

40 Gb/s (16×2.5 Gb/s) WDM 신호의 10,880 km 전송실험

전상배 · 정환석 · 윤천주 · 박근주 · 정윤철*

한국과학기술원 전자전산학과 광통신연구실

☎ 305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1

신승균

테라링크 커뮤니케이션스(주)

☎ 302-828 대전광역시 서구 둔산2동 931

(2001년 12월 21일 받음, 2002년 3월 25일 수정본 받음)

본 논문은 국내에서는 처음으로 수행된 대양횡단거리의 초장거리 전송실험에 관한 것이다. 오류정정부호와 반복순환 루프 기법을 이용하여 40 Gb/s (16채널×2.5 Gb/s) WDM 신호의 10,880 km 전송실험을 성공적으로 수행하였다. 이는 태평양을 충분히 횡단할 수 있는 거리이다. 10,880 km 전송 후에도 16개 모든 채널의 비트오류률은 10^{-10} 이하로 측정되었다.

주제어 : Transoceanic transmission system, Fiber optic long-haul transmission system, Recirculating loop, Forward error correction (FEC), Wavelength-division-multiplexing (WDM).

I. 서 론

파장이 서로 다른 여러 개의 광신호들을 다중화 함으로써 광섬유 당 전송용량을 크게 증가시킬 수 있는 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 기술이 최근 해저 광전송 시스템과 같은 초장거리 광전송 시스템에서도 널리 사용되기 시작하였다. 그러나, 이와 같이 대용량 WDM 신호를 대양 횡단거리인 수천 km 이상 전송하는 경우 색분산 현상, 채널간의 비선형 현상, 광증폭기의 파장에 따른 이득차이로 인한 대역폭 감소, 광증폭기의 자연방출 광잡음이 누적되어 발생하는 광증폭기 이득포화 등으로 인하여 전송품질이 크게 저하될 수 있다.^[1] 따라서, 해저 시스템과 같은 초장거리 광전송 시스템을 개발하려면 위와 같은 여러 가지 제한 요인들을 분석하고 확인할 수 있는 초장거리 전송 실험이 필수적으로 요구된다. 그러나, 이와 같은 초장거리 광전송 실험을 선형적으로 수행하는 데에는 막대한 비용이 소요되므로 루프(loop)를 이용한 전송실험이 제안되었다.^[2,3] 그 후, 수많은 대양횡단거리의 전송 실험들이 수행되었으나, 국내에서는 아직 초장거리 전송 시스템에 대한 연구가 극히 미미한 실정이다. 본 논문에서는 국내에서는 처음으로 대양횡단거리에 해당하는 초장거리(10,880 km) 전송 실험을 수행하고 그 결과를 보고한다. 초장거리 전송에 따른 색분산 효과를 보상하기 위하여 분산보상광섬유를 사용하였으며, 채널당 입력파워의 크기와 색분산 값들을 적절히 제어함으로써 비선형 현상을 억제하였고, 수동형 이득평탄화 필터를 제작하여 사용함으로써 광증폭기의 파장별 이득불균형을 해결하였다. 또한, 오류정정부호(FEC: Forward Error Correction)를 사용하여 초장거리 전송에 따른 광신호대 잡음비의 감소

및 각종 신호의 왜곡현상을 수용할 수 있는 시스템의 마진을 확보하였다. 해저 광전송 시스템에서는 일반적으로 처리속도가 빠르고 연속 비트정정 능력이 있는 Reed-Solomon부호가 사용되고 있다.^[4,5] 본 논문에서는 이와 같은 오류정정부호와 루프실험을 이용하여 40 Gb/s (16채널×2.5 Gb/s) WDM 신호의 10,880 km 초장거리 전송실험을 성공적으로 수행하였다. 이는 태평양을 충분히 횡단할 수 있는 거리이다.

II. 전송실험 구성도

그림 1은 초장거리 전송을 위한 실험 구성도이다. 전송 시스템은 송신부, 640-km 전송 루프, 수신부, 2개의 광스위치와 3-dB 커플러 등으로 구성되어 있다. 송신부는 16개 DFB 레이저의 출력을 2.5 Gb/s(패턴길이 : $2^{11}-1$)로 변조하여 사용하였으며, 100 GHz 채널 간격으로 사용된 파장 대역은 1546.92 nm ~ 1558.98 nm이었다.

640 km 전송 루프는 8개의 80 km의 단일모드광섬유(손실: 18 dB)와 8개의 광섬유 손실 보상용 광증폭기 모듈로 구성되어 있으며, 광증폭기 모듈은 2단의 어븀 광증폭기와 색분산 및 색분산 기울기의 보상을 위한 분산보상 광섬유로 구성되었다. 구현된 광증폭기 모듈의 이득과 잡음지수는 각각 18 dB와 5 dB이었고, 각 광증폭기의 출력파워는 각각 채널당 -3 dBm과 0 dBm이었다. 또한, 신호와 다른 파장 대역에 누적되는 자연방출 광잡음을 제거하기 위하여 640-km 전송 루프 내에 대역 통과필터(통과대역: 13 nm)를 사용하였으며, 광증폭기의 이득 불균형으로 인한 파장별 광신호대 잡음비의 차이를 보상하기 위하여 640-km 전송 루프 내에 포함되어 있는 8개의 광증폭기 모듈들의 이득곡선을 보상할 수 있는 수동형 이득 평탄화 필터를 제작하여 사용하였다. 이 필터는 tapered 방식으로 제작

*E-mail: ychung@ee.kaist.ac.kr

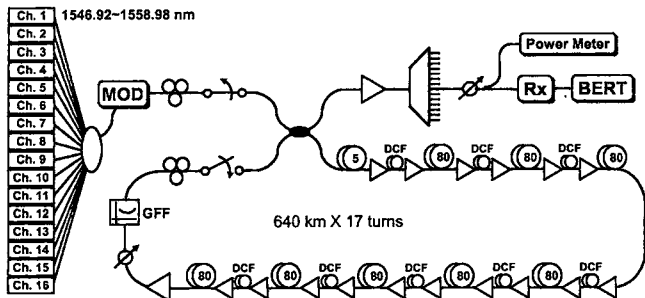


그림 1. 16채널×2.5 Gb/s WDM 신호의 10,880 km 전송실험을 위한 실험 구성도(MOD: modulator, GFF: gain flattening filter, DCF: dispersion compensating fiber).

된 광섬유 형태의 필터로써, 편광모드분산과 편광이론 손실이 각각 0.02 ps와 0.12 dB에 불과하였다. 제작된 필터를 640-km 전송 루프 내의 모든 광증폭기 모듈들을 통과한 후 마지막 단에 삽입함으로써 광증폭기 이득 불균형을 보상하였다. 이득 평탄화 필터의 사용 후에도 잔존하는 이득 불균형은 각 신호에 약 5 dB정도의 pre-emphasis를 가함으로써 극복하였다. 신호를 루프에 인가한 뒤, 인가된 신호가 루프 내에서 반복순환하도록 제어하기 위하여 2개의 광스위치와 3-dB 커플러를 사용하였다. 사용된 광스위치는 음향-광학변조기(AOM: Acousto-Optic Modulator)로써, 삽입손실은 약 4 dB이었으며 소광비는 약 40 dB이었다. 또한, 루프 제어를 위해 추가적으로 사용된 광소자들의 손실을 보상하기 위하여 루프 내에 광증폭기 1대를 추가적으로 사용하였다.

수신부는 역 다중화기의 손실을 보상하기위한 광증폭기와 역 다중화기, PIN-FET 수신기, 측정 장비 등으로 구성되었다.

III. 실험결과 및 분석

그림 2(a), (b)는 640 km 전송과 10,880 km(640 km×17 turns) 전송에 따른 채널 1번과 16번의 광섬유 누적 분산값을 보여준다. 파장이 1550 nm인 경우 한 증폭기 구간(80 km)내에 있는 단일모드 광섬유의 누적 분산과 분산 기울기는 각각 1336 ps/nm와 6.88 ps/nm²이었으며, 분산보상 광섬유는 각각 -1367 ps/nm와 -3.97 ps/nm²이었다. 그림 2(a)는 640 km 전송 후 분산기울기로 인해 발생하는 여분의 분산값이 채널 별로 -3.59~268 ps/nm 사이에 분포되어 있음을 보여준다. 그림 2(b)는 10,880 km 전송 하는 동안 변조 불안정(MI: Modulation Instability) 현상을 피하기 위하여 640 km 전송할 때마다 5-km의 단일모드 광섬유를 사용하여 누적된 분산값이 음이 되도록 조정하였음을 보여준다. 따라서, 10,880 km 전송 후 누적된 분산값은 -61~4549 ps/nm 사이에 분포되었다. 이는 2.5 Gb/s급 광신호를 전송하기 위하여 요구되는 분산허용치 내의 값이다.

그림 3(a)는 640 km 전송에 사용된 8개의 광증폭기 모듈을 통과한 후 측정된 광스펙트럼으로써, 채널간의 파워차이가 약 5 dB임을 보여준다. 그러나, 광신호가 이러한 광증폭기 모듈로 구성되어 있는 루프를 4회전하여 2560 km 전송되는 경우에는 그림 3(b)에서 보여주는 바와 같이 채널간 파워차이가 20

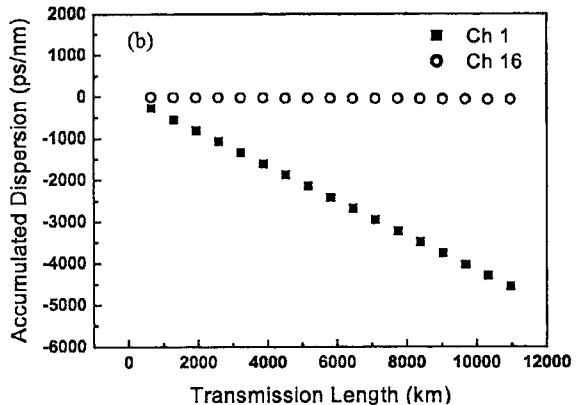
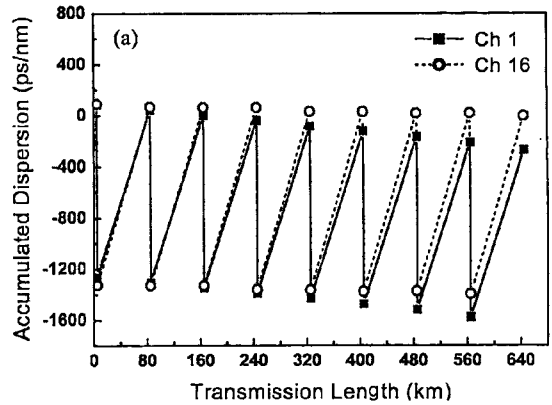


그림 2. 1번과 16번의 광섬유 누적분산. (a) 640 km 전송, (b) 10,880 km (17 turns) 전송.

dB 이상으로 증가하여 더 이상의 전송이 불가능하였다. 이와 같이 광증폭기의 파장별 이득불균형으로 인하여 발생하는 광신호대 잡음비의 차이는 초장거리 WDM 전송시스템의 성능을 제한하는 가장 중요한 요인 중 하나이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 수동형 이득평탄화 필터를 제작하여 사용함으로써 8개의 광증폭기 모듈로 구성된 전송루프의 이득곡선을 보상하였다. 그림 3(a)은 제작된 필터의 투과 특성을 함께 보여준다. 그림 3(c)는 제작된 필터를 전송루프에 삽입하고 광신호를 640 km(전송루프 1회전) 전송한 뒤 측정된 광스펙트럼으로써 모든 채널의 크기가 0.5 dB 이내로 보상되었음을 보여준다. 그러나, 이와 같이 수동형 이득평탄화 필터를 사용하여 광증폭기의 파장별 이득불균형을 보상하는 경우에도 초장거리 전송에 따라 발생하는 채널별 이득 불균형을 완벽하게 해결할 수 없으므로 그림 3(d)에서 보여주는 바와 같이 전송 전 각 채널에 약 5 dB 정도 pre-emphasis를 가하였다. 이와 같이 수동형 이득평탄화 필터와 pre-emphasis를 동시에 사용함으로써, 10,880 km 전송 후 발생하는 채널간의 이득차이를 4 dB 이내로 감소시킬 수 있었다. 그림 4는 10,880 km 전송 후 측정된 광스펙트럼을 보여준다. 10,880 km 전송 후 측정된 광신호대 잡음비는 평균 10 dB이었으며, 가장 낮은 채널의 광신호대 잡음비는 8.8 dB이었다. 이와 같이 초장거리 전송에 따라 광신호대 잡음비가 감소되어 발생하는 전송성능의 저하는 FEC코드를 사용함으로써 개선할 수 있다.

최근 대양향단용 해저 광전송 시스템에서는 처리속도가 빠

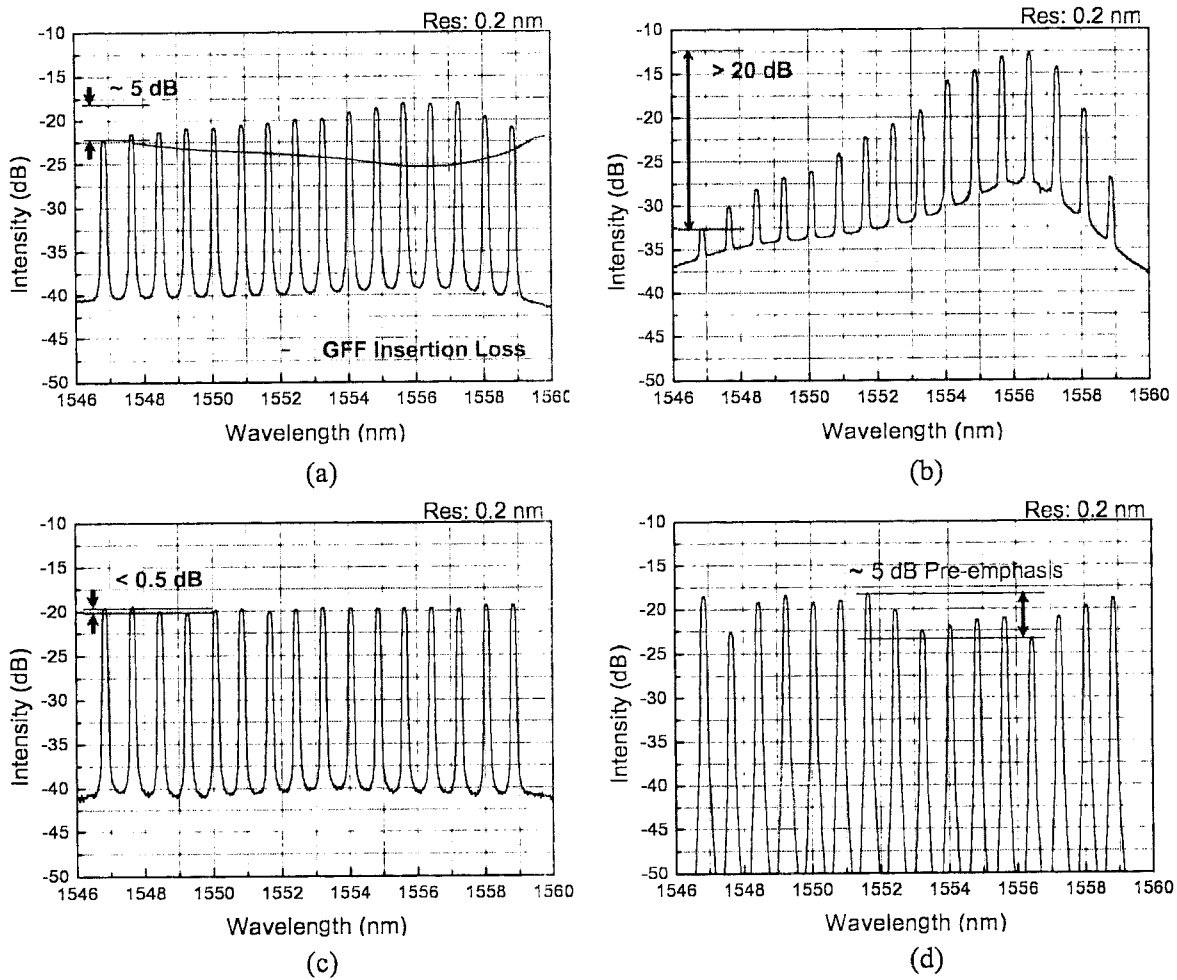


그림 3. 측정된 광스펙트럼. (a) 640 km 전송 후 광스펙트럼 과 이득평탄화 필터 통과 특성, (b) 2560 km (4 turns) 전송 후 광스펙트럼, (c) 이득평탄화 필터를 사용하여 640 km 전송 후 광스펙트럼, (d) 전송 전 pre-emphasis를 해준 광스펙트럼.

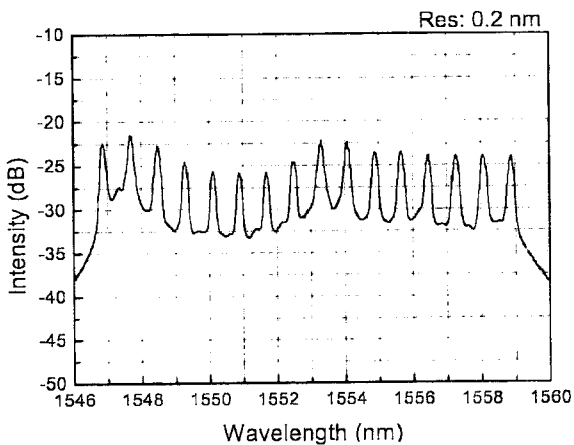


그림 4. 10,880 km 전송 후 측정된 광스펙트럼.

르고 연속에러 정정능력이 있는 (255, 239) Reed-Solomon (RS) 오류정정부호(code redundancy: 6.7%)가 널리 사용되고 있다.^{14,5)} 그러나, 본 실험에서는 overhead가 작은 (255, 241) RS 부호를 사용하였다(code redundancy: 5.9%). 이 부호의 코딩이득은 약 5 dB이다. BER이 아주 낮은 경우($<10^{-3}$)에는

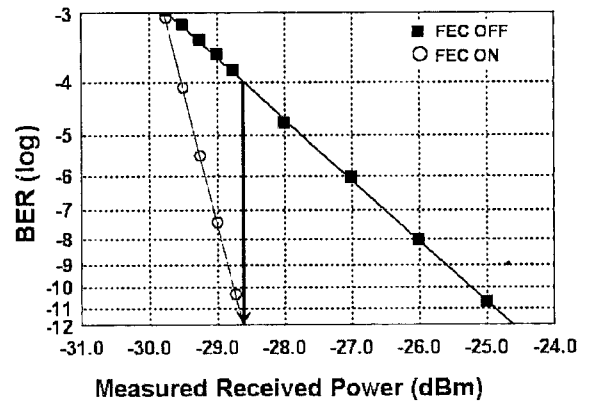


그림 5. 수신파위에 대한 FEC 성능 측정.

(255, 239) RS 부호의 성능향상능력이 (255, 241) RS 부호보다 우수하지만, BER이 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 정도인 경우 두부호의 성능향상능력은 거의 동일하다. 따라서, 본 실험에서 사용된 (255, 241) RS 부호는 실제로 시스템에서 성능향상을 기대하는 ($BER = 10^{-4} \sim 10^{-5}$) 범위에서 기존의 (255, 239) RS 부호보다 낮은 redundancy를 사용하더라도 동일한 성능향상능력을 제

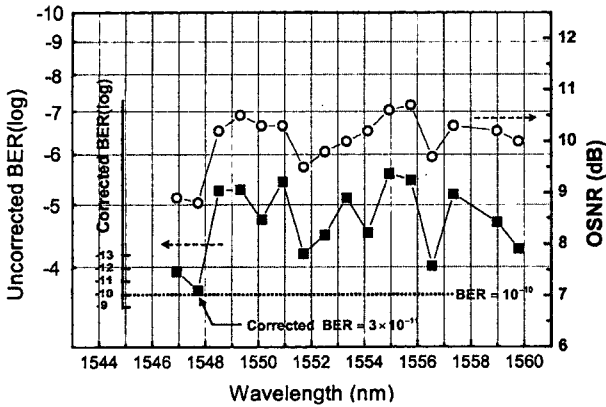


그림 6. 채널별 BER 측정결과와 광신호대 잡음비.

공한다. 그림 5는 오류정정부를 사용하지 않은 경우(○)와 사용한 경우(□) back-to-back에서 측정한 BER커브를 비교한 것이다. 이론적 계산 결과와 같이 오류정정부를 적용함으로써 10^{-4} 의 BER 이 10^{-12} 의 BER로 개선됨을 보여준다.

그림 6는 10,880 km 전송 후 측정된 채널별 BER이다. 평균 BER은 4×10^{-5} 이었으며, 광신호대 잡음비가 가장 낮은 채널 2번의 BER은 1.8×10^{-4} 로 측정되었다. 그러나, 오류정정부를 적용한 후에는 16개의 모든 채널에서 측정시간 5분 동안 에러가 발생하지 않았다. 특히, 광신호대 잡음비가 가장 나쁜 채널(채널 2번)을 20분 동안 측정하여 확인한 BER은 3×10^{-11} 이었다. 따라서, 2번 채널의 BER은 3×10^{-11} 보다 좋을 것으로 판단된다. 또한, 이러한 결과는 구현된 루프의 안정성이 매우 우수하다는 것을 입증하는 것이다. 그림 6은 10,880 km 전송 후 측정된 채널별 전송품질이 전송 후 측정된 채널별 광신호대 잡음비와 동일한 경향을 갖고있음을 보여준다. 따라서, 초장거리 전송으로 인하여 발생하는 광신호대 잡음비의 감소가 전송품질 저하의 주요 요인임을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 40 Gb/s(16 ch×2.5 Gb/s) WDM 신호를 태핑

양을 횡단할 수 있는 거리인 10,880 km 전송하고, 그 결과를 보고하였다. 이러한 초장거리 전송실험은 국내에서는 처음으로 수행된 것이다. 광신호를 640 km단일모드 광섬유와 8개의 광증폭기 모듈로 구성된 전송루프에 인가하고, 인가된 광신호가 전송루프 내에서 반복하여 순환하도록 제어함으로써 초장거리 전송실험을 수행하였다. 이러한 초장거리 전송시스템에서는 광증폭기의 극미한 파장별 이득불균형도 광신호의 전송 품질에 크게 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 수동형 이득평탄화 필터와 pre-emphasis를 사용하여 광증폭기의 파장별 이득불균형으로 인하여 발생하는 채널별 광신호대 잡음비의 차이를 보상하였다. 또한, 초장거리 전송에 따른 광신호대 잡음비의 감소와 신호를 왜곡시키는 각종 현상들로부터 시스템 마진을 확보할 수 있도록 오류정정부호(FEC: Forward Error Correction)를 사용하였다. 10,880 km 전송 후에도 16개 모든 채널의 BER은 10^{-10} 이하인 것으로 측정되었다.

참고문헌

- [1] N. S. Bergano and C. R. Davidson, "Wavelength division multiplexing in long-haul transmission systems," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 6, pp. 1299-1308, June 1996.
- [2] T. Tanifuji and M. Ikeda, "Pulse circulation measurement of transmission characteristics in long optical fiber," *Opt. Lett.* vol. 16, no. 8, Aug. 1977.
- [3] N. S. Bergano and C. R. Davidson, "Circulating loop transmission experiments for the study of long-haul transmission systems using erbium-doped fiber amplifiers," *J. Lightwave Technol.*, vol.13, no. 5, pp. 879-888, May 1995.
- [4] A. S. Omar, "FEC techniques in submarine transmission systems," *Optical Fiber Communication Conference 2001*, vol.1, pp. TuF1-1 -TuF1-3, 2001.
- [5] N. Ramanujam *et al.*, "Forward error correction (FEC) techniques in long-haul optical transmission systems," *IEEE Laser and Electro-Optic Society 2000*, vol. 2, pp. 405-406, 2000.

16×2.5 Gb/s WDM transmission over 10,880 km using forward error correction

Sang Bae Jun, Hwan Seok Chung, Chun Ju Yoon, Keun Joo Park and Yun Chur Chung[†]

Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, KOREA

[†]E-mail: ychung@ee.kaist.ac.kr

Seung Kyun Shin

Teralink Communications Inc., Daejeon 302-828, KOREA

(Receivedm December 21, 2001 ; revised manuscript received March 25, 2002)

We demonstrate 16 ch.×2.5 Gb/s WDM transmission over 10,880 km using a re-circulating loop and forward error correction (FEC) code. The performances of all 16 channels were measured to be lower than 10^{-10} .

Classification code : OC.010.