DAC를 사용하므로 샘플 클럭의 위상잡음 특성에 민감하여 jitter 특성이 우수한 샘플링 클럭이 요구된다. DU의 고속 ADC/DAC 기술은, 광대역 신호를 DAC 및 ADC 수행하기 위해서는 고속 ADC 및 고속 DAC를 이용한 구현 기술 등이 필수적이다.

한편, <그림 10>과 같이 RU의 멀티IF용 RF주파수 상하향 변환기 기술은, compact-RU 장치의 구현을 위해

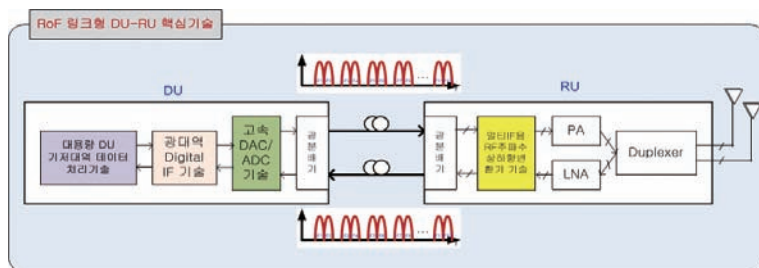


그림 9. RoF 링크형 DU-RU 구조

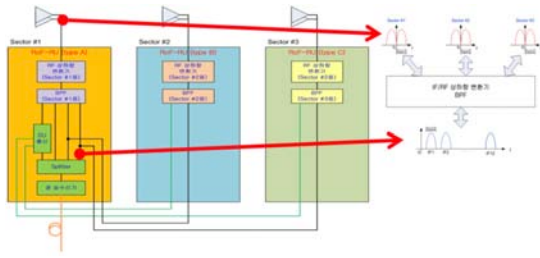
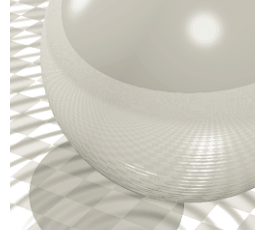


그림 10. Compact-RU 멀티IF용 RF 주파수 상향 변환기 구조

멀티IF 신호를 보다 효율적으로 RF 상향 변환하는 구현기술과 compact-RU 구조 설계 기술들이 요구된다. 또한 RoF 기반 차세대 모바일 프론트홀용 compact-RU에서는, 첫 번째 sector를 관장하는 RU가 두 번째 및 세 번째의 sector에 위치한 RU에 멀티IF신호를 분배하는 구조를 가짐으로써, sector별로 중복되는 콤포넌트를 제거하고 컴팩트한 구조로 구현이 가능하며, DU와의 통신기능을 탑재하여 DU에서 중앙제어가 가능한 구조이다.

5. 국내외 기술 및 시장 동향

차세대 모바일 프론트홀 구축시 소요되는 아날로그 광 전송기술 및 DU-RU 플랫폼 기술과 관련하여 전세계의 다양한 기관에서 도전적인 연구결과들이 현재까지 발표되고 있다. 일본의 Matsushita Electric Industrial Company Ltd.는 2006년 IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 논문을 통해 RoF 기술을 활용한 다중 채널 Wireless LAN 시스템의 전송 성능 시험 결과를 발표하였다 [10]. 미국의 조지아 공대, 덴마크공대, 포르투갈의 슈피리어 공대 등에서도 최근 OFC (Optical Fiber Communication Conference)에 모바일 프론트홀 응용을 염두에 두고 IF 기반 전송실험 결과들을 발표하였다[14,15,16,17]. EU FP7 FUTON Project에서는 IF 대역 주파수 다중화를 통해 100 MHz, 2 섹터, 2개의 안테나를 가지는 RAU를 지원하는 RoF 링크 구조를 제안하고, 전송 성능을 분석한 결과를 Journal of Lightwave Technologies에 발표하였다[3]. ETRI에서는 60 GHz 대역의 밀리미터파를 사용하여 HD-TV 신호를 유무선 링크를 통해 전송한 결과를 2007년에 Journal of Lightwave Technologies 발표하였다[18]. KAIST

표 1. RoF 기반 차세대 모바일 프론트홀 관련시장 전망

구분	2017	2018	2019	2020	2021
직접시장					
- 기지국	46.5	48.8	51.3	53.9	56.7
- 클라우드	33.2	40.6	49.7	60.7	74.1
간접시장					
- 사물인터넷	13.5	15.1	16.9	18.9	21.2
- 융용시장	137.7	171.8	214.4	267.6	333.9
합계	230.9	276.4	332.3	401.1	486.0

에서는 광섬유를 이용한 CATV 신호 전송, CDMA 이동통신 신호 전송에 대한 기초 연구를 2000년대에 다양하게 수행하였고, 관련 결과를 다수의 논문지등에 발표하였다[19].

4세대 이동통신 시스템에서 효율적인 망구축 및 운용을 가능케 하는 기술들로 알카텔루슨트는 lightRadio, 에릭슨은 AIR, 노키아지멘스네트웍스는 Flexi Packet Microwave, ZTE는 Cloud RAN (Radio Access Network) 관련 기술들을 발표하였다. 상술한 제품들은 일부 상용화가 진행중이나 점점 광대역화되고 있는 데이터를 수용하기 위한 RU와 DU 간 광 인터페이스 용량 극대화가 큰 부담이 될 것으로 예측된다. 삼성전자는 WMC2011에서 LTE 분리형 기지국 및 피코셀, multi-standard 기지국 및 주파수 별 RRH를 시연하였다.

RoF 기반 차세대 모바일 프론트홀 관련시장은 직접시장인 기지국 시장과 간접시장인 클라우드 및 사물인터넷의 인프라 시장 그리고 응용 시장인 스마트 그리드 시장까지 확장 될 수 있을 것으로 예상되며, 본 기술이 적용될 수 있는 관련 시장은 2017년 기준 약 231조원 규모로 추정되며, 2021년에는 약 486조원으로 성장할 것으로 ETRI 기술경제연구부에서 2013년에 예측보고서를 발표하였다.

6. 결론

본 고에서는 RoF 기반 차세대 모바일 프론트홀 시스템 구현을 위해 필요한 주요 핵심 요소 기술에 대해 열거하고, 각 기술 별 특징 및 장단점을 기술하였다. 또한 모바일 프론트홀 관련 국내외 기술 동향 및 시장 상황에 대해 분석하였다. 가까운 미래에 4G 이동통신 시스템의 고도화 및 5G 이동통신 기술 상용화가 진행될 것으로 예상되며, 그에 따른 모바일 프론트홀 관련 장비 및 시스템 시장에서의 국제적인 주도권확보를 위해서는 RoF 기반 모바일 프론트홀 관련 요소기술들에 대한 산학연 주체들의 관심과 노력이 시급한 실정이다.

참고문헌

[1] A. Fehske, G. Fettweis, J. Malmodin, and G. Biczok, "The Global Footprint of Mobile Communications: The Ecological and Economic Perspective," *IEEE Comm. Mag.*, 49(8), 55–62 (2011).

[2] S. Cho, H. Park, H. S. Chung, K. Doo, S. Lee, and J. H. Lee, "Cost-effective Next Generation Mobile Fronthaul Architecture with Multi-IF Carrier Transmission Scheme," in *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest* (online) (Optical Society of America, 2014), paper Tu2B.6.

[3] D. Wake, A. Nkansah, and N. J. Gomes, "Radio Over Fiber Link Design for Next Generation Wireless Systems," *J. Lightwave. Technol.*, 28(16), 2456–2464 (2010).

[4] H. S. Chung, S. Cho, C. G. Han, S. Lee, J. C. Lee, and J. H. Lee, "Design of RoF based Mobile Fronthaul Link with Multi-IF Carrier for LTE/LTE-A Signal Transmission," presented at the 2014 International Topical Meeting on Microwave Photonics, Sapporo, Japan, 20–23 Oct. 2014

[5] CPRI Specification V6.0 (2013–08–30)

[6] C. H. Cox III, E. I. Ackerman, G. E. Betts, and J. L. Prince, "Limits on the Performance of RF-Over-Fiber Links and Their Impact on Device Design," *IEEE Trans. Micro. Theo. Tech.*, 54(2), 906–920 (2006).

[7] Y. Choi, Y. Lee, and K. Chang, "Adaptive Resource Allocation for Uplink Carrier Aggregation Scheme in LTE-A-Type Networks," *ETRI Journal* 34(5), 759–762 (2012).

[8] Y. Okumura and J. Terada, "Optical Network Technologies and Architectures for Backhaul/Fronthaul of Future Radio Access supporting Big Mobile Data," in *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest* (online) (Optical Society of America, 2014), paper Tu3F.1.

[9] Open Base Station Architecture Initiative BTS System Reference Document Version 2.0 (2006)

[10] T. Niiho, M. Nakaso, K. Masuda, H. Sasai, K. Utsumi, and M. Fuse, "Transmission Performance of Multichannel Wireless LAN System Based on Radio-Over-Fiber Techniques," *IEEE Trans. Micro. Theo. Tech.*, 54(2), 980–989 (2006).

[11] Yiming Shen et al., "A Novel Analog Broadband RF Predistortion Circuit to Linearize Electro-Absorption Modulators in Multiband OFDM Radio-Over-Fiber Systems," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 58(11), 3327–3335, (2010).

[12] Ran Zhu et al., "Broadband Predistortion Circuit Using Zero Bias Diodes for Radio Over Fiber Systems," *Photonics Technology Letters, IEEE*, 25(21), 2101–2104, (2013).

[13] 유봉국, 방영조, 김진업, "기자국용 Digital IF 방식 트랜시버 기술," *주간기술동향 통권 1350호*, 2008. 6월

[14] A. Chowdhury, H. Chien, J. Wei, and G. Chang, "Multi-service Multi-carrier Broadband MIMO Distributed Antenna Systems for In-building Optical Wireless Access," in *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest* (online) (Optical Society of America, 2010), paper JWA57.

[15] C. Liu, L. Zhang, M. Zhu, J. Wang, L. Cheng, and G. K. Chang, "A novel multi-service small-cell cloud radio access network for mobile backhaul and computing based on radio-over-fiber technologies," *J. Lightwave Technol.*, 31(17), 2869–2875 (2013).

[16] A. Caballero, S. Wong, D. Zibar, L. G. Kazovsky, and I. T. Monroy, "Distributed MIMO Antenna Architecture for Wireless-over-Fiber Backhaul with Multicarrier Optical Phase Modulation," in *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest* (online) (Optical Society of America, 2011), paper OWT8.

[17] Tiago Alves, Maria Morant, Adolfo Cartaxo and Roberto Llorente, "Wired-Wireless Services Provision in FSNAN NG-PON2 Compliant Long-Reach PONs: Performance Analysis," in *Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest* (online) (Optical Society of America, 2013), paper OM3D.3.

[18] H. Kim and Y.C. Chung, "Passive Optical Network for CDMA-Based Microcellular Communication Systems," *J. Lightwave. Technol.*, 19(3), 301–311 (2001).

[19] Hwan Seok Chung, Sun Hyok Chang, Jong Dae Park, Moo-Jung Chu, and Kwangjoon Kim, "Transmission of Multiple HD-TV Signals Over a Wired/Wireless Line Millimeter-Wave Link With 60 GHz," *J. Lightwave. Technol.*, 25(11), 3413–3418 (2007).

약력

조승헌



- 2000년 3월 - 현재
한국전자통신연구원 선임연구원
- 2010년 2월
한양대학교 신소재공학부 공학박사

정환석



- 2005년 7월 - 현재
한국전자통신연구원 책임연구원, 광기입자연구실장
- 2004년 3월 - 2005년 6월
KDDI R&D Labs Research Engineer
- 2003년 9월 - 2004년 2월
한국과학기술원 정보전자연구소 연수연구원
- 2003년 8월
한국과학기술원 전기및전자공학과 공학박사

이종현



- 1983년 3월 - 현재
한국전자통신연구원 책임연구원, 광인터넷연구부장
- 1993년 2월
성균관대학교 전자공학과 공학박사