

## OFDM 기반 차세대 광가입자망 연구 동향

Next Generation OFDM-based Optical Access Network Technologies

두경환 (K.H. Doo)	광가입자연구실 책임연구원
조승현 (S.H. Cho)	광가입자연구실 선임연구원
방학전 (H.J. Bang)	광가입자연구실 선임연구원
이상수 (S.S. Lee)	광가입자연구실 실장
이종현 (J.H. Lee)	광인터넷연구부 부장

\* 본 연구는 미래창조과학부 및 한국산업기술평가관리원의 산업융합원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음(KI0018-10039170, OFDMA 기반 10 Gb/s급 광 링크 및 유무선 융합 액세스 네트워크 기술개발).

모바일, 클라우드, 빅데이터 등 최근 IT 산업의 패러다임의 변화로 인해 매년 25% 이상 증가하는 트래픽 추세에 따라 광 가입자망의 전송 기술도 빠르게 진화하고 있다. 가입자 망의 영역 확장을 위해 분기 수, 전송 거리 확대를 위한 기술개발 및 표준화 노력 또한 끊임없이 이어지고 있다. 링크당 40Gbps 이상의 전송 속도를 요구하는 차세대 광 가입자망 기술 중의 하나인 OFDM 기반 PON은 멀티 캐리어 방식으로 대용량, 장거리 전송이 가능하며, 서브캐리어 별로 서비스를 분리할 수 있고, 유연한 서브캐리어 관리를 통해 동적 대역 할당이 가능하므로 향후 유무선 융합 가입자 망에 적합한 기술로써, 기존 광 분배망의 구조 및 시설 교체 없이 WDM(Wavelength Division Multiplexing)-PON(Passive Optical Network), T(Time)DM-PON 기술과 융합하여, 전송 용량을 확장할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 본고에서는 OFDMA-PON 기술을 소개하고, EU, 미국 등 선진 연구기관의 연구 동향을 소개하고 향후 전망에 대해 논하고자 한다.

### 스마트 유무선 네트워크 특집

- I. 서론
- II. OFDMA-PON 개요
- III. OFDMA-PON 기술
- IV. 향후 전망
- V. 결론

## I. 서론

수동형 광 가입자망(PON: Passive Optical Network) 기술은 초고속 인터넷 서비스 보편화로 인해 이미 성숙 단계에 있지만, 모바일, 클라우드, 빅데이터 등 최근 IT 산업의 패러다임 변화로 계속되는 대역폭 증가 추세는 초고속 광 가입자망 기술 관련 분야에서 끊임없는 신기술개발 노력을 유도하고 있다[1]. 또한 Gartner 시장 전망 보고서에 따르면 2013년 광가입자망 장비 시장 규모는 34억 달러 규모로 전체 광대역접속망 장비 중에서 향후 가장 고성장이 예상되며, 1~2년 이후에는 10Gbps급 10GE-/XG-PON 광가입자망이 시장에 본격적으로 도입될 예정이다[2][3]. 광가입자망 표준을 제정하는 ITU-T는 작년에 차세대 광가입자망 2단계 계획인 NG-PON2의 표준 기술로 TWDM-PON을 선정하고, 2014년 3월에 40G급 TWDM-PON 표준인 ITU-T.G.989.2를 제정할 예정이다. TWDM-PON은 WDM 기술과 XG-PON을 접목해 4개의 파장을 이용하여 광 링크 전송 속도를 하향 40G, 상향 10G (4x10G/4x2.5G)로 확장한 하이브리드 PON 구조를 갖는다.

NG-PON2 이후 표준 기술은 40G~250G 수준의 전송 속도를 지원할 것으로 예상되며, 이를 위해 광대역 전송이 가능한 차세대 PON 기술에 대한 연구가 선진 연구 기관 및 업체를 중심으로 활발히 진행되고 있다. 또한 향후 차세대 광 가입자망은 물리적 대역폭의 추가 제공 외에도 동적 대역 할당과 이중 서비스의 융합 개념 등을 아우르는 진보된 네트워킹 기능이 요구되며, 망 투자 및 운용비 절감을 위하여 지능적이고, 광역화되는 방향으로 발전될 것으로 예측된다[4]. 따라서 세계 주요 통신 사업자 및 연구기관들은 차세대 광 가입자 망 포설 및 운영을 위하여 수십 기가급 데이터를 유연하고 비효율적으로 관리할 수 있는 기술이 필요하다고 예측하고 있다.

본고에서는 서론에 이어 II장에서 TWDM-PON 다음

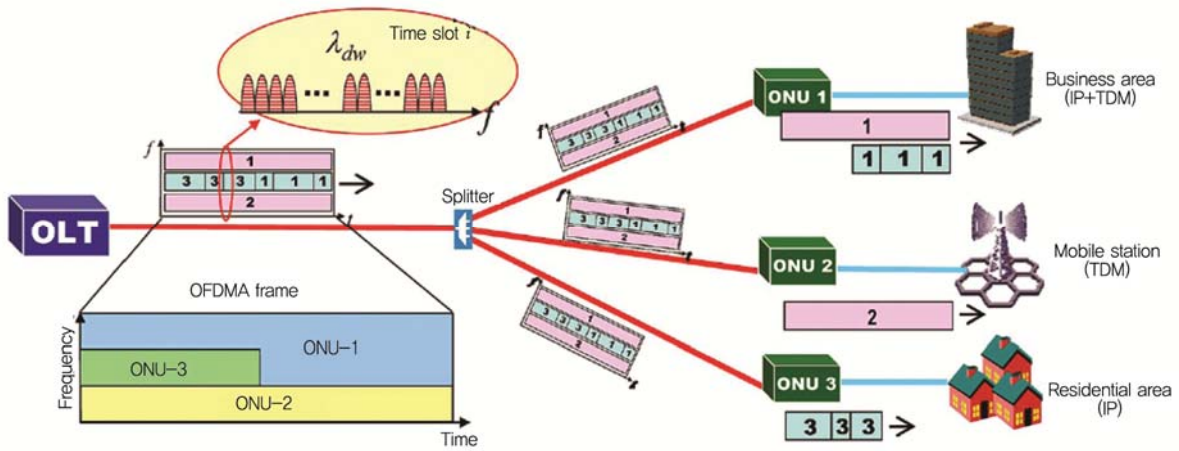
단계인 NG-PON3의 광 가입자망 후보 기술로써 연구되고 있는 OFDMA-PON 기술에 대해 소개하고, III장에서는 OFDMA-PON의 핵심 기술인 물리계층 및 MAC 계층의 기술 및 연구 현황을, IV장에서는 미래를 준비하는 향후 전망 및 기술개발 방향에 대해 논하고 V장에서 결론을 맺는다.

## II. OFDMA-PON 개요

직교 주파수 분할 다중화(OFDM) 방식은 유선의 DSL, 무선의 WiMAX, LTE 등 이미 유무선 가입자 망에서 보편적으로 사용되는 기술로써, 향상된 전송 성능을 제공하기 위하여 고속의 데이터를 분광학적 효율이 높은 직교성(orthogonality)을 갖는 다수의 저속 서브캐리어에 나누어 전송하는 개념이다.

OFDM 방식을 광 가입자 망에 적용한 OFDMA-PON 기술은 1) 단일 광섬유 및 단일 파장을 기준으로 대용량, 장거리 전송 시 문제점으로 지적되는 광섬유 색분산 등에 의한 신호 왜곡에 강하고, 2) 경제성이 보장된 디지털 신호 처리(Digital Signal Processing) 기반으로 구현이 가능하며, 3) 네트워킹 관점에서 서브캐리어 단위로 단말 또는 서비스를 분리하여 투명하게(transparent) 전송할 수 있고, 4) 할당되는 서브캐리어 단위의 자원 할당이 가능하므로 유연한 망 자원 관리가 가능한 특징이 있다. 또한, 현재 TDM-PON 기반의 광 분배 네트워크를 변경 없이 수용할 수 있고, 부품의 집적화를 통한 저가화가 가능하므로 높은 가격 경쟁력을 바탕으로 매력적인 차세대 광 가입자 망 구축 후보 기술 중 하나로 인식되고 있다[5].

(그림 1)에 단일 파장을 사용하는 대표적인 OFDMA-PON 망 구조를 개략적으로 나타내었다. OLT/ONU가 프로토콜과 무관하게 다수 파장의 광 신호를 독립적으로 수용할 수 있으므로 WDM 확장도 가능한 구조이다.

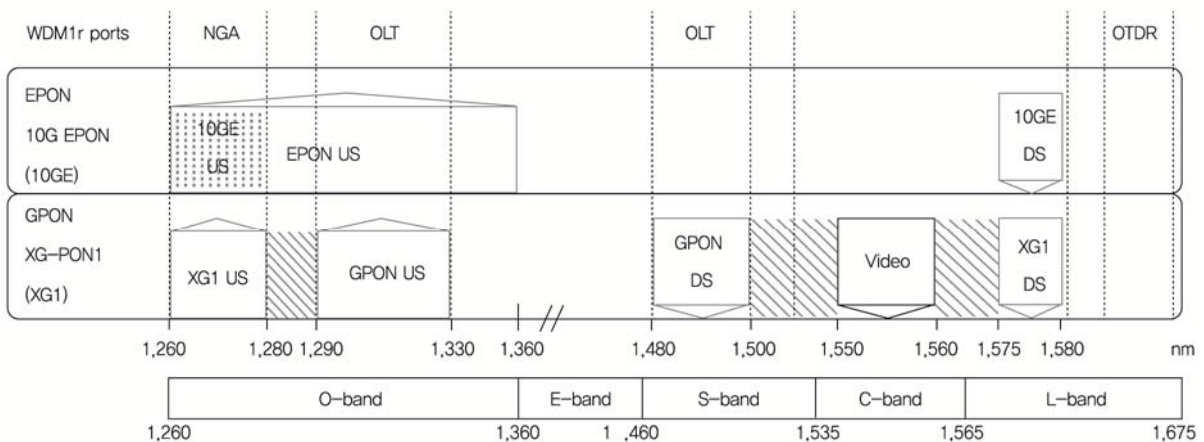


(그림 1) OFDMA-PON 구조[5]

OLT에서는 각 ONU의 대역폭 요구에 따라 대역 공유 알고리즘을 생성하고, 스케줄러를 이용해 모든 ONU에 서브캐리어 및 시간 슬롯(time slot)을 할당하는 2차원적인 대역폭의 공유가 가능하다. 예를 들어, (그림 1)에서 모바일 서비스를 위하여 ONU2에 서브캐리어가 고정으로 할당되는 반면에, ONU1과 ONU3은 ONU2가 사용하지 않는 서브캐리어를 시간 분할 방식(TDM)으로 공유할 수 있다. OFDM 변조/다중화 기술은 대부분 디지털 신호 처리(DSP) 기술에 의존하므로 기존 TDM-PON의 광인프라 변경 없이 재활용할 수 있으므로 통신사업자의 CAPEX 및 OPEX 절감에 매우 효과적이다.

OFDMA-PON은 구현 관점에서, 집적화가 가능한 DSP 기반의 트랜시버, 이와 연계된 기능 블럭인 OFDMA-MAC 프로토콜로 구성된다. 소프트웨어 정의된(software-defined) 접근 방식을 채택하는 경우, 좀더 유연하게 PHY/MAC을 포함한 내부 기능들의 재구성 가능성이 가능하며, 특별한 장치나 구조의 변경 없이 응용분야의 변경 및 확장도 가능하다.

OFDMA-PON은 또한 직교 서브캐리어를 파장 및 주파수 대역 내에서 적절히 배치하여 기존의 PON 시스템과 공존이 가능하다. 예를 들어 (그림 2)에서 OFDMA-PON 시스템이 현재 사용되지 않는 1510-1530nm 대



(그림 2) TDM-PON의 파장 대역

역을 하향신호로 사용하고, 1340–1360nm 대역을 상향신호로 사용하는 경우 GPON, XG-PON, 10G-EPON 및 기존 RF 비디오 오버레이 신호 등과의 공존도 가능하다. 결국, 이전 버전과 호환이 가능한 네트워크의 구현을 위해서는 분광학적(spectral mapping)으로 최적화하여 기존 OLT 및 ONU 내부에서의 변화폭을 최소화하는 것이 매우 중요한 기술적 이슈이며 이는 향후 OFDMA-PON의 상용화를 위해서 반드시 고려되어야 한다.

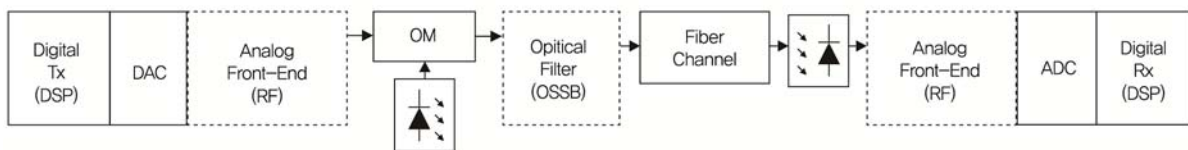
### III. OFDMA-PON 기술

#### 1. OFDMA-PON 물리계층

##### 가. OFDMA-PON 물리계층 구조

OFDMA-PON에서 물리계층은 기본적으로 (그림 3)과 같은 구성을 갖는다. 기능적인 측면에서 망 운영 요구 조건에 따라 물리 계층의 구조 및 형상을 손쉽게 변경할 수 있는 기능 블록을 점선으로 표기하였다. OFDM 신호는 먼저 디지털 송신기(Digital Tx)에서 생성되며, RF 영역으로의 변환은 광대역 디지털 아날로그 변환기(DAC)와 일반적인 아날로그 RF-front-end에 의해 수행된다. 전광 변환을 위해서는, 직접변조와 외부변조 방식 모두 수용이 가능하다. 외부 변조 방식의 경우는 CW(Continuous Wavelength) 출력 특성을 갖는 레이저, 광세기 변조기(Intensity Modulator) 또는 광 I/Q 변조기 등이 사용될 수 있고, 이것들은 RF 영역의 OFDM 신호를 전광 변환해 주는 역할을 수행한다. 저가 구현을 위

해서는 직접 변조가 가능한 DFB-LD, RSOA, VCSEL 등의 사용도 가능하다[6]. 광세기 변조기와 광 I/Q 변조기 사이의 가장 큰 차이점은 광 I/Q 변조기를 사용할 경우 OSSB(Optical Single Sideband) 신호의 직접적인 생성이 가능하다는 점이다. 대신에 광세기 변조기를 사용할 경우 광학적 대역 투과 필터 또는 광 인터리버 같이 독립적인 OSSB 생성용 광 필터가 반드시 필요하다. 광세기 변조기를 통해 광 세기로 표현되는 신호의 크기는 디지털 파트에서 생성되어 RF front-end를 거친 저대역 OFDM 신호의 크기에 선형적으로 비례한다. 하지만 광 세기 신호는 실수 성분만 포함하므로, 생성 및 전송시 왜곡을 피하기 위해서는 OFDM 신호는 반드시 양의 실수이어야만 한다. 실수 신호를 만들기 위해서는 전기적으로 in-phase (I) 성분과 quadrature (Q) 성분이 다중화되거나 또는 Hermitian 대칭성을 갖는 신호가 IFFT 출력 단에서 강제적으로 만들어져야만 한다. Hermitian 대칭성의 실질적인 장점은, 전기적 혹은 광학적으로 I/Q 다중화를 구현할 필요가 없으므로, 시스템 내의 송신단이나 수신단에서 I/Q 다중/역다중 과정에서 발생하는 불균형 보상을 할 필요가 없다는 것이다. 실제로 I/Q 불균형(imbalancing)은 전송 성능 관점에서 굉장히 중요한 문제 중 하나이다[7]. 반면에 Hermitian 대칭성은 전송되는 심볼 프레임의 두 번째 절반 용량을 (FFT size/2) 버리고 첫 번째 절반 심볼에 대한 켄넬 복소수 성분으로 대체하여 전송하기 때문에 전체 데이터 전송률의 절반을 낭비하게 되는 문제가 있다. 또한, 이를 구현하기 위해서는 비교적 큰 dc 바이어스를 RF 영역의 OFDM 신호에 추가해 주어야 하기 때문에 광세기 변조기를 이용하는 경우 quadrature point에서 동작되



(그림 3) OFDMA-PON 물리계층 구성[1]

어야 하는 문제가 있다. 이는 광 OFDM 신호 내에 광 파워의 대부분을 OFDM 신호보다는 광 캐리어(optical carrier)에 집중시키며, 결국 OSNR 열화로 인한 전송 성능 저하를 야기한다. 또한, 광 OFDM 신호는 광섬유 비선형성과 결합되어 신호의 전송 품질을 열화시키는 PAPR (Peak to Average Power Ratio) 특성을 갖는다. 지금까지 다양한 연구그룹들이 광 OFDM 신호의 PAPR 특성을 줄일 수 있는 여러 형태의 신호 클리핑(clipping) 기술들을 제안하였고, 그 중 호주의 Monash대학은 광 캐리어와 광 OFDM 사이드 밴드에 광 파워를 균등하게 분할하여 광 OFDM 신호의 전송 성능을 최적화하는 방법을 제안하였다[7][8].

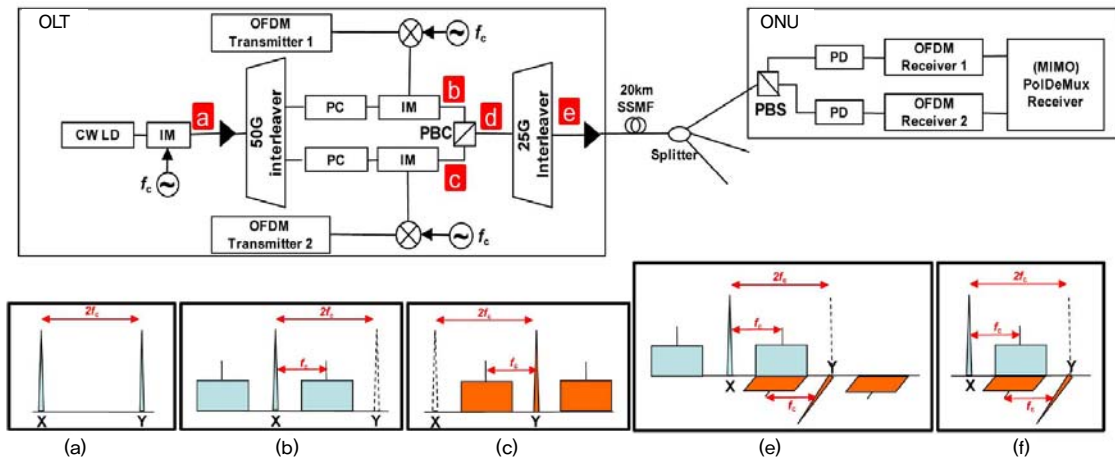
(그림3)에는 광 전송을 하기 전에, 이미 OSSB광 OFDM 신호가 이미 생성되어야 함을 나타내었다. DSB (Double Sideband) 형태를 갖는 광 OFDM 신호는 색분산 유기 파워 페이딩(chromatic dispersion induced power fading) 또는 색분산 자체로 인해 전송 성능이 저하된다. 광섬유 색분산을 거치면, DSB 내의 두 개의 광 OFDM 사이드 밴드는 광 세기가 동일하지만 서로 반대 방향의 위상 천이 과정을 겪는다[9]. 이러한 신호를 직접 검출 방식의 수신기를 사용해 복원할 경우 상반된 위상 천이는 결국 소멸 간섭 현상을 만들게 되고, 이는 궁극적으로 복원이 불가능한 파워 페이딩 현상으로 나타난다. 그러나 OSSB 광 OFDM 신호는 색분산 효과에 의한 전송 특성 저하가 선형 위상 천이(linear phase shift)의 형태로 나타나며 이러한 열화는 CP(Cyclic Prefix) 또는 FDE(Frequency Domain Equalizer) 등을 사용함으로써 손쉽게 보상이 가능하므로 OSSB 전송 방식을 선호한다.

수신단에서 PD를 이용해 직접 검출 방식으로 광 OFDM 신호를 광/전 변환하는 경우, 비간섭성 (incoherent) mixing 과정이 발생한다. 이러한 mixing 때문에 출력 신호는 desired 캐리어 × 사이드 밴드사이의 RF 비팅(beat)함과 더불어 undesired 사이드 밴드 × 사이

드 밴드 beating함을 동시에 포함한다. 이처럼, 수신 과정에서 발생하는 beating 성분은, 분광학적으로 DC부터 기저 대역 OFDM 신호 내에 위치하게 된다. 결과적으로 기저대역 신호의 중심 주파수는 원하는 mixing 항과 원하지 않는 mixing 항 사이에서 주파수 가드 밴드를 형성할 수 있을 만큼 반드시 충분히 커야 하며, 이는 미국의 NEC Lab등에서 시뮬레이션과 실험을 통해 검증되었다[10]. 이처럼 분광학적 효율(spectral efficiency) 측면에서의 손실을 의도적으로 추가하는 방법을 사용해 비간섭성 검출방식에 의한 전송 성능 열화는 어느 정도 피할 수 있다. 이외에도 필드변조/간섭성 검출 방식을 사용하는 광 OFDMA-PON 및 광학적인 영역에서 IFFT 및 FFT 연산 처리를 수행하는 전광 OFDMA-PON 시스템 등도 연구가 이루어지고 있다. 하지만 대용량 트래픽 수용이 가능한 차세대 광 가입자 망 구축 관점에서 볼 때, 직접변조/직접검출 방식이 갖는 경제성 및 단순성으로 인해 현재 가장 각광 받고 있는 기술이라 할 수 있다.

#### 나. OFDMA-PON에서의 하향 전송

OFDMA-PON 자체가 갖는 장점으로 인해 하향전송의 경우 단일 파장을 사용하여 분광학적으로 효율적인 40 기가급 이상의 대용량 전송이 가능하다[11]. OFDMA-PON 망 내에 존재하는 모든 ONU들은 동일한 OFDMA 망 자원을 공유할 수 있으므로 높은 수준의 통계적 대역 다중화가 가능하다. 구조적으로 밀집된 OFDM 스펙트럼과 다중변조 방식, 편광 다중화 방법 등을 혼합해 사용함으로써 최고 수준의 분광학적 효율 달성이 가능하고, ONU당 최고 전송 가능 대역폭은 최대 40 기가급 이상도 가능하다. (그림 4)는 2010년에 미국의 NEC Lab이 16-QAM 변조 및 직접 검출 방식의 편광 분할 다중화된 OFDM 하향 신호 5.6GHz의 스펙트럼 내에서 최대 40Gb/s의 유효 대역폭 제공이 가능함을 실험적으로 입증한 결과를 보여준다[12].



(그림 4) 직접 검출 방식의 편광 분할 다중화된 OFDM-PON 구성도[12]

OFDMA-PON에서 중요한 기술적 이슈 중 하나인 ONU 측에서의 동기화(synchronization)는 수신단에서 하향 신호 복원을 위해 반드시 필요한 FFT 윈도우의 정렬 문제 때문에 매우 중요하다. 하지만 이러한 적절한 FFT 윈도우 정렬 방법은 이미 다양한 이동 통신 시스템 (WiMAX & LTE 시스템)에서 널리 사용되고 있고, 이태리의 Pisa 대학, 미국의 Princeton 및 Southern California 대학 등에서 제안된 여러 방법으로 해결이 가능하대[13]. 일례로 광섬유 채널 자체가 갖고 있는 높은 수준의 안정성 때문에 하향 신호 동기화는 단순히 일반적인 클럭 신호를 OFDM 신호 전송 매체인 광케이블을 통해 OLT로부터 ONU로 브로드캐스팅을 통해 구현이 가능하다. (그림 5)는 영국의 Bangor 대학에서 OFDM 신호와 클럭 신호를 주파수 분할 방식으로 다중화하여 브로드캐스팅하는 구조로써, 이를 실시간 동작 가능한 OFDM 광 모델과 연동시켜 실험한 결과를 2011년에 발표하였다[14].

더불어 차세대 광 가입자 망 기술이 상용화 되기 위해 필수적으로 해결해야 하는 기술적 이슈 중 하나가 장거리 전송 가능 여부이다. OFDMA-PON 기술의 경우 전송 성능에는 영향을 주지 않는 범위 내에서 부가적인 CP(Cyclic Prefix) 오버헤드를 사용함으로써, 최대 100km

에 이르는 광섬유 전송 거리로 인해 발생하는 색분산에 의한 전송 성능 저하를 쉽게 해결 할 수 있다. 이는 2009년 미국의 NEC Lab에서, 단일 파장을 사용해 100 km 전송거리를 갖는 OFDMA-PON 망에서 약 36 Gb/s급의 하향 전송 속도를 달성하는데 있어 단순히 CP만을 이용해 광섬유 색분산에 의한 전송 페널티를 감소할 수 있음을 실험적으로 증명하였다[15]. 따라서, 40 기가급 이상의 OFDMA-PON에서 하향 전송은 OSNR에 의해서만 제한된다. 즉, 단일 파장을 사용한 하향 전송시 대부분의 파워가 광 캐리어 내에 존재하게 되므로 직접변조/직접검출 방식으로 광송수신단을 구현하는 것은 매우 중요한 기술적 이슈이다. 구축 및 운용 비용에 굉장히 민감한 가입자 망 관련 응용분야에서는 ONU 수신단에 광 증폭기를 사용하지 않으므로 OSNR 제한 조건은 광 파워 제한 전송 조건을 축소시킬 수 있으며, 이는 궁극적으로 최대 전송 가능한 PON의 거리와 수용 가능한 수동 광 분기 비율에 치명적인 결과로 나타날 수 있다.

#### 다. OFDMA-PON에서의 상향 전송

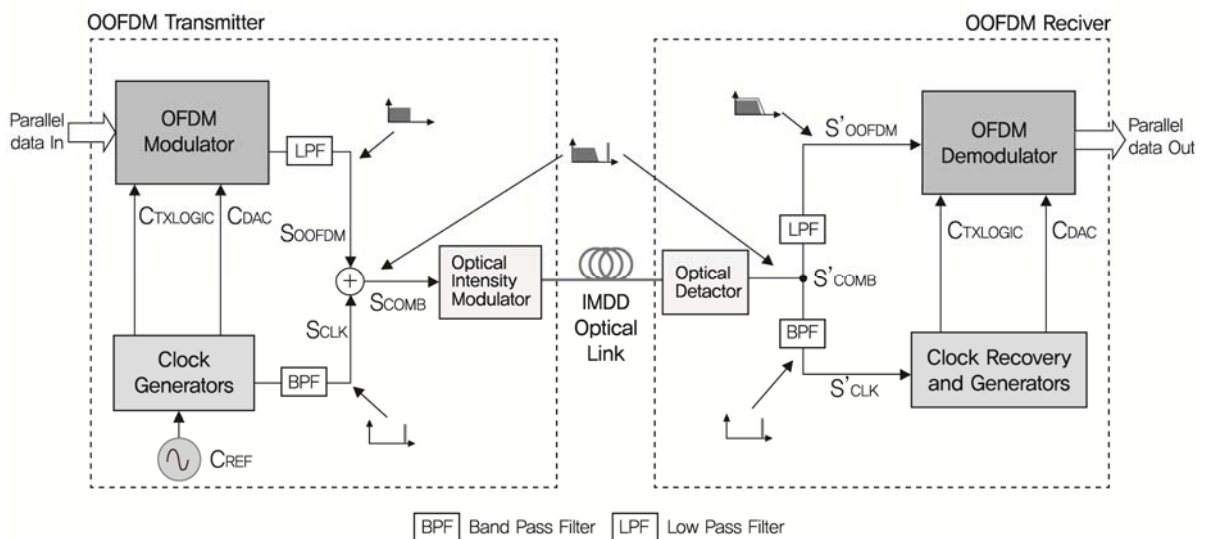
OLT의 구축 비용과 복잡도는 수용 가능한 ONU의 수

에 의해서 비용 측면에서 1/N의 부담이 가능하기 때문에, OLT 수신단에서의 광 증폭기의 사용을 가능하게 해주거나 또는 다소 복잡한 광 및 전자 소자의 사용을 가능하게 한다. 결과적으로 적절한 OLT 하드웨어 업그레이드를 통해서 상향 OSNR 제약 및 상향 수신 광 파워 제약 등의 기술적 난제들에 대한 극복이 어느 정도는 가능하다.

단일 파장을 사용하는 고속 상향 OFDMA-PON의 주요 기술적 이슈들은 “단일 파장의 사용을 통해 다수 ONU들로부터 상호 상관성이 제거된 (decorrelated) 파장 무의존 광원을 이용한 상향 전송이 가능할 수 있는가?” 라는 질문으로부터 발생된다. 이 문제는 중앙 집중식 광파 제어 구조(light wave centralized architecture) 및 모든 ONU가 common한 파장 대역에서 동작이 가능한 자기 자신만의 상향 레이저 광원을 구비하고 있는 시스템 구조 모두에서 발생할 수 있다. 중앙집중식 광파 제어 구조의 경우, 정확히 동일한 파장의 상향 광 신호를 이용해 상향 전송이 이루어짐에도 불구하고, OLT로부터 서로 다른 가입자들 사이는 서로 다른 광 섬유 경로를 통해 연결되어 있기 때문에 마치 서로 다른 광원으로부터 신호가 생성된 것처럼, 각 ONU들로부터 OLT로

도착한 상향 신호는 상호 상관성이 제거된다[15]. 실제로 상향 광 캐리어의 파장들은 nominal value를 기준으로 random fluctuation을 갖는다. 광 검출과정에서 그러한 광 캐리어들의 mixing은 square-law detection으로 인해 매우 강한 광 비팅 잡음을 생산하게 되고, 이는 주파수 영역에서 크기가 감소한 OFDMA 신호 향을 압도하여 신호대잡음비(SNR)를 감소시키는 결과를 초래한다. 이로 인해, 상향 광 캐리어들의 상호 상관성 제거 (decorrelation)는 상향 OFDMA 동기 문제를 더욱 복잡하게 만들어 준다.

이러한 상향 전송과 관련된 기술적 난제들을 해결하기 위해서 하이브리드 WDM-OFDMA 전송 및 OLT 측에서 간섭성(coherent) 검출 방식의 사용을 통한 단일 파장 광 캐리어 억제(optical carrier suppression) 방법들이 제안되었다. 하이브리드 WDM-OFDMA 접근 방식에서 비팅 잡음 문제는 파장의 직교성을 이용해 직접적으로 해결이 가능하다. 그러나 OFDMA 신호의 간섭성 복구(coherent recovery)를 가능하게 해주는 이런 접근 방식은 다수개의 광원을 사용하는 방법 또는 파장 가변성을 확보하기 위한 부가적인 메커니즘을 필요로 하는 단점이 있다. 채널간 간섭(ICI: Inter-Channel Inter-



(그림 5) OFDM-PON에서 클럭신호 분배 방법[14]

ference)를 야기하는 비교적 큰 주파수 천이를 수용하거나 또는 상향 동기 요구 사항을 좀더 완화시키기 위해서는 서로 다른 ONU들로부터 생성되어 상향 전송되는 상향 신호 대역 내에서 가드 밴드를 반드시 삽입해야 한다. 이는 결국 상향 다중 밴드 OFDMA 구성 방식과 유사하다. 상호 상관성 기술(correlation technique)은 상향 신호 수신을 위해 FFT 윈도우를 적당히 정렬하고, 다수 개의 ONU들로부터 수신된 상향 데이터들을 공동으로 처리하기 위해서 반드시 필요한 기술이다[16].

## 2. OFDMA-PON MAC 계층

광 물리 계층에서의 전송 성능이 보장된 OFDMA-PON에서 고용량 대역폭을 다수의 광 가입자들에게 경제적이고 효율적으로 분배하기 위해 MAC(Medium Access Control) 기술이 필수적이다. MAC 기술은 다중 접속(multiple access) 제어를 위한 프로토콜 설계와 동적 자원 할당 기능 구현을 포함한다[17][18].

### 가. MAC 프로토콜 설계

기 전개된 TDMA-PON에서는 MAC 계층에서의 효과적인 채널 관리 및 전송 효율 증가를 위해 상하향전송 채널이 분리되어 있다[19]. OFDMA-PON에서도 다중 접속을 효과적으로 제어하기 위해 상하향 채널 분리가 필요하며, OLT 및 ONU들 간의 OAM(Operations, Administration, and Management)을 위한 제어 메시지의 교환이 보장되어야 한다. 이를 위해 TDMA 방식의 10GE-/XG-PON과 같이 데이터 채널 내에서 제어 메시지가 교환될 수 있다. 또는 OFDMA-PON에서는 주파수 직교 특성을 갖는 서브캐리어 단위로 자원 활용이 가능하기 하기 때문에, 제어 메시지 교환을 위한 수 개의 서브캐리어 그룹으로 구성된 독립된 제어 채널 지정이 가능하다[20]. 이 경우 OLT-ONU 간 빠른 제어가 가능하지만 망에서 사용하는 직교 특성을 갖는 전체 서

브캐리어 개수가 적어서 하나의 서브캐리어당 전송속도가 크게 되어 독립적인 제어 채널의 사용은 큰 대역폭 낭비를 초래할 수도 있다.

OFDMA-PON에서는 전송 용량 증가를 위해 거리별 차등의 변조 포맷을 사용하는 적응형 변조의 광 OFDM (AMOOFDMA: Adaptively Modulated Optical OFDM) 기술의 사용이 가능하다[21][22]. 적응형 변조를 사용하기 위해, ONU 등록 절차 시 ONU의 이용 가능한 변조 포맷 및 서브캐리어 사용 범위 등에 대한 정보가 제어 메시지를 통해 OLT에 전달되어야 한다. 또한, AMOOFDMA의 사용은 네트워크에서의 동적 자원 할당(dynamic resource allocation) 프로세스 동안에 ONU별 할당된 서브캐리어 및 변조 포맷에 따른 다른 전송 속도를 갖는 것을 의미하므로, 물리 계층과 MAC 계층의 교차된 cross-layer 동작이 필요하다[17]. 그러나, 광 링크 상에서 QAM 차수에 변화를 줄 정도로 큰 물리적 상태 변화가 없을뿐더러, 잦은 ONU의 변조 포맷 변경은 상당한 양의 제어 메시지 교환을 필요로 하므로, AMOOFDMA 기능은 ONU의 registration 프로세스에서 동작할 것으로 예상된다. 초기 registration 단계에서의 변조 포맷은 거리에 따른 BER에 따라 결정될 수 있다 [17][22]. 추가적으로, AMOOFDMA 기술이 서브캐리어 별 다른 변조 포맷을 허용한다 하더라도, 각 ONU에 할당된 모든 서브캐리어들은 동일한 변조 포맷을 사용할 필요가 있다. 다른 변조 포맷이 사용(예를 들면, DBPSK /DQPSK/m-QAM)되는 서브캐리어별 변/복조를 수행할 경우 시스템 복잡도가 증가하며, 하나의 ONU에 할당된 서브캐리어들 간에(특히, 제한적인 수의 서브캐리어를 사용하는 경우에) 서브캐리어 별 다른 변조 포맷을 사용하는 경우는 일반적이지 않기 때문이다[17].

### 나. 동적 자원 할당

경제적이고 효율적으로 OFDMA-PON의 네트워크 자원을 이용하기 위해, MAC 계층에서는 동적 자원 할



당 방법이 필요하며 이를 위해 MAC 프로토콜이 정의되어 있어야 한다[17][21]. 2008년 NEC에서는 ethernet 패킷을 복수 개의 125us의 타임 슬롯(time slot)을 포함하는 1-10ms의 고정 프레임에 실어 전달하는 방식(FBT: Fixed Burst Transmission)과 three-way 시그널링을 이용한 서비스 연결 기반의 CAC(Call Admission Control)을 이용하여 데이터를 전송하는 동적 서킷 전송(DCT: Dynamic Circuit Transmission) 방식의 동작을 수행시키기 위한 MAC 프로토콜을 제안하였다[20].

유럽의 ACCORDANCE 그룹에서는 10GE-PON 기반의 OFDMA/TDMA 동작을 위한 MAC 프로토콜을 제안하였다[17]. 이 프로토콜에서 OLT는 각 ONU에 사용할 서브캐리어와 시간 정보를 전달한다. 이 때 ONU 시스템 복잡도 및 비용 절감을 위해 제한된 수의 서브캐리어만 사용할 수 있다. REPORT/GATE 방법을 따르며, GATE 메시지에는 최저 서브캐리어 필드(Low\_SC)와 최고 서브캐리어 필드(High\_SC)가 추가되어 ONU 상향 전송을 위한 서브캐리어 및 시간 윈도우(Start\_Time과 Stop\_Time)에 대한 정보를 제공하여 2차원의 할당을 가능하게 한다. OFDMA/TDMA 방식으로 사각형 형태의 2차원 할당을 하는 이유는 인접된 서브캐리어의 사용이 수신기에서의 처리가 쉽고, 다수 ONU들의 전송에 의한 서브캐리어 간 간섭을 최소화할 수 있기 때문이다. 또한, 이러한 구조는 최고 서브캐리어 인덱스(High\_SC)와 최저 서브캐리어 인덱스 (Low\_SC)를 나타내는 두 필드를 추가함으로써 동작되기 때문에, MAC 프로토콜의 구조를 단순화한다. SCA(Subcarrier Allocation Identifier) 필드는 특정 ONU를 위한 대역폭 할당 모드를 설정할 때 사용된다. 그 프로토콜을 기반으로 2차원 자원(서브캐리어, 시간) 할당을 위한 시행착오적(heuristic) 방법을 제안하였다[18]. 각 2차원의 할당 영역은 가드 시간(guard time)을 두고 인접하여 전송할 수 있다. 참고문헌[18]에서는 5us, 참고문헌[20]에서는 10us의 가

드 시간이 가정되었다. ACCORDANCE에서 제안한 방법은 ONU로부터의 요구량에 근거하여 지연 시간(delay)를 최소화하는 2차원 사각형 영역을 찾아 해당 ONU에 할당한다. 이 경우 서브캐리어 수의 제공에 해당하는 검색 복잡도를 갖는다. 이러한 문제를 완화하기 위해, 가능한 한 많은 수의 서브캐리어를 사용하는 경우(지연 시간이 작을 가능성이 높은 경우)부터 검색하여 최적의 사각형을 찾도록 하였다. 이와 더불어, 채널 이용률을 높이기 위해, 빈 공간을 찾아 활용하는 방법도 제시되었다. 참고문헌 [18]은 ONU에서 사용 가능한 서브캐리어 개수에 따라 지연 시간 성능이 영향을 받으며, 최적의 서브캐리어 개수가 있음을 보였다. 그러나 참고문헌 [18]의 연구는 시행착오적 방법의 알고리즘이 제안되어 이를 구현하기에는 다소 복잡하며, 서비스 품질 보장을 위한 방법은 제시되지 않았다.

## IV. 향후 기술 전망

### 1. 하이브리드형 OFDMA-PON

지금까지 고성능 VLSI 제작관련 기술은 주로 고성능 응용 분(모바일 백홀, 엔터프라이즈망 및 데이터 센터 연결망등)에 적합하도록 ADC, DAC 및 DSP 들을 비교적 구현 비용이 비싸더라도 성능 요구 사항을 만족하는 수준에서 공급이 가능하도록 드라이브 해왔으나, 구현 및 운영 비용에 상당히 민감한 가입자 망 분야에서 특별히 가입자 단말 장치에 속하는 ONU에 이러한 고성능/고가 VLSI 관련 장치를 적용하기에는 매우 어려운 것이 현실이다. 이러한 구축 비용 관련 난제들을 극복하기 위해서 하이브리드형 WDM-OFDMA 방식 다중밴드 OFDMA 또는 서브캐리어별로 변조 및 코딩을 adaptive 하게 적용하는 방법들이 제안되었다. 하이브리드 WDM-OFDMA 방식의 경우, 40Gb/s급 이상의 최대 접속 가능한 대역폭을 다수의 파장으로 잘게 쪼개어서 구현하였

다. 이 경우 사용된 파장 채널 수로 총 전송 대역폭을 나누어 전송하게 되므로 총 대역 전송에 필요한 파워 버짓 (power budget) 및 OSNR 제한 조건을 경감시킬 수 있는 장점이 있다. 하지만, 단일 혹은 다수의 파장 신호에 대한 선택 및 처리가 가능한 파장 의존성을 갖지 않는 수신기가 필요한 것이 단점이다.

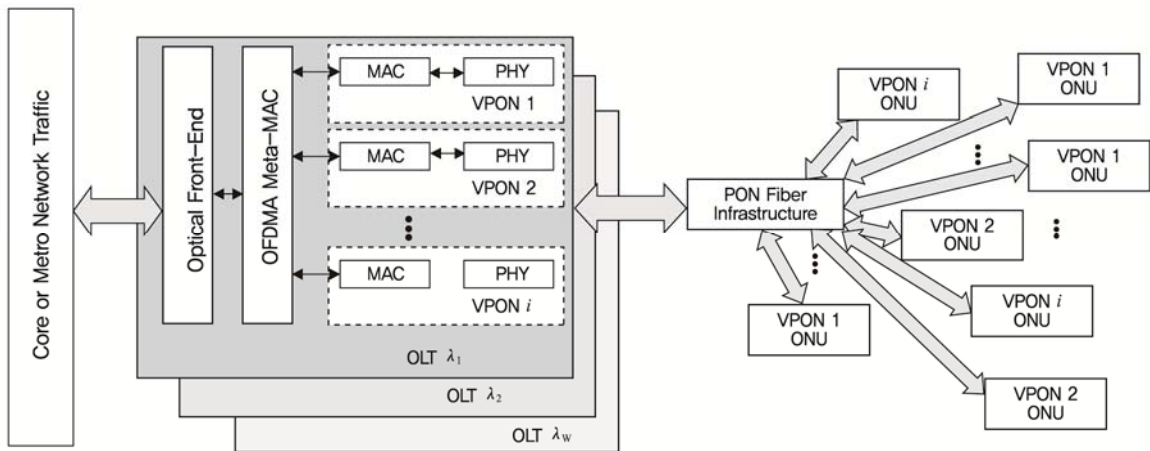
## 2. 모바일 백홀 OFDMA-PON

LTE와 LTE-A의 4G 표준에서는 셀(Cell)당 각 100 Mb/s와 1Gb/s의 데이터 속도를 목표로 한다[19]. 셀의 밀집도가 증가된 상황에서 이용 가능한 스펙트럼의 공간적 재사용(spatial reuse) 방법은 주파수 간섭(interference)에 의한 송수신 파워 감소에 의해 전송 속도를 제한할 수 있다. 이러한 상황에서 낮은 지연 시간과 높은 서비스 품질을 보장하기 위해, 고용량의 고속 전송이 가능한 모바일 백홀 네트워크가 필요하다. 이를 위하여 광섬유 기반의 PON이 고려될 수 있다. 그러나, 기존의 PON은 모바일 백홀로써 기능하기 위해 구조적이고 기능적으로 많은 변경이 필요했고 단일 플랫폼으로 이기종 서비스를 제공하기 위한 추가적인 시스템 업그레이드 비용이 요구되었다[14]. 2013년 NEC는 모바일 백홀 기능을 지원하는 광 네트워크의 기술적 과제에 대해 논

의하였고, 모바일 백홀의 셀당 100Mb/s 이상의 전송 속도를 제공하는 OFDMA-PON 구조를 제안하고 실험적으로 그 성능을 평가하였다. 그 OFDMA-PON 구조는 DSP를 이용한 디지털 RoF(dROF: Digital Radio-over-Fiber)와 TDMA 방식을 사용하여 광섬유 링크 당 최대 200개의 셀 사이트를 수용할 수 있는 LTE-Adv 기반의 이동 통신 시스템용 모바일 백홀 트래픽 처리가 가능한 총용량 10Gb/s급 OFDMA/TDMA 하이브리드 PON 망에서 1ms 이하의 전송 지연 규격을 만족하는 버스트 모드 전송이 가능하다[3][14].

## 3. 소프트웨어 정의된 OFDMA-PON

EU FP-7에서는 유연한 광 네트워크를 위한 3가지 핵심 요소 기술로써 Flexible Optical Transponder, Flexible Optical Switching Node, 및 Flexible Network Planning/Control Plane 이슈 등을 제안하고 이에 대한 활발한 연구를 진행하였다[3][4]. 상이한 PHY 기술을 갖는 광 네트워크의 전개 및 유지 비용을 줄이고, 네트워크 공존(coexistence) 관점에서 하나의 플랫폼으로 다양한 서비스를 지원하기 위해, 2013년 AIT는 NEC와 함께 (그림 6)과 같은 소프트웨어-정의된(Software-Defined) 광 네트워크를 위한 OFDM 기반의 Meta-MAC에 대한



(그림 6) Meta-MAC 구조[20]

연구를 발표하였다[20]. Meta-MAC은 이기종 네트워크의 MAC의 상위에서 가상의 OFDMA 서브캐리어를 사용하여 대역폭을 효율적으로 관리하고 제어한다.

## V. 결론

본고에서는 차세대 광 가입자를 위한 OFDMA-PON 기술에 대한 전반적 내용과 기 연구된 물리계층, 상향 자원 할당 방법들에 대해 알아보았다. NG-PON2 이후 표준 기술은 40G~250G 수준의 전송 속도가 예상되며, 이를 위해 광대역 전송이 가능한 차세대 PON 기술에 대한 연구가 선진 연구 기관 및 기업체를 중심으로 활발히 진행되고 있다. 또한 향후 차세대 광 가입자 망은 물리적 대역폭의 추가 제공 외에도 동적 대역 할당과 이중 서비스의 융합 개념 등을 아우르는 진보된 네트워킹 기능이 요구되며, 망 투자 및 운용비 절감을 위하여 지능적이고 광역화되는 방향으로 발전될 것으로 예측된다. OFDMA-PON 기술이 높은 스펙트럼 효율과 비용 효율적으로 대용량, 장거리 전송이 가능한 기술이지만 아직은 성숙단계에 있지 않아 물리 계층, MAC 계층에 대한 선행 연구가 일부 외국 선진 기업을 중심으로 부분적으로 진행되고 있는 수준이며, 국내에서는 ETRI가 2011년부터 선행 연구를 진행하고 있다. OFDMA-PON은 차세대 광 가입자 기술인 만큼 표준화에 앞서 IPR 및 기술 확보 노력을 위해 국내 연구 기관 및 학계의 폭넓은 연구가 필요하다. 본고를 통해서 OFDMA-PON 기술에 대한 관심을 높이고, 국내 연구 기술의 향상을 기대해 본다.

### 용어해설

**직접변조/직접검출 광전송방식(IM/DD: Intensity Modulation/Direct Detection)** 송신부에서는 레이저 출력 광파를 전기적 신호로 직접 변조하여 세기 변조된 신호를 전송, 수신부에서는 수신된 광신호를 직접 광다이오드에 조사하여 전류 크기의 변화함으로써 신호를 검출하는 방식  
**분광학적 전송 효율(spectral efficiency)** 주어진 대역폭 내에서 최대한으로 가능한 데이터 전송율(최대 정보율)

## 약어정리

AMOOFDMA	Adaptively Modulated Optical OFDM
CAC	Call Admission Control
CP	Cyclic Prefix
CW	Continuous Wavelength
DCT	Dynamic Circuit Transmission
dROF	Digital Radio-over-Fiber
DSB	Double Sideband
FBT	Fixed Burst Transmission
FDE	Frequency Domain Equalizer
ICI	Inter-Channel Interference
MAC	Medium Access Control
OAM	Operations, Administration, and Management
OBI	Optical Beat Interference
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
OSSB	Optical Single Sideband
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PON	Passive Optical Network
SCA	Subcarrier Allocation Identifier
WDM	Wavelength Division Multiplexing

## 참고문헌

- [1] N. Cvijetic, "OFDM for Next Generation Optical Access Networks," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol. IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 30, no. 4, 2012, pp.384-398.
- [2] ITU-T G. 987, 10 Gigabit-capable Passive Optical Network (XG-PON): General Requirements
- [3] IEEE 802.3 av, Amendment: Physical Layers Specifications and Management Parameters for 10 Gb/s Passive Optical Networks
- [4] W. Lim et al., "Dynamic Subcarrier Allocation for 100 Gbps 40 km OFDMA-PONs With SLA and CoS," vol. 31, no. 7, 2012, pp.1055-1062.
- [5] Neda Cvijetic, "OFDM for Next Generation Optical Access Networks," presented at the *Opt. Fiber Commun. Conf.*, Los Angeles, CA, Mar. 2011, Paper OMG3.
- [6] Qian, J. Hu, J. Yu, P. N. Ji, L. Xu, T. Wang, M. Cvijetic,

- and T. Kusano, "Experimental demonstration of a novel OFDM-A based 10 Gb/s PON architecture," presented at the *Eur. Conf. Opt. Commun. Conf.*, Berlin, Germany, Sep. 2007, Paper 5.4.2.
- [7] J. Armstrong, "OFDM for optical communications," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 27, no. 3, Feb. 2009, pp. 189-204.
- [8] A. J. Lowery, D. Liang and J. Armstrong, "Orthogonal frequency division multiplexing for adaptive dispersion compensation in long haul WDM systems," presented at the *IEEE/OSA Opt. Fiber Commun. Conf.*, Anaheim, CA, Mar. 2006, Paper PDP39.
- [9] W-R. Peng et al., "Experimental demonstration of 340 km SSMF transmission using a virtual single sideband OFDM signal that employs carrier suppressed and iterative detection techniques," presented at the *Opt. Fiber Commun. Conf.*, San Diego, CA, Mar. 2008, Paper OMU1.
- [10] N. Cvijetic, S. G. Wilson, and D. Qian, "System outage probability due to PMD in high-speed optical OFDM transmission," *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technologies*, vol. 26, no. 14, July 2008, pp. 2118-2127.
- [11] N. Cvijetic et al., "1.2 Tb/s symmetric WDM-OFDMA-PON over 90 km straight SSMF and 1:32 passive split with digitally-selective ONUs and coherent receiver OLT," presented at the *IEEE/OSA Opt. Fiber Commun. Conf.*, Los Angeles, CA, Mar. 2011, Paper PDPD7.
- [12] D. Qian et al., "108 Gb/s OFDMA-PON with polarization multiplexing and direct detection," *IEEE/OSA J. Lightwave Technol.*, vol. 28, no. 4, Feb. 2010, pp. 484-493.
- [13] M. Morelli et al., "Synchronization techniques for orthogonal frequency division multiple access (OFDMA): A tutorial review," *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 7, July 2007, pp. 1394-1427.
- [14] R. P. Giddings and J. M. Tang, "Experimental demonstration and optimization of a synchronous clock recovery technique for real-time end-to-end optical OFDM transmission at 11.25 Gb/s over 25 km SSMF," *Optics Express*, vol. 19, Jan. 2011, pp. 2831-2845.
- [15] D. Qian et al., "100 km long reach upstream 36 Gb/s-OFDMA-PON over a single wavelength with source-free ONUs," presented at the *Eur. Conf. Opt. Commun. Conf.*, Vienna, Austria, Sep. 2009, Paper 8.5.1.
- [16] D. Qian et al., "A novel OFDMA-PON architecture with source-free ONUs for next-generation optical access networks," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 21, no. 17th, Jun. 2009, pp. 1265-1267.
- [17] K. Kanonakis and I. Tomkos, "An overview of MAC issues in OFDMA-PON networks," *13th International Conf. Transparent Optical Netw. (ICTON)*, June 26th-30th, 2011, Tu.B6.2.
- [18] K. Kanonakis, E. Giacomidis, and I. Tomkos, "Physical-layer-aware MAC schemes for dynamic subcarrier assignment in OFDMA-PON networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 30, no. 12, 15th, June, 2012, pp. 1915-1923.
- [19] J. Zheng and H.T. Mouftah, "Media access control for Ethernet passive optical networks: an overview," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 2, Feb. 2005, pp. 145-150.
- [20] W. Wei et al., "MAC protocols for optical orthogonal frequency division multiple access (OFDMA)-based passive optical networks," *Optical Fiber Commun. Conf. Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conf. (OFC/NFOEC)*, Feb, 24th-28th, 2008, JWA82.
- [21] K. Kanonakis et al., "ACCORDANCE: A novel OFDMA-PON paradigm for ultra-high capacity converged wireline-wireless access networks," *12th International Conf. Transparent Optical Netw. (ICTON)*, June 27th-July 1st, 2010, Tu.A1.2.
- [22] C. H. Yeh et al., "Using adaptive four-band OFDM modulation with 40 Gb/s downstream and 10 Gb/s upstream signals for next generation long-reach PON," *Optics Express*, vol. 19, no. 27, Dec. 2011, pp. 26150-26160.