

초광대역 시대를 여는 광전송 기술

Optical Transmission Technologies for Ultra Broadband Networks

네트워크 기술의 미래 전망 특집

신종윤 (J.Y. Shin)	광전송기술연구팀 선임연구원
정환석 (H.S. Chung)	광전송기술연구팀 선임연구원
김승환 (S.H. Kim)	광전송기술연구팀 책임연구원
고제수 (J.S. Ko)	광전송기술연구팀 책임연구원
김광준 (K. Kim)	광전송기술연구팀 팀장

목 차

-
- I . 서론
 - II . 광전송 개요
 - III . 100G 광전송 기술 동향
 - IV . Beyond 100G 전망
 - V . 결론

고대역폭을 요구하는 새로운 서비스의 등장이 계속 이어지고 있어 수 년내 초광대역 시대가 도래할 것으로 예상된다. 이에 대비하여 다양한 광전송 대역폭 확장 기술이 등장하고 있으며, 나아가 시장 선점을 위한 실상용화를 서두르고 있다. 본 고에서는 초광대역 서비스 전달을 위해 요구되는 광전송망과 핵심 요소기술들을 살펴보고, 최근 경쟁적으로 기술 확보에 관심을 기울이고 있는 100Gbps 변복조, 100Gbps OTN, 100Gbps 이더넷 기술에 대한 기술 동향과 모듈 개발 동향, 또한 100G 이후 등장이 예상되는 새로운 광전송 분야와 이를 위해 극복해야 할 한계 기술에 대해 기술한다.

I. 서론

인터넷의 보급과 광통신 기술의 발전에 힘입어 광대역 서비스 보급이 활성화 되었으며, 개인 가입자와 주택내에 까지 광대역 서비스를 손쉽게 접할 수 있게 되었다. 대역폭 증가 추세는 계속 이어지고 있어 이제 광대역 시대를 넘어 초광대역 시대를 바라보고 있으며, 이를 구현하기 위한 기술 혁신이 요구되고 있다. 광대역 신호를 전달하는 기반망인 광전송망은 과거 10년간 SDH/SONET에서 OTN으로, 전송망의 신호 속도는 2.5Gbps에서 10Gbps로 발전하여 왔다. 초고속 인터넷의 필요성에 따라 IEEE에서 2010년 중순에 40Gbps 및 100Gbps 인터넷의 표준화를 완성하였으며[1], 관련하여 ITU-T에서는 이들 신호 트래픽을 수용하여 전송할 수 있는 40Gbps 및 100Gbps OTN의 권고안을 마련하였다[2]. 또한, OIF에서는 100G WDM 장거리 전송과 광모듈을 위한 규격안을 개발하였다[3],[4].

본 고에서는 초광대역 서비스 전달을 위한 광전송망과 관련 최근 관심이 고조되고 있는 100G 변복조 기술, 100G OTN 기술, 100G 인터넷 기술 표준화와 개발 동향을 살펴보고, 광전송 기술 실상용화를 위한 주요 모듈의 개발 동향을 서술한다. 나아가 100G 이후 등장이 예상되는 새로운 광전송 기술과 이를 위해 극복해야 할 한계 기술에 대해 조망한다.

용 확산으로 그 중요성이 더욱 강조되고 있다. 광대역 시대를 넘어 초광대역 시대를 촉진시키는 주요 요인들과 발전 방향을 보면 다음과 같다.

- 데이터 센터의 대용량화: 10G → 40G/100G
- 액세스망의 광대역화: 1G/2.5G → 10G
- 이더넷/광 백본망의 고속화: 2.5G/10G → 40G/100G → Beyond 100G(400G/1T)
- 모바일 백홀의 광대역화: 3G → 4G/5G
- 가입자 접속점의 스마트화: 스마트 폰, 스마트 TV, 스마트 워크 등

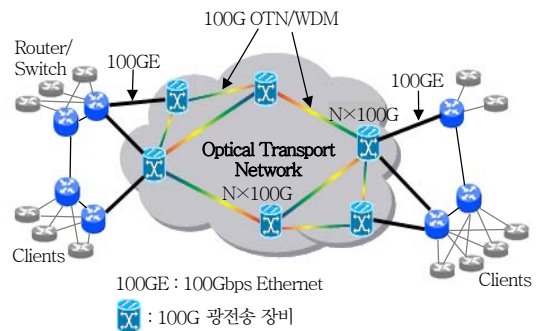
초광대역 서비스가 수 년 내에 성공적으로 정착하기 위해서는 기반이 되는 광전송망에 100G가 도입되어야 한다. (그림 1)은 초고속 광대역 서비스 제공을 위한 100Gbps급 광전송망 구성 예를 보여주고 있다. 클라이언트 신호는 100G 이더넷 라우터 또는 스위치로부터 오는 100GE이다. 100G OTN 장비에서는 100GE를 수용하여 다중화한 다음 $N \times 100G$ 용량의 파장분할다중화(WDM) 신호형태로 전송한다.

기존의 ROADМ, P-OTS, DWDM 장비를 라인카드 교체 등으로 100G급으로 업그레이드 하거나 새로운 100G 광전송 장비가 등장할 수 있으며, 클라이언트와의 접속은 광트랜스폰더를 통해 이루어진다. 100G WDM 신호는 수 100km~수천 km 거리를 전송 가능해야 하며, 이를 위해 고성능 FEC와 멀티레

II. 광전송 개요

1. 광전송망 구성

광전송망은 데이터 센터에서 사용자 단말에 이르기까지 광대역 서비스 전달에 있어서 중요한 역할을 담당하여 왔으며, 클라우드 서비스와 모바일 기기 이



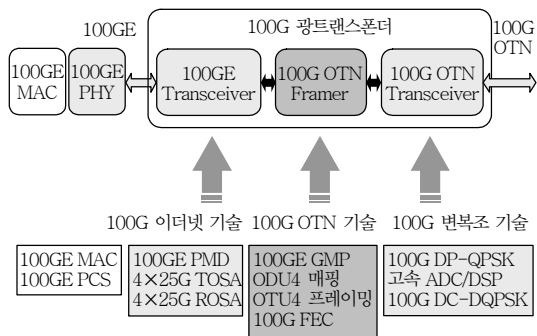
(그림 1) 100G 광전송망 구성 예

벨 위상 변복조 및 코히어런트(coherent) 수신 기술 등이 고려되고 있다.

2. 광전송 요소 기술

(그림 1)에서와 같은 100G 이더넷을 클라이언트로 하는 100G 광전송망에서 요구되는 100G 광전송 핵심요소 기술들이 (그림 2)에 나와 있다.

100G 광트랜스폰더는 100GE 광트랜시버, 100G 프레임머/FEC, 100G OTN 광트랜시버를 포함한다. 10~40km급 100GE 트랜시버는 100GE PHY(PMD) 표준을 만족하는 4×25G TOSA/ROSA로 구성된다.



(그림 2) 100G 광전송 핵심요소 기술

100GE 신호 매핑/다중화/프레이밍 기능을 하는 프레임머/FEC는 100G OTN 표준을 만족한다. 100G OTN 광송수신을 위한 변복조 기술로는 멀티레벨 위상 변조 방식과 코히어런트 수신 방식을 선호하고 있으며, OIF에서는 100G DP-QPSK 방식을 표준으로 채택한 바 있으나[3], 그 외에도 응용영역과 성능에 따른 다양한 방식이 연구되고 있다.

III. 100G 광전송 기술 동향

1. 100G 변복조 기술

지금까지 광전송에서는 NRZ 변조 방식이 주로 사용되었지만 이를 100Gbps급의 신호에 도입하여 WDM 전송망에 적용하는 데에는 여러 어려움이 있다. 우선 현재 광전송 소자들의 대역폭 한계로 100Gbps급 전기 신호 생성과 사용이 사실상 불가능하고, 100Gbps NRZ 신호에 필요한 10ps/nm 수준 분산 보상도 구현이 어렵다. 이를 극복하는 방법으로 다양한 변복조 방식이 제안되고 있다[5]-[14].

<표 1>은 100Gbps 신호를 OTN 망에 수용하여

<표 1> 100G 변복조 방식 비교

Format	RZ-DPSK	RZ-DQPSK	(RZ-) 3ASK-DPSK	RZ-DP-DQPSK	DC-DQPSK	(RZ-) DP-QPSK	OFDM
Detection	Direct	Direct	Direct	Direct	Coherent	Coherent	Coherent
Company			ADVA	Ciena	ETRI	Ciena, ALU, OpNext	Ofidium
Availability	×	×	○	○	△	△	×
Application	Core/Metro	Core/Metro	Metro	Core/Metro	Metro	Core	Core
Symbol Rate (GBd)	112	56	44	28	28	28	
WDM Grid (GHz)	200	100	100	50	100	50	50
OSNR(dB) (BER 10 ⁻³)	17	18	23	18	18	16	17
GVD(ps/nm)	10	25	<40	100	100	>>500	>>500
PMD(ps)	1.5	2.5	2.5	4	4	>>10	>>10

장거리 전송하기 위한 변복조 방식을 정리한 것이다. DPSK 또는 DQPSK 방식은 differential coding을 사용하여 한 심볼 당 1개 내지 2개의 비트를 전송하는 방식이며, direct detection을 사용하는 수신기를 포함하고 있다. Direct detection 방식은 DPSK 혹은 DQPSK로 위상 변조된 신호를 광학적 간섭계를 통과시켜 세기 변조된 신호로 변환한 후 기존의 NRZ 수신기에서 사용하는 전기 소자를 그대로 사용할 수 있어 구현이 비교적 용이한 장점이 있다. 그러나, DPSK와 DQPSK는 심볼레이트가 각각 112Gbaud와 56Gbaud이므로 색분산 허용치가 10ps/nm와 25ps/nm로 여전히 높은 문제가 있다[5].

이를 해결하기 위해 5비트를 2개의 심볼에 매핑하여 전송할 수 있는 3ASK-DPSK 방식을 ADVA사에서 제안하여 개발하였다[6]. 이 방식은 심볼레이트가 44Gbaud로서 기존의 40기가 트랜시버에서 사용하는 광/전자 소자를 이용할 수 있는 장점이 있지만, 요구되는 OSNR이 다소 높고 색분산 허용치가 별로 완화되지 않는 단점이 있다.

색분산, 편광모드분산 등 전송 선로의 여러 제한요인을 극복하기 위해 두 개의 편광 성분을 이용하는 DP-DQPSK 방식도 개발되고 있다. 이 방식은 112 Gbps 신호 전송을 위해 28Gbaud 속도의 심볼을 이용하고 있으며, 두 개의 편광 성분을 수신부에서 분리하기 위해 광학적인 편광조절 방법을 이용하므로 연속적인 편광 트래킹이 필요하여 광섬유의 편광모드분산(PMD)이 아주 낮은 경우에만 사용할 수 있다.

28Gbaud의 심볼 속도를 이용하면서 두 개의 캐리어와 DQPSK 변복조 방식을 이용하는 DC-DQPSK 방식이 ETRI에서 개발중에 있으며, 이 방식은 편광모드분산, 색분산 조건이 비교적 여유롭고 연속적인 편광 트래킹이나 코히어런트 변조 방식에서 필요한 고속의 ADC와 DSP를 사용하지 않는 장점이 있다.

광신호의 세기를 측정하여 신호를 검출하는 직접 수신 방식과 달리 코히어런트 수신 방식은 광신호의 위상을 추적하여 신호를 검출한다[7]-[11]. 이 방식은 낮은 OSNR에서도 신호의 수신이 용이하여 수신 감도가 좋고, 전기적인 디지털 신호처리 기술과 결합하여 편광 다중화된 신호의 분리와 색분산 보상이 가능하다. 이론적으로는 무한대의 색분산과 편광모드분산을 보상할 수 있으므로 광선로의 제한 요소에 상관없이 채널 당 전송 속도를 증가시킬 수 있으나, 많은 탭 수가 요구되는 등화기(equalizer)를 구현하기가 용이하지 않다.

멀티레벨로 매핑된 신호를 하나의 캐리어에 실어 전송하는 DP-QPSK 방식과 달리 OFDM 방식은 편광다중화를 이용하면서 여러 개의 캐리어에 나누어 전송한다. 이 경우 각 서브 캐리어의 속도는 1Gbps 이하로 낮기 때문에 one-tap 등화기로 용이하게 신호를 복구할 수 있어 등화기의 구현이 쉽지만, 트랜시버에 사용되는 광/전자 소자의 선형성이 높아야 된다. DP-QPSK와 OFDM 방식 모두 100Gbps 신호 전송을 위해 56GS/s의 ADC가 필요하며 고속의 DSP가 필요하다.

ADC 샘플링 속도를 낮추고 매핑률을 높여서 스펙트럼 효율을 높이고 DSP 처리 속도를 낮출 수 있으나, 높은 매핑률에 따른 전송 거리 제한이 있다. Ciena, Cisco, Alcatel-Lucent, Opnext, NEC, Fujitsu사에서는 DP-QPSK 방식을 이용하여 100G급 트랜시버를 개발중이며, Ofidium사에서는 OFDM 방식을 고려하고 있다[7]-[14].

100G급 신호의 장거리 전송을 위해서 전송 거리와 채널 간격, 적용분야, 기존 시스템 구조 등 통신망을 운용하고 있는 사업자 각각의 환경에 따라 필요한 100G OTN 트랜시버의 구조가 달라질 것으로 판단된다.

2. 100G OTN 기술

가. 표준화 동향

2006년에 IEEE에서 100G 이더넷의 표준화를 추진하면서, ITU-T에서는 100G 이더넷 전송을 지원하기 위한 새로운 OTN 계위 신호인 OTU4/ODU4의 표준화를 진행하였다. 전통적인 OTN 다중화 계위(hierarchy)에 따르면 OTU4 신호 속도는 OTU3 신호 속도를 4배 높인 160G 정도였을 것이다. 하지만, 거의 유사한 시점에서 100G 이더넷 표준화를 함께 진행함에 따라, 100G 이더넷을 최적으로 매핑하면서 기존 OTN 계위 신호인 ODU2e 신호를 10개까지 다중화하여 전송 가능하도록 새로운 OTU4/ODU4의 전송 속도를 다음과 같이 정의하였다[2].

$$111.8099736\text{Gbit/s} \pm 20\text{ppm}$$

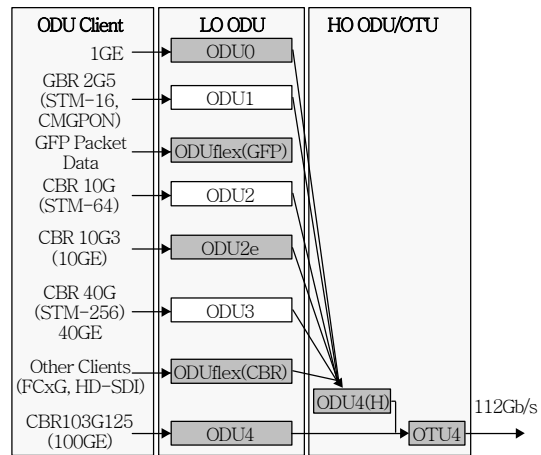
$$= 255/227 \times 40 \times 2.48832\text{Gbit/s}$$

OTN은 이더넷 신호 전송에만 그치는 것이 아니라 음성, 비디오, 데이터 및 스토리지 등 다양한 네트워크들을 위한 미래 지향형 공통 백본 네트워크로 진화하고 있다. 이 중에서 미래에 출현될 클라이언트를 포함해서 특정 클라이언트에 관계없이 어떠한 디지털 신호든 수용하고 그에 대한 효율적인 대역폭을 가변시키고 보장할 수 있는 범용 매핑 절차(GMP) 기술과 유동적 광 채널 데이터 유닛(ODUflex) 기술이 OTN의 진화를 가능하게 한 핵심 기술이다. ITU-T에서는 이러한 기술을 적용한 G.709 v3.0 권고안을 개발하였으며, 2009년 12월에 최종 승인(approval)되었다. 다양한 클라이언트 신호를 수용하는 OTU4를 중심으로 하는 OTN 계위가 (그림 3)에 나와 있다.

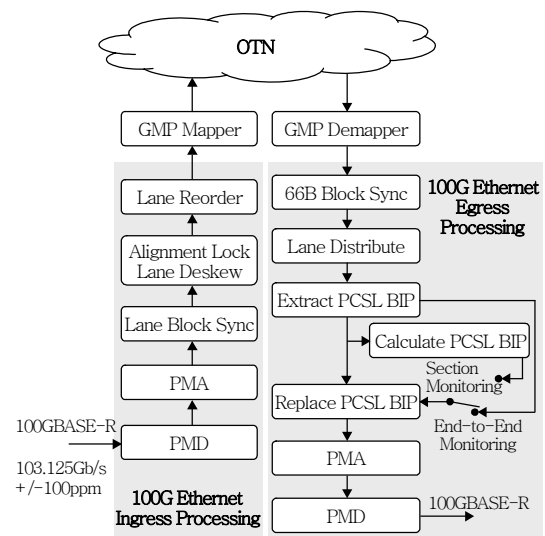
100G 이더넷 신호를 OTN으로 전송 시에 요구되는 기능은 다음과 같다.

- Timing transparent 전송
- 이더넷 신호 수신단에서 PCS 레인 스쿠 보상
- End-to-end 경로 구간 및 장비 구간에서의 PCS 레인별 성능 감시

이러한 요구사항을 만족하기 위해 100G OTN에서 필요한 기능블록이 (그림 4)에 나와 있다. IEEE 802.3ba-2010 표준[1]과 밀접한 관계를 가지고 있어서, BIP 관련 몇몇 기능 블록을 제외한 나머지 블록들은 모두 100G 이더넷 LAN PHY에서 기본적인



(그림 3) OTU4 다중화 계위



(그림 4) 100G 이더넷 수용을 위한 OTU4 매핑 기능 블록

로 사용되는 것들이다.

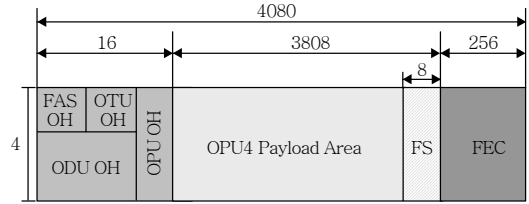
2009년 1월 IEEE 802.3 회의에서 PCS 레인 마커에 레인 식별값 이외에 레인별 BIP 값을 추가하기로 결정하였다. 기존 sync header 오류 누적값은 한 링크에 대한 장기간 비트 오류율을 감시하는 데 유용하지만, 예측이 어려운 비주기적인 오류 발생을 검출하기에 적합하지 않기 때문에, 기존 광 전달망에서 사용되어온 BIP 기술을 채택한 것이다. 이에 따라 광 전달망에서는 이러한 PCS 레인의 BIP 값을 보상해주거나 새로운 값으로 넣어주는 등의 추가 기능 블록이 정의되었다.

이상에서 살펴보듯이 OTN 기술은 더 높은 대역폭 요구를 충족시키는 동시에 시스템 복잡성을 감소시키고, 관리해야 하는 파장 숫자를 최소화하여 비용 절감이 가능하다. OTN은 100G 이더넷을 수용할 수 있는 유일한 네트워크 백본 전송 계층 표준으로, 요구되는 속도와 신뢰성을 모두 만족시키는 차세대 백본 네트워크의 핵심 기술로 자리 잡을 것이다.

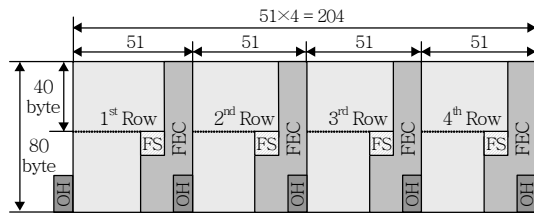
나. 전송 프레임/FEC

OTN은 layer 1 네트워크 기술로서, 여러 개의 파장을 운용하며 각각의 파장 내에 하나 혹은 여럿의 다양한 클라이언트 신호를 수용함으로써 운영자를 위한 효율성과 유동성을 제공하고 있다. 100G급 광대역 클라이언트 신호를 100G급 OTU4 신호에 수용하기 위한 OTU4의 프레임 구조는 (그림 5)와 같다. 기존 OTUk(k=1, 2, 3)과 동일한 프레임 구조를 사용하면서 고속 40바이트 또는 80바이트 병렬 처리에 적합하도록 프레임의 페이로드 각 행 끝부분에 8바이트 고정 스템프(FS)를 정의하였다.

(그림 6)은 80바이트 병렬 처리시 OTU4 프레임 구조이다. OTU4 프레임의 4080바이트 한 행이 51 (=4080/80)로 나누어 떨어지므로 한 프레임은 204



(그림 5) 100G 클라이언트 매핑을 위한 OTU4 프레임 구조



(그림 6) 80바이트 병렬 신호 처리시 OTU4 프레임 구조

클럭 주기를 가진다. 따라서 80바이트 병렬 처리시 요구되는 동작 속도는 대략 174.7031MHz 정도이다. 이러한 프레임 구조는 100G 전송 프레임틀 FPGA로 구현하는 것을 보다 용이하게 한다.

ITU-T에서는 100G OTU4의 고신뢰성을 보장하기 위해서 도메인 간의 인터페이스에서는 RS(255, 239)를 사용한 FEC 코드를 필수적으로 사용하도록 정의하였다[2]. 오류 정정 전에 10^{-4} BER인 입력 신호를 RS(255, 239)을 사용하여 오류를 정정하면 BER이 10^{-12} 이하로 낮아진다. 도메인 내의 인터페이스에서는 이 보다 높은 성능을 얻기 위해서 고유 FEC 코드, 즉 Enhanced FEC(EFEC)를 사용하기도 한다.

ITU-T G.975.1에서는 RS(255, 239)와 동일한 패리티 비트를 사용하는 EFEC 부호를 소개하고 있으며 이는 10^{-15} 의 BER 출력에서 대략 8~9dB의 코딩 이득을 보인다[15]. 현재는 상용 100G급 EFEC 구현을 위해 G.975.1보다 고속 신호 처리 구현에 적합하면서 보다 높은 코딩이득을 얻기 위한 반복 복호기법의 경판정(hard decision) FEC가 연구되고 있다 [16],[17]. 이러한 경판정 FEC는 동일한 패리티 비

트로 동일한 전송 속도를 가지면서도 10^{-15} 의 BER 출력에서 대략 9.3dB의 코딩이득을 제공한다.

고속 전송으로 갈수록 멀티레벨 변조방식에서 매핑률을 높이게 됨에 따라, 광 잡음에 더 민감해지게 된다. 이에 따라 LDPC 또는 터보(turbo) 코드와 같은 연판정(soft decision) 복호 방법을 사용하면 경판정 복호보다 대략 2dB 이상의 성능 향상을 가져올 것으로 기대된다[18]. 하지만, 이러한 연판정 FEC만을 사용할 경우 10^{-3} 에서 10^{-10} 사이에서 BER 마루 현상이 발생하므로 이를 향상시키기 위한 보다 복잡한 알고리즘이 요구된다[18],[19]. LDPC와 RS 코드를 연결하여 LDPC 복호 후 남아 있는 오류를 RS 복호를 사용하여 BER 마루 현상을 개선하는 방법이 한 예이다[18]-[21]. 이와 같이 100G 및 beyond 전송에서 연판정 FEC는 경판정 FEC에 비해서 전력소비, 로직 크기 및 비용 등 해결해야 할 과제가 아직 남아 있다.

3. 100G 이더넷 기술

40G/100G 이더넷 시장요구에 대처하기 위하여 이더넷 표준화를 이끌고 있는 IEEE 802.3에서는 2006년 HSSG를 조직하여 100G 이더넷 표준화를 추진하였으며, 2007년 11월 TF를 결성하여 40G 이더넷과 동시에 100G 이더넷 표준화를 함께 진행하였다. IEEE 802.3ba TF는 컴퓨팅과 서버 쪽에 중점을 두고 있는 40G 이더넷과 네트워크 애그리게이션(aggregation)에 초점을 맞춘 100G 이더넷의 두 가지 속도에 대해 40GE/100GE MAC/PHY 기술을 표준화 하였다. 그 결과 IEEE 802.3ba TF에서 제안한 표준은 2010년 6월 최종 승인되었다[1].

IEEE 802.3ba-2010 표준[1]에는 <표 2>와 같은 40G/100G 이더넷의 PMD 인터페이스가 정의되

<표 2> IEEE 802.3ba 40G/100G 이더넷 PMD 타입

PMD Type	Reach	Description
40GBASE-KR4	At least 1m backplane	4×10Gbps
40GBASE-CR4	At least 7m Cu(twin-ax) cable	4×10Gbps
100GBASE-CR10		10×10Gbps
40GBASE-SR4	At least 100m OM3 MMF	4×10Gbps
100GBASE-SR10	(125m OM4 MMF)	10×10Gbps
40GBASE-LR4	At least 10km SMF	4×10Gbps
100GBASE-LR4		4×25Gbps
100GBASE-ER4	At least 40km SMF	4×25Gbps

어 있다. 이외에도 칩 대 칩(chip-to-chip) 및 칩 대 모듈(chip-to-module) 접속을 위해 리타이밍을 제공하는 전기적 인터페이스인 CAUI와 100GBASE-SR에 최적화된 칩 대 모듈 접속을 위해 리타이밍 없이 전기적 인터페이스를 가능하게 하는 CPPI가 표준화되었다.

IEEE 802.3ba에 대한 표준화가 막바지에 이르던 2009년 후반에는 802.3ba 표준에서 제외되었던 2km 용 40Gbps Ethernet SMF PMD에 대한 CFI가 제출되어 IEEE 802.3에서 승인되었고 2010년 3월부터 정식 IEEE 802.3bg TF로 출발하여 2011년 6월 최종 승인을 목표로 표준화를 추진중에 있다[22].

최근 OIF에서는 100G 백플레인용 CEI-25G-LR과 칩 대 칩 및 칩 대 모듈 인터페이스용 CEI-28G-SR 표준을 진행하고 있으며, OIF에서는 IEEE 802.3으로부터의 피드백을 요청하였다. IEEE 802.3에서도 100G급 칩 대 모듈 인터페이스 및 100G 백플레인용 4×25Gbps 인터페이스에 대한 관심이 높아진 상황이며, 100G 이더넷 백플레인 및 구리 케이블 조립 부품(assembly)에 대한 CFI를 2010년 11월 IEEE 802 plenary 회의에 제출할 예정이다.

또한, 40Gbps Ethernet SMF PMD와 유사하게 100G 이더넷을 데이터 센터 및 망사업자의 클라이언트 인터페이스에 적용하기 위한 2km용 100GbE

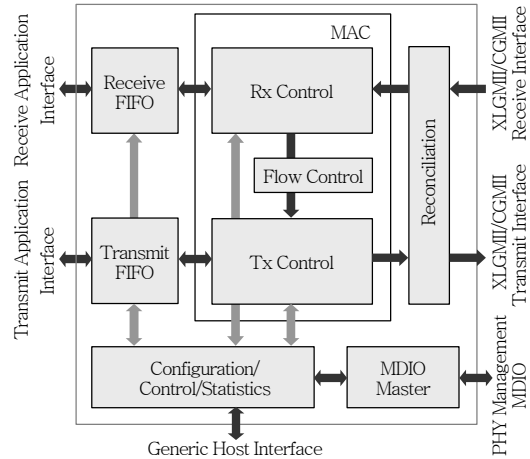
over SMF에 대한 신규 CFI를 준비중에 있다. 10×10Gbps 인터페이스 위주의 자료가 제시되기도 했으나, CFP 모듈보다 작은 광모듈 제작이 가능하도록 비용 절감을 위한 4×25G 전기적 인터페이스도 함께 고려되고 있다.

이더넷 시장의 네트워킹 업체 동향을 살펴 보면 Cisco와 Juniper사는 40G/100G 이더넷 표준이 승인되기 이전에 100Gbps 이더넷 장비를 개발하였고, 특히 Juniper사의 경우 이미 주문을 받고 있다는 내용이 기사화 되었다. Brocade Communication은 데이터 센터 구축을 위한 자사의 스위치 제품 군에 100Gbps 이더넷 모듈을 준비하고 있다고 발표하였다[23].

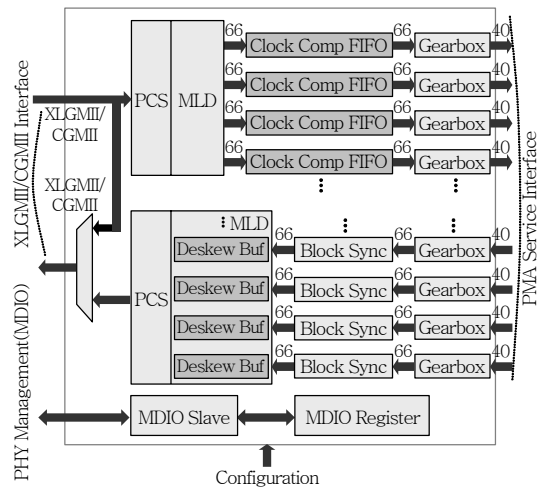
40G/100G 이더넷 테스트 장비의 경우 현재 IXIA와 Spirent사에서는 layer 7까지 처리 가능한 40G/100G용 이더넷 프로토콜 장비를 출시하였으며, JD-SU, Anritsu 및 EXFO사에서는 40G/100G 이더넷 기능에 OTU4 신호까지 처리 가능한 프로토콜 장비를 출시하여 최근 시장경쟁이 치열하게 진행되고 있다.

40G/100G 이더넷 기술 중 MAC/PCS와 관련된 기술을 IP로 제공하는 회사로는 Sarance Technology와 MorethanIP사가 있는데, 이 중 Sarance Technology는 Xilinx와 Altera사의 FPGA IP 형태로 제공하고 있고, MorethanIP사의 경우 현재 Altera사에만 MAC과 PCS를 분리하여 IP로 제공하고 있다. (그림 7)에는 MorethanIP사의 40G/100G 이더넷 MAC에 대한 블록도가, (그림 8)에는 PCS에 대한 블록도가 각각 나타나 있다[24],[25].

한편, Altera에서는 IEEE 802.3ba를 만족하는 40G/100G 이더넷 PCS 블록을 하드 IP로 내장한 Stratix V FPGA를 출시할 예정이다[26]. 이 IP와 FPGA에 내장된 10개의 10G 트랜시버를 결합하여



(그림 7) 40G/100G Ethernet MAC

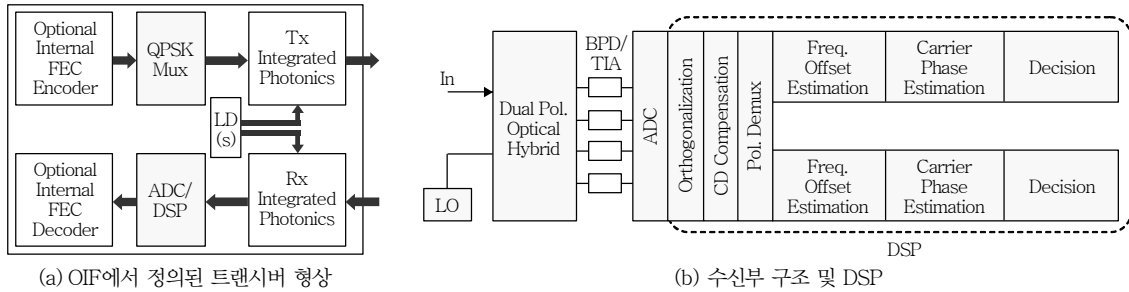


(그림 8) 40G/100G Ethernet PCS

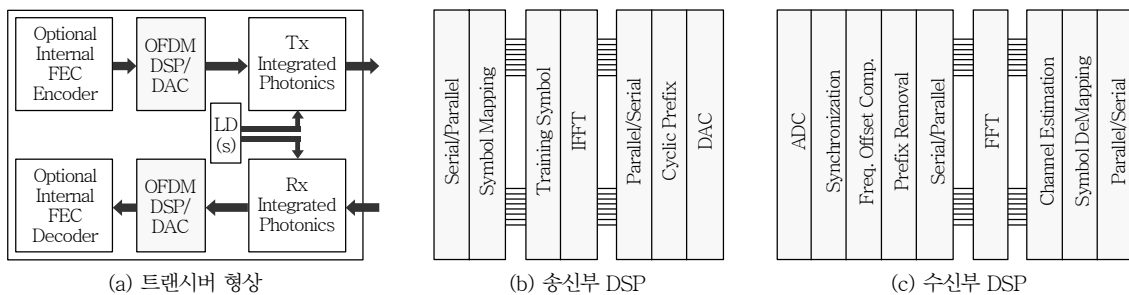
CAUI용 100G 이더넷 PHY(PCS 및 PMA) 구현이 가능하며 100G 이더넷용 CFP 광모듈과 직접 인터페이스 할 수 있다.

4. 초고속 신호처리 모듈

DP-QPSK 코히어런트 광송수신에서는 광 신호의 위상을 추적하여 송신된 정보를 추출하므로 수신 신호를 디지털 신호로 변환하는 고속 ADC와 변환된 디지털 신호를 처리하여 원래의 송신 신호를 추출하는 디지털 신호 처리(DSP)가 핵심 기술이다. (그림 9)는



(그림 9) DP-QPSK 방식 트랜시버



(그림 10) OFDM 방식 트랜시버

OIF에서 정의된 DP-QPSK 방식 코히어런트 광트랜시버를 나타낸다[3]. 입력신호는 QPSK Mux를 거친 후 편광과 위상을 이용하여 변조되어 단일 캐리어로 전송되며, 수신부에서는 광부품에 의해 In-phase와 Quadrature 성분으로 분리되고, ADC와 DSP 모듈에서 송신 정보가 복구된다.

(그림 10)은 다수의 캐리어를 사용하는 OFDM 방식 광트랜시버를 나타내며, DP-QPSK 방식과 비교하였을 때 QPSK Mux가 OFDM DSP/DAC로 대체되고, QPSK ADC/DSP가 OFDM DSP/ADC로 대체되며, 송수신 광부품은 두 방식 모두 동일하게 사용될 수 있다. 이 기술의 상용화를 위해 ADC(DAC)/DSP 모듈을 ASIC으로 단일칩화 하여 소형으로 만드는 것이 필수적이다.

(그림 9)의 DP-QPSK 방식 수신부 DSP에서는 ADC를 거친 후 색분산 값을 보상해야 한다. 이 경우 수십 탭 이상의 등화기를 구현하는 것이 큰 이슈 중 하나이며, 편광 분리와 주파수 오프셋 추정 은 각각

CMA와 M^{th} power 방법에 의해 주로 구현된다. 색분산 보상을 위해 FFT와 IFFT 과정을 통해 주파수 영역에서 분산 보상을 수행할 수도 있으며, 수신부의 IFFT를 송신부로 옮긴 형태를 (그림 10)의 OFDM 방식이라 볼 수 있다. 이 방식은 단일 캐리어 방식에 비해 하나의 탭으로 등화기를 구현할 수 있는 장점이 있으나, 소자와 선로의 선형성이 중요한 단점이 있다. 두 방식에서 DSP의 복잡도는 유사하다[27].

단일 캐리어 혹은 OFDM 방식에서 QPSK와 편광 다중화를 사용하는 경우 56GSa/s 속도에 유효 분해능은 5~6bit인 ADC가 필요하다. Ciena(구 Nortel)에서는 DP-QPSK 방식을 이용하여 ADC/DSP를 단일칩으로 구현하고 코히어런트 수신기를 유일하게 상용화하였고, Cisco(구 Coreoptics)에서는 단일칩을 개발중에 있다. 100Gbps급 코히어런트 신호처리 모듈은 Alcatel-Lucent, Fujitsu, NEC, Opnext 등에서 개발중이다. 일례로, Opnext와 NEC에서는 FPGA를 이용하여 real-time 코히어런트 수신기의 개발 가

능성을 검증하고 있는 바, 색분산 보상 기능이 빠져 있음에도 약 50개의 고속 FPGA를 사용한 것으로 알려져 있다[9],[10].

IV. Beyond 100G 전망

지난 수 년간 광전송 분야의 혁신을 주도한 성공적인 기술로는, 플러거블 트랜시버(pluggable transceiver), 메시망(mesh network), 광전 집적화(opto-electronic integration), 광 코히어런트(optical coherent) 기술 등이 있다. 이 기술들은 100G에는 물론 그 이후에도 계속 실용적인 기술로 활용될 것으로 전망된다.

- 플러거블 트랜시버: 표준 MSA 모듈로 저가격화 달성 및 보급 촉진, 100GE 트랜시버의 경우 CFP 모듈로 구현 가능
- 메시망: 광회선 스위칭이 가능한 ROADMs 장비가 등장하여 광전송망 토폴로지는 종래의 선형 혹은 링 형태에서 진화하여 메시 구성이 가능
- 광전 집적화 기술: 광전광(OEO) 회로의 집적화로 소형화 및 저가격화 가능
- 광 코히어런트 기술: 광전자 기술의 발전으로 집적화 가능

100G 이더넷 다음으로 IEEE 802.3에서는 향후 400G 또는 1T 이더넷의 표준화를 예상하고 있으나 표준화 시기에 대해서는 아직 검토단계에 있다. 400G 이더넷 광트랜시버는 100G 이더넷에서 개발된 기술을 기반으로 확장 구현이 가능할 수 있지만, 1T 이더넷 광트랜시버를 위해서는 새로운 기술이 등장해야 할 것이다. 400G 이더넷 광전송을 위해 16×25Gbps, 10×40Gbps 및 8×50Gbps 인터페이스 등이 제안되고 있다.

ITU-T에서는 100G급인 OTU4 다음으로 OTU5에 대한 스펙 요구사항을 일부 연구중이지만, IEEE 802.3에서 400G 또는 1T 이더넷 표준화를 시작하는 시점에서 본격적인 논의를 하기로 하였다. 특히, 3% 정도의 전송속도 증가만으로도 광 성능에 심각한 저하를 가져올 수 있기 때문에 OTU5에서는 기존 관레와 달리 프레임 구조보다는 전송 효율을 높이는 동시에 전송속도를 최적화하는 노력을 기울일 것으로 예상된다.

400G 혹은 1T의 신호를 장거리 전송하기 위해서는 멀티레벨 변조방식에서 매핑률을 높이고, 여러 개의 캐리어를 사용하거나 OTDM 방식이 등장할 수 있다. 즉, 심볼레이트와 매핑률, 캐리어 수 등의 다양한 조합이 발생할 수 있다[11]-[14].

하나의 예로, 현재 100G급 전송에서 고려되고 있는 28Gbaud에 심볼 속도를 고정시키고 매핑률에 따른 전송 속도를 계산하면 <표 3>과 같다. 매핑 방법을 QPSK에서 16 QAM으로 증가시키면 속도가 2배 증가하고, 64 QAM에서는 3배로 증가한다. 즉, 64 QAM과 같은 높은 매핑률을 사용했음에도 불구하고 400Gbps를 구현할 수 없다. 필요한 OSNR 측면에서 보았을 때 비트오율 10^{-3} 을 기준으로 16 QAM, 64 QAM을 사용하면 각각 4dB와 8.5dB가 증가된다. 이는 최대 전송거리가 QPSK보다 60%와 85% 감소하는 것과 동일하다. 따라서, 채널 당 400G 이상을 전송하기 위해서는 대역폭과 전송거리를 고려해서 16

<표 3> 매핑률에 따른 전송속도 및 필요한 OSNR

Modulation Format	Data Rate (Gbps)	OSNR(dB) (BER 10^{-3})
DP-QPSK	112	16
DP-8 QAM	168	18.6
DP-16 QAM	224	20
DP-32 QAM	280	22
DP-64 QAM	336	24.5

QAM 정도의 적절한 매핑률과 2개의 캐리어를 사용하는 방법을 생각해 볼 수 있다. 이 경우, 전송 속도는 448Gbps가 되며, 채널 대역폭은 약 80GHz 정도가 된다. 여기서, 데이터는 QPSK로 매핑되었지만 각각의 캐리어는 단일 캐리어 방식 또는 OFDM으로 변조될 수 있다.

이러한 계산은 여러 가지 조합 중 하나의 예에 불과하며 심볼레이트와 매핑률에 따라 다양한 조합이 발생할 수 있고, 적용 분야에 따른 최적의 형태가 있을 수 있다. 또한, 채널 당 100G 이상에서 사용될 전송속도 역시 아직 정해지지 않은 상태이다.

V. 결론

초광대역 시대를 여는 기술로 수 년 내로 광전송 망에 도입이 예상되는 100G 광전송 핵심요소 기술, 즉 100G 변복조, 100G OTN 및 100G 이더넷 전송 기술의 표준화와 개발 동향에 대해 살펴보았다. 또한 100G 이후에 등장할 것으로 예상되는 400G 및 1T 급 전송방식과 여러 가지 변조방식에 대해 조망해 보고 그 가능성을 확인하였다. 앞으로 초광대역 네트워크의 기반이 될 100G 광전송 분야에서 성공하기 위해서는 100G 광트랜스폰더와 이의 핵심 모듈인 100G OTN 프레임머와 100G 변복조용 초고속 신호처리

모듈부터 조속히 실상용화 하여 경쟁력을 갖춰야 한다. 나아가 100G 이후를 대비한 400G/1T용 광전송 신호처리 기술 등 미래 원천 기술을 확보하는 것이 과제이다.

약어 정리

ADC	Analog-to-Digital Converter
BER	Bit Error Rate
BIP	Bit Interleaved Parity
BPD	Balanced Photodiode
CAUI	100 Gigabit Attachment Unit Interface
CBR	Continuous Bit Rate
CD	Chromatic Dispersion
CFI	Call For Interest
CFP	100-gigabit small form-Factor Plug-gable
CGMI	100 Gigabit Media Independent Interface
CMA	Constant Modulus Algorithm
CMGPON	Continuous Mode GPON
CPPI	100 Gigabit Parallel Physical Interface
DAC	Digital-to-Analog Converter
DC-DQPSK	Dual Carrier-Differential Quadrature-Phase Shift Keying
DP-QPSK	Dual Polarization-Quadrature Phase-Shift Keying
DPSK	Differential Phase Shift Keying
DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
DSP	Digital Signal Processor
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
FAS	Frame Assignment Sequence
FC	Fibre Channel
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast-Fourier Transform
FPGA	Field Programmable Gate Array
FS	Fixed Stuff
GMP	Generic Mapping Procedure
GPON	Gigabit-capable Passive Optical Networks

● 용어해설 ●

OTN: ITU-T 권고 G.709에 규정된 광전송망으로 OPU (Optical-channel Payload Unit), ODU(Optical-channel Data Unit), OTU(Optical-channel Transport Unit) 프레임에 종속(클라이언트) 신호를 수용하여 고신뢰도로 데이터를 전송하는 기술. 100G급 전송 프레임은 OTU4임

100G 광트랜스폰더: 100G 이더넷 광트랜시버, 100G 전송 프레임머/FEC, 100G OTN 광트랜시버로 이루어진 장치로, 100GE 신호를 수용하여 100G OTN 신호로 투명하게 전달하는 역할을 한다. 100G 광전송 장비의 라인카드에 적용함

HD-SDI	High Definition Serial Digital Interface
HO	Higher Order
HSSG	Higher Speed Study Group
IFFT	Inverse Fast-Fourier Transform
ITU	International Telecommunication Union
ITU-T	ITU-Telecommunication Standardization Sector
LAN	Local Area Network
LD	Laser Diode
LDPC	Low Density Parity Check
LO	Lower Order
LO	Local Oscillator
LPI	Low Power Idle
MAC	Media Access Control
MDIO	Management Data Input/Output
MMF	Multimode Fiber
MSA	Multi-Source Agreement
NRZ	Non-Return to Zero
ODU	Optical channel Data Unit
ODUflex	flexible ODU
ODUk	Optical channel Data Unit-k
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OH	Overhead
OIF	Optical Internetworking Forum
OMx	Optical Multimode x grade fiber
OSNR	Optical Signal to Noise Ratio
OTN	Optical Transport Network
OTU4	Optical channel Transport Unit-4
OTUk	Optical channel Transport Unit-k
PCS	Physical Coding Sublayer
PCSL	PCS Lane
PHY	Physical layer entity
PMA	Physical Medium Attachment
PMD	Physical Media Dependent (Ethernet)
PMD	Polarization Mode Dispersion (Optical)
P-OTS	Packet-Optical Transport System
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer
ROSA	Receiver Optical Sub-assembly
RS	Reed-Solomon
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SMF	Single-Mode Fiber
SONET	Synchronous Optical Network
STM	Synchronous Transport Module

TF	Task Force
TIA	Transimpedance Amplifier
TOSA	Transmitter Optical Sub-assembly
WDM	Wavelength Division Multiplexing
XLGMII	40 Gigabit Media Independent Interface

참고 문헌

- [1] IEEE Std 802.3ba – 2010, “Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications, Amendment 4: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for 40Gb/s and 100Gb/s Operation,” June 2010.
- [2] ITU-T Rec. G.709/Y.1331, “Interfaces for the Optical Transport Network(OTN),” Dec. 2009.
- [3] OIF-FD-100G-DWDM-01.0, “100G Ultra Long Haul DWDM Framework Document,” June 2009.
- [4] OIF-MSA-100GLH-EM-0.1.0, “Multisource Agreement for 100G Long-Haul DWDM Transmission Module-Electromechanical,” June 2010.
- [5] P.J. Winzer, “Advanced Modulation Formats for High-capacity Optical Transport Networks,” IEEE/OSA, J. of Lightwave Technol., 2006, pp. 4711-4728.
- [6] B.T. Teipen et al., “107Gb/s DPSK-3ASK Optical Transmission over SSMF,” OFC/NFOEC 2010, paper NMB1, 2010.
- [7] C.R.S. Fludger et al., “Digital Signal Processing: from Simulation to Silicon,” ECOC2010, paper. Tu.5.A.1, 2010.
- [8] T. Tanimura et al., “FPGA-based 112Gb/s Coherent DP-QPSK Receiver and Multi-stage PMD-PDL Emulator for Fast Evaluation of Digital Signal Processing Algorithms,” ECOC 2010, paper Tu.5.A.3, 2010.
- [9] T.J. Schmidt et al., “Field Trial of a Real-time, Single Wavelength, Coherent 100Gb/s PM-QPSK Channel Upgrade of an Installed 1800km Link,” OFC2010, paper PDPC2, 2010.
- [10] F. Fukichi et al., “112Gb/s Optical Transponder with PM-QPSK and Coherent Detection Employing Parallel FPGA based Real-time Digital

- Signal Processing, FEC, and 100GbE Interface,” ECOC2010, paper Tu.5.A.3, 2010.
- [11] A. Matiss et al., “Novel Integrated Coherent Receiver Module for 100G Serial Transmission,” OFC2010, paper PDPB3, 2010.
- [12] A. Sano et al., “69.1Tb/s(432×171Gb/s) C- and Extended L-band Transmission over 240 km Using PDM-16QAM Modulation and Digital Coherent Detection,” OFC2010, paper PDPB7, 2010.
- [13] X. Liu et al., “Transmission of a 448Gb/s Reduced Guard Interval CO-OFDM Signal with a 60GHz Optical Bandwidth over 2000km of ULAF and Five 80GHz Grid ROADMs,” OFC 2010, paper PDP2, 2010.
- [14] R. Dischler et al., “Transmission of 3×253Gb/s OFDM Super-channel over 764km Field Deployed Single Mode Fiber,” OFC2010, paper PDPD2, 2010.
- [15] ITU-T Rec. G.975.1, “Forward Error Correction for High Bit Rate DWDM Submarine Systems,” Feb. 2004.
- [16] M. Scholten et al., “Continuously-Interleaved BCH(CI-BCH) FEC Delivers Best in Class NECG for 40G and 100G Metro Applications,” OFC/NFOEC2010, paper NTuB3, 2010.
- [17] J. Justesen et al., “Error Correcting for OTN,” *IEEE Commun. Mag.*, Vol.48, No.9, Sep. 2010, pp.70-75.
- [18] K. Onohara et al., “Soft Decision FEC for 100G Transport Systems,” OFC/NFOEC2010, paper OThL1, 2010.
- [19] T. Mizuochi et al., “Experimental Demonstration Concatenated LDPC and RS Codes by FPGAs Emulation,” *IEEE Photonics Tech. Letters*, Vol.21, No.18, Sep. 2009, pp.1302-1304.
- [20] P. Lee et al., “Error Floors in LDPC Codes: Fast Simulation, Bounds and Hardware Emulation,” IEEE ISIT 2008, July 2008, pp.444-448.
- [21] F. Chang et al., “Forward Error Correction for 100G Transport Networks,” *IEEE Commun. Mag.*, Vol.48, No.3, Mar. 2010.
- [22] <http://www.ieee802.org/3/bg/index.html>
- [23] http://www.networkworld.com/news/2010/081910-brocade-readying-100g-ethernet-for.html?source=NWWNLE_nlt_datacenter_2010-08-24
- [24] http://www.morethanip.com/products_web/01_100_40Gigabit/cgmac192_256b_pb_v1.0.pdf
- [25] http://www.morethanip.com/products_web/01_100_40Gigabit/40g_100g_pcs_pb_v1.3.pdf
- [26] Altera White Paper, “Addressing 100-GbE Line-Card Design Challenges on 28-nm FPGAs,” WP-01128-1.1, July 2010.
- [27] P. Poggiolini et al., “Evaluation of the Computational Effort for Chromatic Dispersion Compensation in Coherent Optical PM-OFDM and PM-QAM Systems,” *Optics Express*, 2009, pp.1388-1403.