

10 Gb/s 광신호의 320 km 분산천이 광섬유 전송실험

이상수 · 한정희 · 김향균 · 류갑열 · 윤태열 · 유태환 · 송재호 · 이동호 · 박창수

한국전자통신연구원 교환전송기술연구소

이창희

한국과학기술원 전기 및 전자공학과

곽봉신 · 박문수

삼성전자주식회사

(1998년 8월 13일 받음, 1998년 12월 29일 수정본 받음)

전송용 광섬유로 320 km의 분산천이 광섬유를 사용하여 10 Gb/s 광링크를 구성하고 전송실험을 수행하였다. 광링크는 10 Gb/s 광송수신기, 광전력 증폭기, 3개의 광선로 증폭기, 광전치 증폭기 및 전송용 광섬유로 구성되었으며, 전송거리에 따른 비트 오류 특성에 대하여 조사하였다. 전송실험 결과 광선로 증폭기의 입력세기가 -18 dBm이고, 이득이 28 dB인 경우 수신기 입력단에서 측정된 광학적 신호대 잡음비는 28 dB로 나타났으며, 광섬유를 사용하지 않은 경우와 비교하여 2 dB의 전력 페널티가 발생한 것으로 나타났다. 광섬유 전송 후 발생한 2 dB의 전력 페널티는 광학적 신호대 잡음비의 열화에 의해 1 dB, 경로 페널티에 의해 1 dB가 발생하는 것으로 조사되었다.

I. 서 론

최근 급증하는 정보량을 효과적으로 수용하기 위해 전세계적으로 10 Gb/s 광전송 시스템과 같은 대용량 광전송 시스템의 상용화가 이루어지고 있으며, 또한 이를 수용하기 위한 광링크의 개발이 이루어지고 있다. 국내에서도 HAN/B-ISDN 공동연구개발사업의 일환으로 10 Gb/s 광전송 시스템의 상용화 및 이를 수용하기 위한 광링크의 개발이 진행되고 있다.

광섬유의 손실에 의해 전송거리가 제한 되던 기존의 광링크와는 달리 10 Gb/s 광링크에서는 광섬유의 색분산에 의해 전송거리가 제한된다. 그래서 송신방식이 반도체 레이저 직접변조 방식에서 처핑이 적은 외부변조 방식^[1]으로 바뀌게 되었다. 또한 장거리 전송을 위해서는 부가적으로 적절한 색분산 보상법^[2,3]을 사용하거나, 아니면 분산천이 광섬유를 사용하여야만 한다. 그리고 광전력 증폭기, 광전치 증폭기와 더불어 광선로 증폭기가 중계기로 사용 되는 등 기존의 광링크와는 큰 차이점이 있다. 광선로 증폭기는 1R(reshaping) 기능만을 갖기 때문에 이를 여러단 사용하여 장거리 전송을 하는 경우 증폭된 자연 방출광(amplified spontaneous emission, ASE) 잡음의 누적으로 인해 신호의 광학적 신호대 잡음비(optical signal to noise ratio) 특성^[4]이 나빠지게 된다. 따라서 수신기의 수신감도를 저하시키게 되어 결과적으로 전송거리가 제한된다. 그러므로 기존의 광링크 설계 시에는 송신단의 송신 광출력을 높이고, 수신기의 수신감도를 높여서 시스템 이득(=송신광출력-수신감도)을 최대로 확보하는 것이 가장 중요하였으나, 광선로 증폭기를 사용하는 광링크에서는 색분산의

영향을 최소화하는 것과 함께 신호의 광학적 신호대 잡음비를 최대로 확보하는 것이 가장 중요하다.

본 논문에서는 분산천이 광섬유를 사용한 10 Gb/s 광링크 설계 기술을 확보하기 위해 신호의 광학적 신호대 잡음비에 따른 Q값 특성을 조사하였다. 그리고 10 Gb/s 광송수신기, 광전력 증폭기, 광전치 증폭기 및 광선로 증폭기와 320 km의 분산천이 광섬유를 사용하여 광링크를 구성하여 전송실험을 수행한 결과에 대하여 기술하였다.

II. 신호의 광학적 신호대 잡음비 특성

2.1. 신호의 광학적 신호대 잡음비에 관한 이론적 고찰

현재 대부분의 광통신 시스템에서 사용되고 있는 강도변조/직접검파(intensity modulation/direct detection) 방식의 광링크에서는 전송 특성을 신호의 Q값^[5]을 사용하여 나타낼 수 있다.

이때 신호와 잡음에 대해 Gaussian 근사를 적용할 경우 Q값은 비트 오류율과 식(1)과 같은 관계를 갖는다.

$$BER = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\exp(-Q^2/2)}{Q} \quad (1)$$

따라서 비트 오류율 10^{-9} 에 해당하는 Q값은 6이며, 비트 오류율 10^{-12} 에 해당하는 Q값은 7임을 알 수 있다.^[6] 한편 Q값과 광학적 신호대 잡음비의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[7]

$$OSNR = \frac{4B_e/B_o}{[1/Q^2] - [(4kT/R)B_e(h\nu/e)^2/P_m^2]} \quad (2)$$

위 식에서 B_s 는 수신기의 전기적인 대역폭, B_o 는 광증폭기에 사용되는 광학 필터의 대역폭, k 는 볼츠만 상수, T 는 온도, R 은 수신기의 열저항, h 는 플랑크 상수, v 는 신호의 주파수, e 는 전하량, P_{in} 은 수신기 입력 세기를 각각 나타낸다. 식(2)를 이용하면 주어진 광학적 신호대 잡음비에 대해 얻을 수 있는 최대 Q값을 구할 수 있다.

한편 광증폭기를 다단으로 사용하는 경우 광학적 신호대 잡음비^[4]는 식(3)과 같이 정의된다.

$$(OSNR_{Nth})^{-1} = \sum_{j=1}^n \frac{2h v N_j^{sp} B_o}{P_j^{in}} \quad (3)$$

위 식에서 h 는 플랑크 상수, v 는 신호광의 주파수, N_j^{sp} 는 j 번째 광증폭기의 잡음인자(noise factor), B_o 는 광학필터의 대역폭, P_j^{in} 은 j 번째 광증폭기의 입력세기를 각각 나타낸다. 식(3)에 의하면 광학적 신호대 잡음비는 광증폭기의 잡음 인자와 입력세기에 따라 결정이 되며, 다단 연결이 될수록 나빠지게 된다.

2.2. 신호광의 광학적 신호대 잡음비에 따른 Q값 특성

광학적 신호대 잡음비의 변화에 대한 Q값의 변화를 알아보기 위해 그림 1과 같이 실험장치를 구성하였다. 광송신기의 출력은 3 dB 방향성 결합기를 통해 광증폭기에서 출력되는 증폭된 자연 방출광 성분과 더해진다. 이때 광감쇠기 I을 조절하여 광증폭기의 ASE출력을 조절해 주면 수신기의 입력단에서 광학적 신호대 잡음비가 변화하게 된다. 그러므로 광증폭기를 여러단 사용하지 않아도 그림 1과 같은 실험으로 신호의 광학적 신호대 잡음비에 따른 Q값의 변화를 측정할 수 있다.

이와 같은 방법으로 신호의 광학적 신호대 잡음비를 변화시킬 경우 실험적으로 얻을 수 있는 최대 Q값을 그림 2에 나타내었다. 이때 Q값은 광학적 신호대 잡음비를 변화시키면서 비트 오류를 측정 한 후 (식 1)의 관계를 이용하여 구한 것이다. 또한 식(2)를 사용하여 계산한 결과도 함께 나타내었다. 실험에서 신호의 광학적 신호대 잡음비는 광 스펙트럼 분석기의 분해능을 0.1 nm로 하여 수신기 입력단에서 측정된 신호 레벨과 ASE 레벨간의 차이로 하여 측정하였다.

그림 2에서는 수신기의 전기적인 대역폭을 5 GHz, 광학필터의 대역폭을 12 GHz로 하여 계산한 이상적인 경우의 결과와 실제 사용되는 수신기의 전기적인 대역폭인 10 GHz로 하여 계산한 결과를 실험결과와 함께 나타내었다. 이상적인 경우에는 비트 오류 1×10^{-12} 에 해당하는 Q값 7을 얻기 위해 요구되는 신호의 광학적 신호대 잡음비가 19dB이지만 수신기

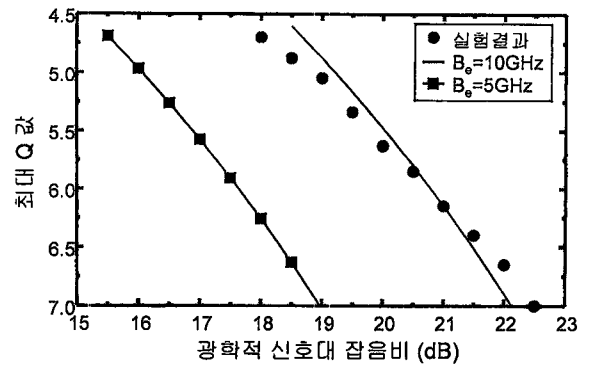


그림 2. 광학적 신호대 잡음비와 Q값과의 관계(B_s : 수신기의 전기적인 대역폭).

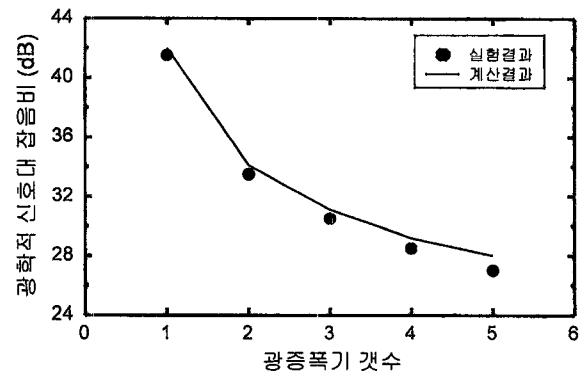


그림 3. 광증폭기 다단연결에 따른 광학적 신호대 잡음비 특성.

의 대역폭이 10 GHz로 증가함에 따라 동일한 Q값을 얻기 위해 요구되는 광학적 신호대 잡음비가 22.5 dB로 증가함을 알 수 있다. 실험결과는 수신기의 전기적인 대역폭을 10 GHz로 하여 계산한 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 일반적으로 광전송 시스템에서 요구하는 최소 비트 오류는 10^{-12} 이하이므로 광링크 설계시 수신단에서의 최소 광학적 신호대 잡음비는 22.5 dB 이상이 되어야 한다. 그렇지만 상용 시스템에 적용되기 위해서는 충분한 마진을 포함하여야 하기 때문에 광학적 신호대 잡음비는 22.5 dB 보다 훨씬 좋아야 한다.

2.3. 광증폭기의 다단 연결에 따른 광학적 신호대 잡음비 특성

광증폭기의 다단 연결에 따른 광학적 신호대 잡음비 특성을 그림 3에 나타내었다. 광증폭기를 한개(광전력 증폭기, 입력 = -6 dBm)만 사용한 경우에는 광송신기의 출력이 약 -6 dBm 정도로 높고 ASE 잡음 누적이 되지 않기 때문에 광학적 신호대 잡음비는 약 42 dB였다. 그렇지만 광증폭기 두개(광선로 증폭기, 입력 = -18 dbm)를 사용한 경우 광증폭기에서 신호광과 함께 출력된 ASE에 의한 잡음누적으로 인해 광학적 신호대 잡음비가 나빠져서 34 dB를 나타냈다. 광증폭기가 증가하면 ASE 잡음이 계속 누적되므로 광학적 신호대 잡음비는 계속 나빠져서 다섯개를 사용한 경우에는 28 dB가 되었다. 식(3)을 사용하여 계산한 광학적 신호대 잡음비는 실험결과와 거의 일치하였다.

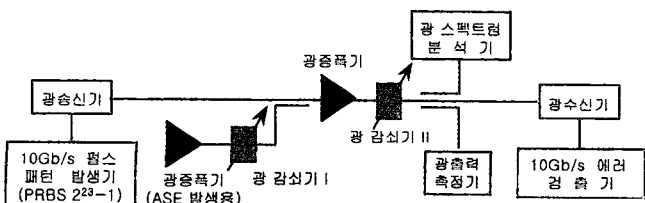


그림 1. 광학적 신호대 잡음비에 따른 Q값 측정을 위한 실험 장치 구성도.

III. 10Gb/s 광링크 구성 및 전송실험

3.1. 10Gb/s 광링크 구성

10Gb/s 광링크 구성을 위한 실험 장치의 구성은 그림 4와 같다. 광송신기는 파장이 1552.5 nm인 DFB(distributed feedback laser) 레이저와 LiNbO₃ Mach-Zehnder 간섭계형 외부변조기로 구성되어 있다. 송신 광출력은 -6 dBm, 소광비는 12 dB이며 유도 브릴루앙 산란효과에 의한 영향을 최소화하기 위한 디더링 회로가 포함되어 있다. 변조는 10Gb/s 펄스 패턴 발생기로부터 출력되는 NRZ(non return to zero) 신호 (PRBS 2²³-1)가 외부 변조기로 AC 결합되는 형태로 직접 강도변조 된다. 광전력 증폭기는 송신 광출력을 +10 dBm으로 증폭시켜서 전송로인 분산천이 광섬유 I로 입력된다. 분산천이 광섬유 I은 길이가 80 km, 손실이 약 0.25 dB/km이다. 분산천이 광섬유 I의 출력단에는 광감쇠기를 설치하여 광선로 증폭기 I에 입력되는 광의 세기를 조절할 수 있도록 하였다. 이는 실제 현장에 포설되어 있는 광섬유를 사용할 경우 예상되는 손실 수준인 0.35 dB/km를 적용하여 광선로 증폭기 입력 세기를 -18 dBm으로 하기 위함이다. 사용된 광선로 증폭기들은 광출력이 +10 dBm, 이득이 28 dB로 동작되며, 잡음지수 특성은 6 dB 수준이다. 분산천이 광섬유 II~IV 까지 동일한 방법으로 광선로 증폭기를 사용하여 손실을 주기적으로 보상해 주었다. 사용된 분산천이 광섬유의 평균 영분산 파장은 약 1561 nm이고 영분산 기울기는 평균 +0.07 ps/km·nm²이다. 이는 광섬유의 정상 분산 영역이므로 +1의 처핑 값을 갖도록 변조기에 가해지는 dc 바이어스 레벨을 조절하여 광섬유 진행 시 펄스의 압축(compression)이 일어나도록 하였다. 수신단에는 높은 수신감도를 얻기 위해 광전치 증폭기를 사용하였다. 광전치 증폭기는 소신호 입력에 대해 30 dB 이상의 이득과 6 dB 이하의 잡음지수 특성을 나타내며, 광섬유 Fabry-Perot 필터를 사용하여 ASE 잡음을 제거하도록 하였다. 광수신기는 PIN 광검출기와 HBT(heterojunction bipolar transistor) 전치증폭기, 주증폭기로 사용되는 20 GHz 광대역 증폭기, 클럭 및 데이터 추출부로 구성되어 있으며, 클럭 및 데이터 추출부에서 재생된 10 GHz 클럭과 데이터를 에러검출기로 보내 비트 오류를 측정하도록 되어 있다.

3.2. 전송실험 결과

그림 4와 같이 10 Gb/s 광링크를 구성한 후 측정한 수신감도 특성을 그림 5에 나타내었다. 광전력 증폭기, 광전치 증폭기만을 사용하고 광섬유를 사용하지 않은 경우 측정된 수신

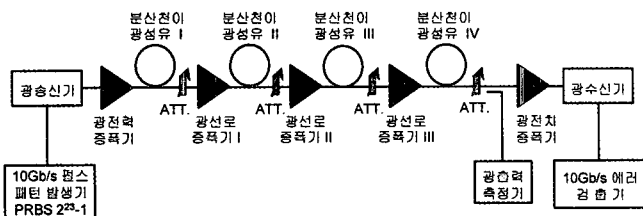


그림 4. 10 Gb/s 분산천이 광섬유 320 km 광링크 구성도(ATT. : 광감쇠기).

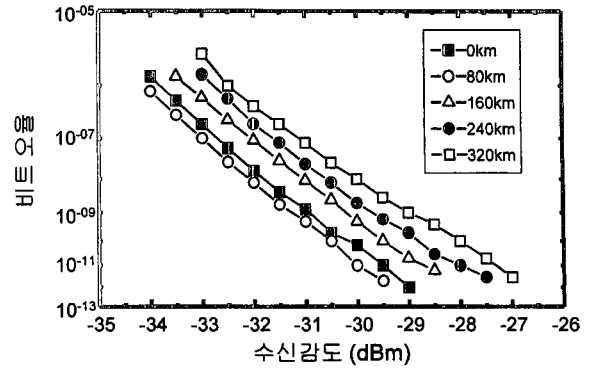


그림 5. 10 Gb/s 광링크의 수신감도 특성.

감도는 비트 오류 1×10^{-12} 에서 -29 dBm이었다. 80 km의 분산천이 광섬유를 전송한 후 측정된 수신감도는 비트 오류 1×10^{-12} 에서 -29.5 dBm으로 광섬유를 사용하지 않은 경우와 비교하여 오히려 0.5 dB가 좋았다. 이는 송신기의 처핑 계수가 +1이기 때문에 이로 인한 펄스의 압축에 기인한 것이다.

그렇지만 광선로 증폭기를 사용함에 따라 수신감도는 나빠짐을 알 수 있다. 광선로 증폭기를 하나만 사용한 경우인 160 km 전송의 경우 수신감도는 비트오류 1×10^{-12} 에서 -28.5

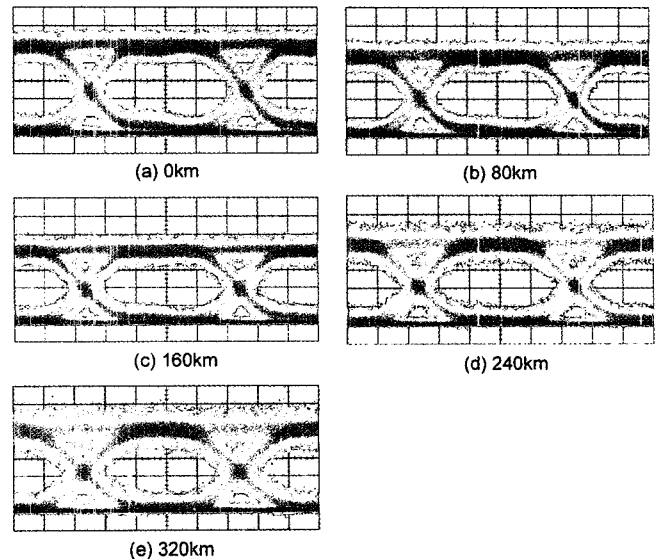


그림 6. 아이 패턴 특성(x축 : 20 ps/div., y축 : 500 μW/div.).

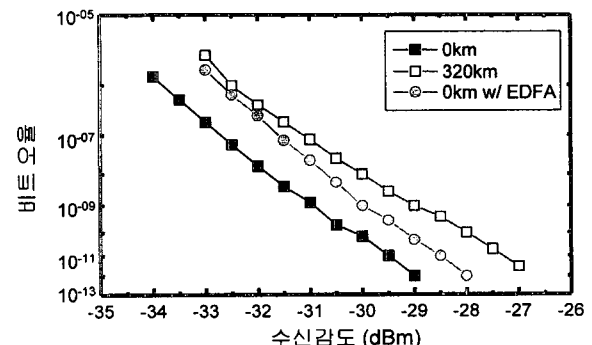


그림 7. 광섬유를 사용하지 않은 경우의 수신감도 특성.

dBm 이었으며, 240 km에서는 -27.5 dBm, 320 km 전송 후의 수신감도는 -27 dBm을 나타내었다. 그림 6에는 각 경우 수신단에서 측정된 아이 패턴(eye pattern)을 나타내었다.

한편 그림 7에는 광증폭기의 입·출력 조건은 동일하게 유지한 채 광섬유를 제거한 후 측정된 비트 오류 특성을 나타내었다. 광섬유를 사용하지 않은 경우의 수신감도는 비트 오류 1×10^{-12} 에서 -29 dBm으로 광섬유를 사용한 경우에 비해 1 dB 정도 좋았다. 따라서 본 전송 실험에서 사용된 광링크에서 발생한 2 dB의 페널티 중 광학적 신호대 잡음비에 의한 페널티가 1 dB며, 송신기의 처핑, 색분산등에 의한 효과 등 광섬유에 의해 발생된 경로 페널티가 1 dB임을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 10 Gb/s 광링크 설계 기술을 확보하기 위해 광학적 신호대 잡음비에 따른 Q값 특성을 조사하였고, 10 Gb/s 광송수신기, 광전력 증폭기, 광선로 증폭기, 광전치 증폭기 및 320 km의 분산천이 광섬유를 사용하여 광링크를 구성하고 전송실험을 수행하였다.

비트 오류 1×10^{-12} 에 해당하는 Q값 7을 얻기 위해 요구되는 광학적 신호대 잡음비는 22.5 dB로 나타났다. 그리고 광선로 증폭기의 이득을 28 dB로 하고 다섯개의 광증폭기를 거친 후 측정된 광학적 신호대 잡음비는 28 dB로 나타났다. 따라서 본 실험에서 사용된 광링크는 5.5 dB의 마진을 갖도록 하였다.

한편 320 km의 분산천이 광섬유 전송실험 결과 수신감도는 -27 dBm을 나타내었다. 이는 광섬유를 사용하지 않은 경우와 비교하여 2 dB의 페널티가 발생한 것이다. 이때 발생한 페널티는 광학적 신호대 잡음비의 열화에 의해 1 dB, 경로 페

널티에 의해 1 dB가 발생하는 것으로 조사되었다. 따라서 ITU-T 권고안 G.691에서 권고하는 1 dB 이하의 경로 페널티를 갖는 광링크를 구성할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 HAN/B-ISDN 공동연구개발사업의 일환으로 수행되었으며, 논문 작성에 많은 도움을 주신 이종현 박사과 이만섭 박사 및 전송실험 수행에 많은 도움을 주신 강우정, 김종성, 김현수, 윤주인, 이우진, 이청남 연구원께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 한정희, 윤태열, 이상수, 이창희, 대한전자공학회지, **32**, 1514 (1995).
- [2] Y. K. Park, P. D. Yeats, J.-M. P. Delavaux, O. Mizuhara, T. V. Nguyen, L. D. Tzeng, R. E. Tench, B. W. Hakki, C. D. Chen, R. J. Nuyts, and K. Ogawa, IEEE Photon. Technol. Lett., **7**, 816 (1995).
- [3] W. H. Loh, R. I. Laming, N. Robinson, A. Cavatiuti, F. Vaninetti, C. J. Anderson, M. N. Zervas, and M. J. Cole, IEEE Photon. Technol. Lett., **8**, 944 (1996).
- [4] C. D. Chen, J.-M. D. Delavaux, B. W. Hakki, O. Mizuhara, T. V. Nguyen, R. J. Nuyts, K. Ogawa, Y. K. Park, C. S. Skolnick, R. E. Tench, J. Thomas, L. D. Tzeng, and P. D. Yeats, OFC 94 Technical Digest, PD27, 1994, San Jose, U.S.A.
- [5] S. D. Personick, Bell Syst. Tech. J., **52**, 843 (1973).
- [6] Neal S. Bergano, F. W. Kerfoot and C. R. Davidson, IEEE Photon. Technol. Lett., **5**, 304 (1993).
- [7] ITU-T COM 15-31E (1997).
- [8] ITU-T Recommendation G. 691 (1997).

Transmission of 10 Gb/s optical signals over 320 km of a dispersion shifted fiber

Sang-Soo Lee, Jung-Hee Han, Hyang-Kyun Kim, Gap-Youl Lyu, Tae-Youl Yun,

Tae-Hwan Yoo, Jae-Ho Song, Dong-Ho Lee and Chang-Soo Park

Switching & Transmission Technology Lab., Electronics and Telecommunications Research Institute, Taejon 305-350, Korea

Chang-Hee Lee

Dept. of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-764, Korea

Bong-Shin Kwark, Moon-Soo Park

Samsung Electronics Co. Ltd., Suwon 440-600, Korea

(Received August 13, 1998, Revised manuscript received December 29, 1998)

We have been implemented 10 Gb/s-320 km of dispersion-shifted fiber (DSF) transmission. The optical link consists of a 10 Gb/s optical transceiver, an optical booster amplifier, 3 sets of optical in-line amplifiers, an optical preamplifier and transmission fibers. Firstly, we investigated the Q-factor characteristics in terms of optical signal to noise ratio (OSNR) of optical amplifiers. Then, we investigated bit error rate characteristics in terms of transmission distance. After transmission of 320 km of DSF, measured receiver sensitivity is -27 dBm and power penalty is 2 dB, respectively. We concluded that optical SNR degradation and path penalty gives rise to 1 dB penalty, respectively.