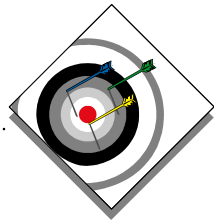


포/커/스

RoF(Radio over Fiber) 기술 동향 및 전망

김진태* 박종대** 주무정*** 박권철****

최근까지 정보통신망은 광대역, 저손실 특성의 광통신기술과 가입자의 이동성을 보장하는 무선통신 기술이 독립적인 기술로서 상호 보완적인 관계로 발전되어 왔으나 유선과 무선통신 기술이 결합하여 여러 종류의 대용량 멀티미디어 정보통신 서비스를 가능하게 하도록 초고주파를 초고속 광통신 망에 연동시킨 RoF 기술에 관심이 집중되고 있다. 본 고에서는 이와 같은 RoF 기술의 동향과 전망에 대해 살펴본다. ▧

목 차

* ETRI 광응용기술팀/책임연구원
** ETRI 광응용기술팀/선임연구원
*** ETRI 광응용기술팀/팀장
**** ETRI 광전달망연구그룹/그룹장

Ⅰ. 서 론

정보통신 서비스의 다양화와 급속한 증가로 인해 광통신 기술과 무선통신 기술이 결합되어 초고속 무선 멀티미디어 통신 서비스를 제공해야 할 필요성이 증대하고 있다.

이에 유선과 무선통신 기술이 결합하여 여러 종류의 대용량 멀티미디어 정보통신 서비스를 가능하게 하도록 초고주파를 초고속 광통신 망에 연동시킨 광-무선 통신 기술에 관심이 집중되고 있으며, 두 기술의 융합에 따른 통합 기술 즉, 고속 전송을 위해 광통신 기술과 이동성을 위한 무선 기술을 동시에 사용하는 RoF(Radio over Fiber) 기술이 활발히 연구되고 있다[1,2].

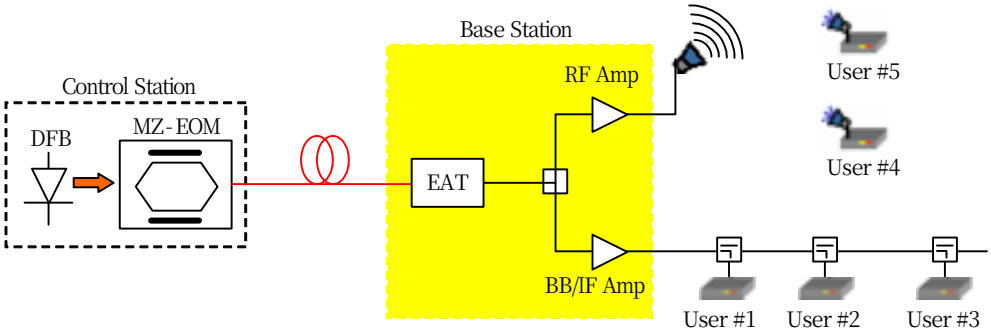
RoF 시스템은 채널 용량의 광대역화, 저가, 저전력, 용이한 설치 및 운용관리 등의 많은 이점을 갖고

있어 공항 터미널이나 쇼핑센터 및 대형 사무실과 같은 In-door 에서의 응용뿐만 아니라 지하 터널, 좁은 거리 및 고속 도로와 같은 Out-door 응용에서도 초고속의 무선 멀티미디어 서비스를 위한 적절한 해결책을 제공하고 있다. 그리고 서비스 대역폭 측면에서 현재 가입자에게 xDSL 및 WLAN 에 의한 수 Mbps 의 데이터 전송은 향후 HDTV 등 초고속 멀티미디어 서비스를 제공하기에는 역부족이며, 차세대 무선 멀티미디어 시스템에서는 최소한 100Mbps 의 데이터 전송을 요구하고 있는 실정이다.

이에 따라 가입자의 서비스 대역폭을 확장하기 위해, 광통신 기술을 활용하여 캐리어 주파수를 초고주파 대역으로 확대하는 RoF 기술을 사용함으로써 효과적으로 광대역 무선 멀티미디어 통신환경이 제공될 수 있다. 또한 수 100Mbps 급의 광대역 무선 멀티미디어 데이터통신은 30GHz 이상의 밀리미터파 사용이 필수적이며 짧은 전송거리로 인하여 많은 기지국의 증설이 요구된다. 이 경우 중앙처리국에 모든 전기적 신호처리 장치를 집중화시키고 무선기지국은 단순한 물리층 기능의 원격안테나 기능을 수행함으로써 효과적인 자원관리, 저가의 무선기지국, 동적인 대역폭 할당 및 프로토콜에 무관한 RoF 시스템을 구축할 수 있는 장점이 있다.

II. 국내외 개발 동향

유럽은 1990 년대 초부터 RoF 프로젝트를 추진하고 있으며 ACTS(Advanced Communications Technologies and Services) 프로그램의 일환으로 FRANS(Fibre Radio ATM Network and Service) 과제를 통해 622Mbps 다운링크와 40Mbps 업링크 전송능력을 갖는 30GHz 무선포트 및 이를 위한 광소자, 광제어 기술, 통신시스템 기술 개발을 수행하였고, 2001 년부터 시작된 OBANET (Optically Beam-formed Antennas for adaptive broadband fixed and mobile wireless access



(그림 1) GANDALF 프로젝트의 유무선 통합 시험망 구성도

NETworks) 프로젝트에 의해 40GHz 의 밀리미터파 대역에서 최대 155Mbps 의 고정 및 이동 광대역 무선 액세스 시스템을 구성하기 위한 광소자, 안테나 및 시스템 기술 개발을 추진하고 있다. 그리고 2003 년부터 시작된 GANDALF(Gbit/s Access Network using remote Delivery opticAL Feeder for heterogeneous broadband wireless and wireline nodes) 프로젝트에서는 이종의 유무선 액세스 네트워크를 하나로 통합하기 위해 동일한 데이터 포맷과 프로토콜을 사용하며 (그림 1)과 같이 Baseband, IF(Intermediate Frequency) 및 RF(Radio Frequency) 신호를 동시에 변조하여 전송하는 시스템 구조에 관해 연구하고 있다.

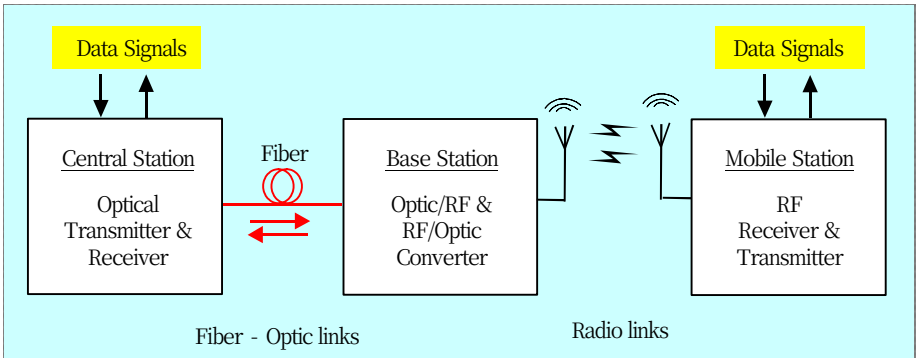
영국 BT 에서는 1997 년 InGaAsP/InP EAM(Electro Absorption Modulator)을 사용하여 MWP (MicroWave Photonics) 테스터베드를 구성하여 6m×3m 공간에서 3Mbps 데이터 송수신 실험 이후 무선 커버리지가 7km 되는 시스템 개발에 성공하였고, 이후 수십 GHz 대역의 EAM 연구 개발을 지속적으로 수행하고 있으며, 일본은 90GHz 대역 밀리미터파 광파이버/무선 LAN, 위성간 광링크 등에 대한 연구를 도쿄대, 오사카대학 등 학교와 CRL 등 국책 연구 기관에서 수행 중이고, NTT 를 중심으로 MWP/MMWP 관련 소자 중심의 연구가 활발히 진행되어 2001 년 High-power 120GHz Photonic emitter 를 사용하여 2.5Gbps 의 데이터 전송 시험을 하였고, 2003 년에는 10Gbps 데이터 전송 시험을 하였다.

미국의 경우 60GHz 대역 밀리미터파 통신 시스템을 Lucent Technology 에서 연구 수행 중이며, MIT Lincoln Lab 에서 MONET2000 에 SCM(Sub-Carrier Multiplexing) 무선 전송 방식을 WDM/IP 광인터넷망 접속에 관해 연구 중이며, Naval Research Lab. 등의 국방 관련 연구소에서 비행기 및 위성, 유선망을 통합하는 국방 기술 응용 위주의 연구 수행 중이고, UCLA, UC Berkeley 등의 대학에서 Photonic beam forming, 밀리미터파 photonic link, fiber-fed phased-array antenna 등의 기초연구를 수행 중이다. 호주 멜버른 대학교에서는 유무선 통합 네트워크를 위한 Microwave Photonics 기술 연구를 수행하고 있으며, RF 신호를 광신호에 싣기 위한 방법과 밀리미터파 대역의 HIC(hybrid integrated circuit) 안테나에 대한 연구를 수행 중이다.

국내 개발동향으로 한국과학기술원의 BPSK RF-광 디지털 변조 기술, 광주과기원의 RoF 를 위한 60GHz 트랜시버 기술, 서강대학교의 10GHz 급 SL-APD, 연세대학교의 광 투입 록킹을 이용한 RF 신호원, 그리고 중앙대학교의 30GHz 이상의 초고속 변조기 연구가 있었고, 전자부품 연구원에서 40GHz LiNbO3 광변조기 연구, 한국전자통산연구원에서 60GHz 이상의 선형 초고속 광변조기 연구, 삼성종합기술원에서 60GHz 대역에서 실내 무선통신을 위한 155Mbps 급 서브캐리어 다중 광시스템 연구가 진행되었다.

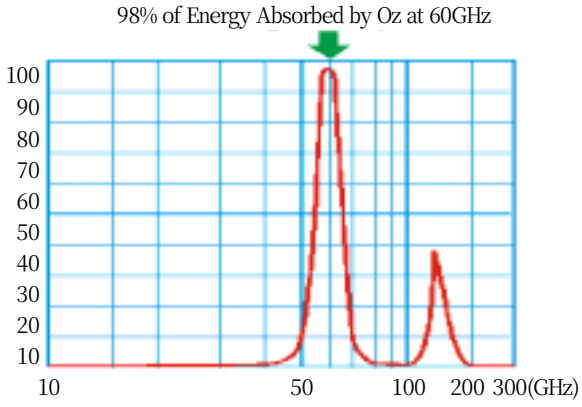
III RoF 액세스 시스템 구조

RoF 기술은 광대역 저손실 광통신 기술과 이동성의 장점을 가진 무선통신 기술을 결합한 기술로서, (그림 2)와 같이 전송 데이터를 마이크로파 대역으로 변조하여 이를 광신호로 변환하여 광섬유를 통해 정보를 전송하는 광링크 분야와 광섬유를 통해 수신된 신호를 무선으로 전달하는 무선 링크 분야로 구성되어진다.



(그림 2) RoF 액세스 시스템 기본 개념도

광무선 융합 기술에서 더 많은 대역폭을 가입자에게 전달하기 위한 요구에 부흥하기 위해 광전/전광 변환 및 무선 링크 분야에서 밀리미터파 대역, 특히 주파수 대역이 60GHz 대역에 크게 관심이 집중되고 있다. 이 대역 주파수는 광대역 특성과 대기중 산소 분자에 의한 흡수현상(98% 정도 흡수, (그림 3) 참조) 때문에 동일채널 간섭확률이 작아 주파수 재사용이 가능하므로 경제적인 시스템 구성이 가능하고, 파장이 밀리미터 단위로 아주 작기 때문에 안테나 및 RF 송



(그림 3) 60GHz 대역 전파(propagation)특성

수신기의 소형 경량화가 가능하다.

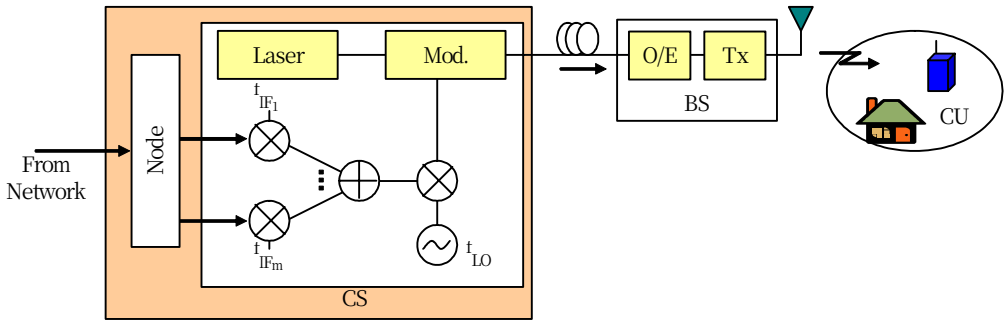
현재 이동통신 주파수 대역에서는 무선신호에 대한 인체의 영향이 큰 사회적인 문제가 되고 있다. 하지만 60GHz 대역의 신호는 기본적으로 저전력(수십 mW 단위)을 사용하게 되어 있으므로 인체에 미치는 영향이 적으며, 비록 인체에 전자파 조사가 된다고 하더라도 피부 바깥에서 상쇄되어 우수한 저전력 특성을 갖고 있다. 그러나 밀리미터 대역 무선 신호는 직진성으로 말미암아 LoS(Line of Sight) 환경이 확보되어야 하는 단점이 있어 벽을 투과하지 못하거나 반사 등의 특성이 있다. 이러한 전파 특성들은 중앙처리국에서 전자 회로적 접근방식으로 극복 가능하여 실내의 단거리 대용량 멀티미디어 송수신 등에 응용이 가능하다.

이러한 RoF 액세스 시스템의 구조적인 측면에서 살펴보면 중앙처리국(Central Station: CS)과 무선기지국(Base Station: BS) 사이의 신호처리전달 방식에 따라 다음과 같이 RF over fiber, IF over fiber 및 Baseband over fiber 등 3 가지로 나눌 수 있고, 다음에서는 각 방식에 따른 장단점을 비교 분석하였다[3-5].

1. RF over Fiber 전송 방식

밀리미터파 광 무선 액세스 시스템에서 원격지의 안테나 기지국과 가장 간단하게 접속할 수 있는 방법으로서 기지국에서는 주파수 업-다운의 변환 없이 밀리미터파의 RF 신호를 직접 광섬유를 통해 전송하는 구조로 가장 이상적인 방법이라 할 수 있다. (그림 4)에서는 RF over Fiber 전송방식의 기능 구조를 다운스트림에 대해서 나타내고 있다.

RF over fiber 기반의 밀리미터파 광 무선 시스템에서 우선적으로 고려할 사항은 수신측에서 높은 효율의 고속 PD(Photodetector)가 요구되며, 송신측에서는 밀리미터파에 의해 변조되는 고속의 광 변조기가 요구는 것이다. RF over fiber 기반의 전송 방안은 BS 의 구조를 간단히



(그림 4) RF over fiber 전송방식 시스템

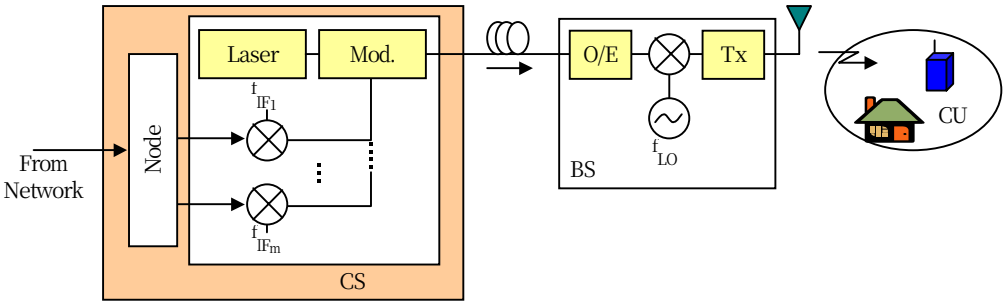
할 수 있고, 밀리미터파 무선 신호처리를 CS 에서 집중 처리할 수 있는 장점을 갖는다. 그러나 단점으로 수신된 RF 광신호의 분산이 크므로 이 같은 분산의 영향을 감쇄할 수 있는 효과적인 밀리미터파 변조 방식을 위해 케리어 변조 광 SSB(optical single sideband with carrier modulation) 또는 chirped fiber Bragg grating 기반의 분산에 대한 영향이 적은 RF over fiber 전송 방식에 대한 연구가 진행되고 있다.

2. IF over Fiber 전송 방식

광섬유상에 밀리미터파의 RF 신호를 전송하는 것과 대비하여 IF 신호를 전송하는 것은 광신호의 분산 영향이 훨씬 줄어든다. 예로써 표준 광섬유상에서 2GHz 신호를 7km 전송 시 수신단에서 SNR 은 0.1 dB 이하 감소하지만 동일한 전송거리에 대해 38GHz 의 신호를 전송시는 수신단에서 CNR(Carrier-to-Noise Ratio)이 10dB 이상의 감소를 갖는다.

IF over fiber 전송 방식에서는 RF over fiber 전송 방식과 같이 밀리미터파 주파수 대역에서 동작되는 고속의 광소자가 필요하지 않음으로 저가의 광전소자를 사용할 수 있는 이점을 갖고 있다. 또한 RF 신호에 비해 상대적으로 낮은 주파수를 사용함으로 링크의 효율성이 높다. 그러나 IF over fiber 전송 방식은 (그림 5)에서 보는 바와 같이 주파수 업-변환을 위해 밀리미터파의 로컬 오실레이터와 믹서가 요구되므로 BS 의 하드웨어는 복잡하게 되며 RF 주파수의 변환이나 밀리미터파의 무선 채널 추가와 같은 무선 네트워크의 재구성 및 개선은 용이하지 않다.

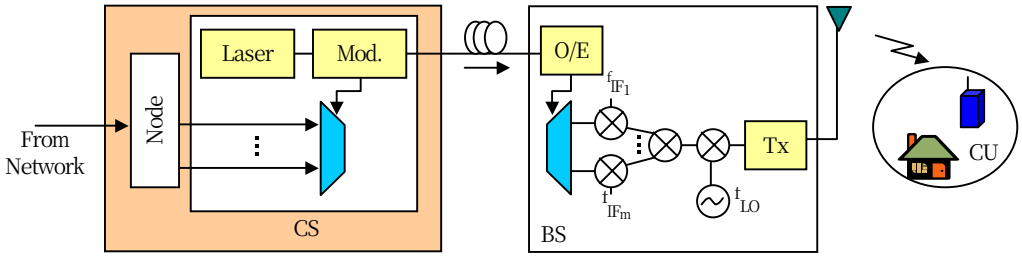
IF over fiber 전송 방식에 의한 밀리미터파 광 무선 액세스 시스템에서 BS 의 로컬 오실레이터에 대한 요구는 CS 에서 로컬 오실레이터 신호를 원격 공급함으로서 해소할 수 있으며 CS 에서 집중제어되어 원격으로 공급되는 로컬 오실레이터 신호의 복원에 관해서는 광이나 전기적인 필터링 기술에 의한 여러 가지 방안들이 연구되고 있다.



(그림 5) IF over fiber 전송방식 시스템

3. Baseband over Fiber 전송 방식

이 방식에서는 Baseband 신호를 전달하고 BS 에서 밀리미터파 무선 주파수로 업 변환한다. 업스트림 신호는 역으로 BS 에서 수신된 밀리미터파 무선 주파수로 다운 변환하여 CS 로 전달한다.



(그림 6) Baseband over fiber 전송방식 시스템

IF over fiber 전송 방식과 같이 Baseband over fiber 방식에서 Baseband 의 무선 신호를 분배함으로서 광신호 분산의 영향이 크게 줄어든다. 그리고 Baseband over fiber 기반의 광 무선시스템의 구조는 BS 에서 신호처리를 위해 전기적 회로를 사용할 수 있으나 (그림 4)에서 보는 바와 같이 RF over fiber 방식과 같이 BS 는 주파수 변환을 위해 밀리미터파의 로컬 오실레이터와 믹서가 요구되므로 구조가 복잡하게 되며 신호처리를 위한 하드웨어와 로컬 오실레이터로 인해 구조 개선이 용이하지 않다. Baseband over fiber 전송 방식에서도 BS 의 로컬 오실레이터에 대한 요구는 CS 에서 로컬 오실레이션 신호를 원격 공급함으로서 해소할 수 있으며 여러 가지 방안들이 연구되고 있다. <표 1>에서는 각 방식에 따른 장단점을 비교하였다.

<표 1> Radio over Fiber 링크의 전송 방식 비교

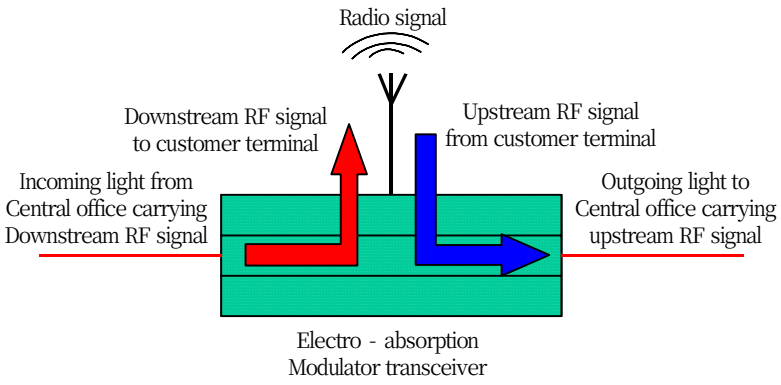
구 분	장 점	단 점
RF over Fiber	- BS 구조 간단(주파수 업-다운 불필요) - 시스템 업그레이드 용이 - 중앙 집중화 채널주파수 관리 - 멀티 벤더 운용 가능	- LD 및 PD 고가(고속 O/E, E/O 변환) - 분산 영향
IF over Fiber	- LD 및 PD 저가 - 효율적 E/O & O/E 변환	- BS 구조 복잡 - 주파수 업-다운 필요(LO) - 채널 분할
BB over Fiber	- LD 및 PD 저가 - SDR 에 적합한 구조	- BS 구조 복잡 - 주파수 업-다운 필요(LO) - 채널 분할

IV RoF 핵심 기술

초고속 데이터 전송을 위한 차세대 무선 멀티미디어 서비스에서는 최소 100Mbps 이상의 초고속 데이터 전송을 요구하고 있으며, 이 같은 가입자의 요구에 맞추어 30Ghz 이상의 밀리미터파에 의한 MMWP(Millimeterwave-Photonics)에 대한 연구가 진행되고 있다. MMWP 는 무선통신을 위한 고속 신호를 밀리미터파로 변조하여 직접 광으로 전송함으로써 각 기지국의 설비 및 기지국간의 통신망을 보다 간편하게 할 수 있다. 이러한 MMWP 구현에 있어 반드시 극복되어야 할 기술이 소형화된 광 변조기다. 광 변조기는 밀리미터파 대역 광신호의 안정성과 선형성이 보장되어야 하며, 밀리미터파 무선신호에서 광신호로의 변환(E/O 변환)과 광신호에서 밀리미터파 무선신호로 변환(O/E 변환)이 간결한 단일 집적소자 내에서 이루어져야 한다. 이는 셀의 크기가 소형화되면서 막대한 수요가 예상되므로 간결한 구조로서 경제성을 확보하여야 하기 때문이다.

1. 전계흡수 광 변조기

RoF 링크를 구성하기 위한 핵심 소자의 하나로 일반적인 광 변조기는 집중전극소자(lumped electrode)형 EAM 으로써 현재 2V 구동전압과 60GHz 대역폭까지 보고되고 있으나 소자 길이에 의한 RC(Resistance Capacitance) 시정수에 의해 거의 한계에 이르고 있다. 반면에 진행파형 전계흡수 광 변조기(Electroabsorption Modulator: EAM)는 캐패시턴스가 소자 전체에 분포하도록 전극이 전송선로로 설계되어 있어 긴 도파관을 확보할 수 있고 따라서 충분한 흡수가 일어날 수 있으므로 변조효율을 희생시키지 않으면서 RC 시정수에 의한 제한을 극복할 수 있다. 1.3um 와 1.5um 파장에서 작동하는 대표적인 EAM 은 Ⅲ-Ⅴ 족 반도체인 InP 로 제작된다. 이 화합물 반도체는 밴드갭보다 큰 빛 에너지가 입사할 경우 입사된 에너지를 부전도성으로 만들고 밴드갭보다 작은 에너지인 경우는 통과하게 되는 특성이 있다. 전자가 전도대에서 가전자대로 직접 천이되는 에너지 천이 구조를 갖는 화합물 반도체는 레이저인 경우 요구되는 optical gain, 광 변환과 고속의 광수신과 같은 기능에 요구되는 absorption 을 가능하게 한다. Westbrook 과 Moodie 는 양방향 아날로그 광링크에서 송수신 겸용의 EAM 을 처음으로 발표하였다. 광파이버에서 입사된 빛은 EAM 내의 광도파로에 커플링된다. Electric field 가 광도파로 위 전극에 인가되면 빛의 세기를 변조할 수 있다. 입력된 빛은 electric field 의 세기에 따라 부분적으로 흡수되거나 전송되어진다. 따라서 안테나로부터 전기적 신호는 도파로내에서 추가적인 전기적 신호처리 없이 빛을 변조시킬 수 있다[1].



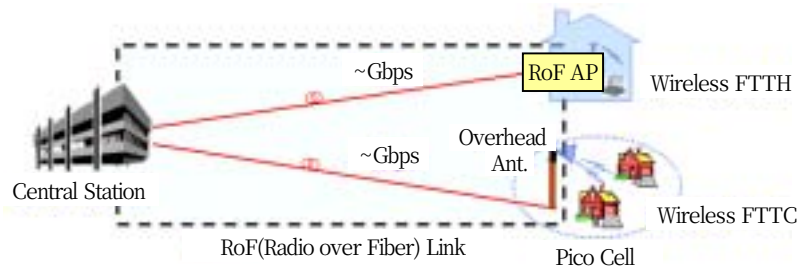
(그림 7) EAM optical radio transceiver

V. RoF 발전 전망 및 응용 분야

RoF 는 향후 FTTx 환경에서 무선 서비스의 대표적인 기술로 인식되고 있으며 유무선 방송 통신 융합을 통해 HDTV(MPEG2 MP@HL) 스트리밍 5 채널 이상을 끊김없이 서비스 할 수 있는 100Mbps 이상의 무선기능을 수행할 것으로 전망된다. 또한 향후 광대역 이동 멀티미디어 환경에서는 현재보다 수배의 추가 기지국이 필요할 것으로 예상됨에 따라 저가의 기지국 설치용 기술로 활용될 것이다. 그리고 RoF 액세스망은 지능형 광 무선 인터넷 원천 기술이 적용된 광-무선 핵심 프로토콜을 이용하여 RoF 채널 에러 제어 및 자동 복구 기술, IPv6 기반 액세스 제어 및 자동 망 구성 기술 등으로 발전될 전망이다. RoF 기술의 응용은 다양하며 다음과 같은 분야에 적용될 수 있다[6,7].

1. 광대역 무선 액세스망 구축 분야

광대역 통합망에서 무선 광가입자망(wireless FTTH/FTTC)을 위해 교환국, 무선기지국 및

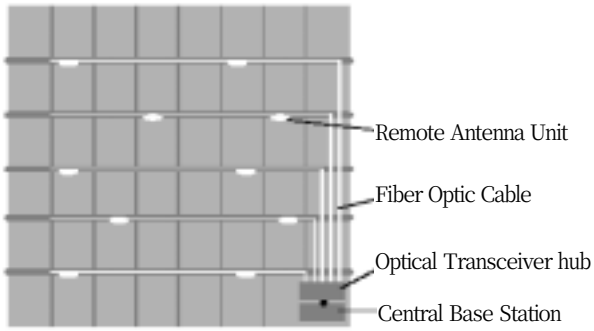


(그림 8) Broadband wireless access 응용

가입자 단말간에 RoF 기술을 응용하여 광대역 무선 액세스 네트워크를 구축할 수 있다. 이는 UWB(Ultra Wideband), NGWLAN(Next Generation WLAN) 등 다른 방식에 비해 넓은 지역으로 초고속 광대역 서비스가 가능하며, 전기적 신호처리의 집중화와 안테나 구조의 간략화로 저가의 단말 구성이 가능하여 상대적으로 높은 경쟁력을 확보할 수 있다.

2. 인-빌딩 커버리지 확장

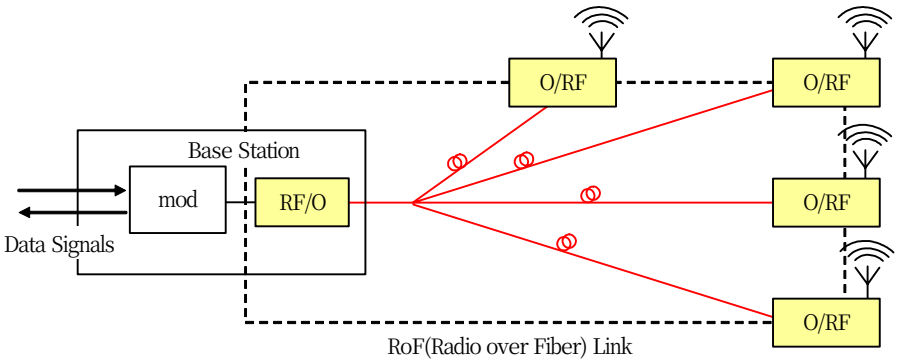
이동통신의 무선망 커버리지를 확대하기 위한 용도로 사무실 빌딩, 공항, 대형 할인매장 등에서 널리 활용되고 있으며, 이동통신 무선망에서 건물외부에서는 마크로셀로 구성하고 건물내에서는 하나의 기지국과 다수의 피코셀로 구성되는 DAS(Distributed Antenna System)을 두어 건물내의 무선 커버리지를 확대하고 있다. 현재 무선망의 빌딩내 커버리지를 위해 약 10~20% 정도가 RoF 기술을 활용하고 있으며, RoF 기술의 응용에서 고가인 광트랜시버가 비교적 높은 가격 요인으로 작용하고 있다.



(그림 9) In-Building Coverage 응용

3. 기지국 커버리지 확장

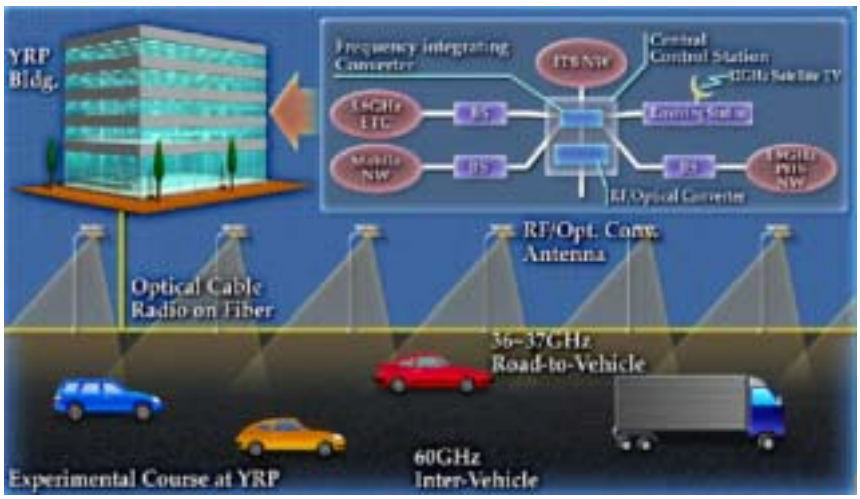
비교적 최근의 응용분야로서 기지국과 다수의 마이크로 안테나 사이트간의 RoF 네트워크 기술이 활용될 수 있으며 기지국의 커버리지 확장으로 기지국 추가 설치를 줄이고 사이트 임대 및 유지 관리 비용을 절감하며, 대역폭의 유연한 분배 기능을 실현하고 있다. RoF 링크의 전송거리는 분기 수에 따라 제한되며 분기수의 증가에 따라 전송거리가 줄어들며(예: 4 분기 10km, 16 분기 2km), Dark fiber 를 활용할 수 있고 fiber 의 파장 분할 다중화에 의해 비용 절감을 추진하고 있다.



(그림 10) Base station Coverage 응용

4. ITS(Intelligent Transport System)

ITS 서비스를 위해 현재 일본 CRL(Communications Research Laboratory)에서 진행하고 있는 RoF 는 PHS(Personal Handy-phone System: 1.9GHz 대역, 384kbps 서비스)와 ETC (Electronic Toll Collection: 5.8GHz 대역, 1Mbps 서비스), 방송(1.16GHz)을 하나로 묶어서 밀리미터파로 통합하여 송수신하고 있다. (그림 11)은 RoF 링크상에서 여러 무선 서비스를 통합하여 CS 과 BS 사이에 광섬유로 전송하고 BS 와 차량단말 사이에는 36~37GHz 의 밀리미터파를 사용하며, 차량 간에는 60GHz 의 밀리미터파를 사용하여 서비스를 제공하는 것을 보여 주고 있다.



(그림 11) Intelligent Transport System 응용

Ⅵ. 결 론

RoF 기술은 광대역을 제공하는 광통신 기술과 이동성을 제공하는 무선 통신 기술이 융합하여 초고속 무선 멀티미디어 서비스를 제공할 수 있으며, 광대역 소형 휴대 단말과 초고속 무선 인터넷의 활성화에 기여할 수 있는 차세대 기술이다. 가까운 장래에 도입될 것으로 예상되는 유비쿼터스 네트워크에서는 장소나 단말기의 제약없이 초고속 광대역 서비스 제공이 가능한 무선 통신 기술로서 RoF 기술이 활용되어 질 것으로 예상되며, 2010 년경에는 광대역 이동 멀티미디어 환경에서 셀 반경이 축소되어 현재보다 2~5 배 정도의 추가 기지국이 필요할 것으로 예상됨에 따라 소형이며 저가의 구축비용으로 추가의 기지국을 설치할 수 있는 RoF 기술이 이동통신망에 널리 활용되며, 나아가 지능형 교통 시스템에서도 폭 넓게 응용될 것이다 .

<참 고 문 헌>

[1] P. Smyth, “Optical radio–a review of a radical new technology for wireless access infrastructure,” BT technology journal, Vol.21, No.3, July 2003, pp.22-31.

[2] Cooper. A.J., “Fibre/radio for the provison of cordless/mobile telephony services in the access network,” Electron. Letter., 26, 1990, pp.2054-2056.

[3] D.Novak, A.Nirmalathas, C.Lim, C.Marra, and R.B Waterhouse, “Technologies for future millimeter-wave hybrid fiber-radio communication systems,” Fifth opto-electronics and communications conference technical digest, July 2000, pp.436-437.

[4] A. Nirmalathas, D. Novak, C. Lim, R.B. Waterhouse, “Microwave Photonics as an enabling technology for future broadband fiber-radio networks,” The 3rd Japan-Korea joint workshop on microwave and millimeter wave photonics, 2002, pp.4-8.

[5] D.Novak, A.Nirmalathas, C. Lim, C. Marra, and R.B Waterhouse, “Fibre-radio challenges and possible solutions,” International topical meeting on microwave photonics, 2003, pp.49-54.

[6] 박종대, “Radio-on-Fiber 액세스 시스템 기술” 대한전자공학회지, Vol.30, 제 3 호, 2003, pp.295-299.

[7] D. Wake, “Trends and prospects for radio over fiber picocells,” International topical meeting on microwave photonics, 2002, pp.21-24.