

초고속 광파이버 전송시스템에서 색분산에 의한 전송거리 제한에 관한 연구

(A Study on the Transmission Length Limitation by
Chromatic Dispersion in High Speed FOT's)

정은숙* · 김재평** · 정진호*** · 김영권*

(Eun-Sook Chung · Jae-Pyung Kim · Jean-Hou Jeong · Yung Kwon Kim)

요 약

장거리 초고속 단일모드 광파이버 전송 시스템에서, 색분산은 복조된 파형의 찌그러짐을 생기게 하며, 그 결과 수신된 신호 간 간섭을 일으켜 전송 시스템의 성능을 저하시킨다. 본 논문에서는 강도변조-직접검파 시스템의 색분산 제한을 위상변조에서 진폭변조로의 전환잡음의 영향을 고려함으로써 연구하였다.

파이버 색분산에 의한 위상-진폭으로의 전환잡음을 잡음전력 스펙트럼 밀도를 유도함으로써 분석하였으며 위상-진폭 전환잡음을 피하기 위한 시스템 전력손실과 레이저 선폭에 대한 요구조건을 수치해석을 통하여 구하였다.

Abstract

In single mode fiber optic transmission systems(FOT's) operated at high modulation rates over long fiber spans, chromatic dispersion can produce distortion in the demodulated waveforms, resulting in intersymbol interference(ISI) in the received signal and a reduction of transmission system performance.

In this paper, chromatic dispersion limitations for intensity modulation and direct detection (IM-DD) systems are studied by considering the effect of phase modulation to amplitude modulation (PM-AM) conversion noise.

Laser phase noise conversion to amplitude noise due to fiber chromatic dispersion is analyzed by deriving the noise power spectral density.

We first derive the noise power spectral density of the laser phase noise to intensity noise conversion. Next, also evaluate the system power penalty and the transmitter laser linewidth required to

* 건국대학교
** 대림전문대학
*** 호서대학교

avoid PM-AM conversion noise penalties in long-haul nonregenerative transmission system using an external modulator and optical amplifiers. For such system with optical amplifiers, transmission system length is limited due to fiber chromatic dispersion, even if an ideal external modulator is used.

I. 서 론

현재 $1.3\mu\text{m}$ 영역에서의 고속 광파이버 전송시스템은 전화 통화량의 증가에 대해서 뿐 아니라, 미래의 광대역 서비스를 수용하기 위하여 대륙내의 장거리 통신의 유용성에 대한 연구가 진행되고 있으며, 또한 저손실 영역인 $1.55\mu\text{m}$ 파장에서의 초고속 광파이버 통신시스템은 대륙 및 매우 긴거리를 요구하는 해저시스템과 같은 응용에 기대되어 진다.

최근 DFB-LD(Distributed FeedBack-Laser Diode)와 단일모드 파이버에 기초를 둔 $1.55\mu\text{m}$ 전송시스템에 대한 실험에 있어서 많은 진보가 이루어졌다. Er도핑 광증폭기의 출현은 주기적인 검파 및 광신호의 전기적 신호로의 재생없어도 매우 긴거리를 전송할 수 있는 광통신시스템의 가능성을 열게 하였다. 즉 파이버에서 일어나는 전력손실은 주기적으로 놓여진 직접 광증폭기에 의하여 보상할 수 있게 되었다.

그러나 이러한 시스템에서의 새로운 문제는 분산의 축적이 생기는 것이며, 레이저 다이오드의 직접광변조시 생기는 주파수 칩(Chirp)현상은 전송거리를 제한하는 중요한 요인이 된다.

기존의 단일모드 파이버에 있어서, 색분산과 관련된 레이저 다이오드의 칩현상은 500Mbps 이상의 전송시스템의 성능에 대단히 극심한 영향을 미친다. 광펄스 신호가 파이버를 통해 전파될 때 각각의 주파수 성분은 각각 다른 속도로 전파되어 그 결과, 펄스신호가 넓어지며 복조된 파형에 찌그러짐을 생기게하여 수신된 이웃신호간의 간섭(ISI : intersymbol interference)을 일으켜서 오차확률(BER : bit error rate)을 증가시킨다.

이러한 레이저 칩현상은 반도체 레이저의 직접 광변조시 캐리어 농도 변화에 따른 굴절률변화 때문에 주파수가 순간적으로 천이하는 현상이다.

이러한 문제는 해결하기 위하여 외부광변조가 필요하며 최근 주파수 칩을 제거하기 위한 목적으로 외부광변조를 이용한 전송시스템에 대한 여러 실험이 보고되어져 왔다. 그러나 이러한 외부광변조를 이용한 전송시스템에서도 여전히 주파수 칩현상과 비슷한 레이저의 선폭이 넓어지는 현상이 나타난다. 이것은 단일모드 광파이버 시스템의 전송대역을 제한하기 때문에, 외부광변조시 스펙트럼이 넓어지는 현상에 대한 본질을 규명하는 것이 무엇보다도 중요하다.

이러한 원인중의 하나는 변조기 외부에서의 반사에 의하여 레이저의 다이오드의 파장천이가 생기는데 이것은 외부에서 반사된 빛이 레이저 공진기와의 결합된 전력이 강도변조에 따라 변하기 때문이다. 이러한 종류의 칩은 광아이소레이터(isolator)와 변조기의 끝면(end-face)을 AR 코팅함으로써 줄일 수 있다. 또 다른 하나는 외부광 변조기내의 굴절을 변화에 의해서 생기는 위상변조 때문이다. 본 논문에서는 후자를 다루고 있으며 위상변조 때문에 생기는 주파수 칩과 강도변조(진폭변조) 사이의 관계를 유도한다.

광파이버 시스템에서 위상변조된 신호는 파이버내의 색분산에 의해서 영향을 받는다. 즉 위상변조파의 다양한 주파수 성분들은 수신단에 약간 다른 시간내에 도착할 것이며, 이러한 커다란 위상잡음은 파이버의 색분산 때문에 수신된 신호의 진폭섭동으로 전환되어 전송시스템은 성능을 저하시킨다.

최근 보고된 실험에 의하면 이러한 위상잡음의 진폭잡음으로의 전환은 레이저광원의 선폭이 비교적 클때 오차확률을 증가시킨다.

그러므로 본 논문에서는 위상잡음에서 진폭잡음으로의 전환에 의한 전력스펙트럼밀도를 이론적으로 구하였으며, 그로부터 시스템의 전력손실을 구하였다. 또한 주어진 오차확률에서, 위상에서 진폭으로의 전환잡음에 의한 전력손실을 피하기 위한 레이저선폭에 대한 요구

조건을 구하였다.

II. 색분산에 의한 전송시스템의 이론적 해석

DFB-LD를 사용하는 1.55 μm 영역 초고속시스템에서 레이저 다이오드의 철폍효과는 전송거리를 제한하는 중요한 요인이 된다.

DFB-LD와 기존의 단일모드 파이버에 기초를 둔 1.55 μm 전송시스템에서 파이버의 색분산과 관련된 주파수 철폍은 전송시스템 성능에 많은 영향을 미친다. 이러한 철폍영향을 극복하기 위하여 외부광변조가 고려되어 지는데 여전히 철폍현상과 비슷한 레이저 스펙트럼 선폍이 넓어지는 현상이 생긴다.

이것은 변조기내의 굴절을 변화에 의한 위상변조 때문에 생기는데 위상 변조된 광신호는 파이버 색분산에 의해서 영향을 받는다.

즉 위상변조파의 다양한 주파수성분들은 수신단에 약간 다른 시간내에 도착할 것이며, 이것은 수신된 신호의 진폭섭동을 일으켜서 복조된 파형의 찌그러짐을 생기게 하여 이웃 신호간의 간섭을 일으켜 전송시스템 성능을 저하시킨다.

그러므로 색분산에 의한 전송시스템의 제한을 위상에서 진폭잡음으로의 전환에 대한 영향을 고려함으로써 정량적으로 구한다.

2-1. 위상-진폭 전환잡음에 의한 전력

스펙트럼밀도

외부광변조된 광신호의 위상잡음이 색분산을 통하면 진폭섭동으로 전환된다. 이러한 전환잡음에 의한 전력 손실을 이론적으로 구하기 위하여 우선 위상진폭으로의 전환잡음에 대한 잡음전력 스펙트럼밀도를 구한다.

광출력 신호의 진폭섭동을 무시하면 레이저의 전계는 일정한 포락선을 갖는 파로써 기술할 수 있다.

$$E(t) = E_0 \exp[-i(\omega_0 t + \phi(t))] \quad (1)$$

여기서, E_0 : 진폭

ω_0 : 중심 각주파수

$\phi(t)$: 레이저 위상잡음

위에서 레이저 위상잡음 $\phi(t)$ 를 가우시안 랜덤과정으로 가정하고 $\phi(t)$ 를 Fourier 급수로 전개시키면, $\phi(t)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi(t) &= \sum (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t) \\ &= \sum A_n \sin(\omega_n t + \phi_n) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } a_n = 1/T \int_0^T \phi(t) \cos 2\pi n t / T dt \quad (3)$$

$$b_n = 1/T \int_0^T \phi(t) \sin 2\pi n t / T dt \quad (4)$$

$$\omega_n = 2\pi n / T \quad (5)$$

$$A_n^2 = a_n^2 + b_n^2 \quad (6)$$

$$\phi_n = \tan^{-1}(b_n / a_n) \quad (7)$$

식(2)을 식(1)에 대입시키면, 레이저의 전계는 제1종 Bessel 함수로서 전개할 수 있으며 정현파의 합으로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} E(t) = E_0 \sum_{l_1=-\infty}^{\infty} \cdots \sum_{l_n=-\infty}^{\infty} \prod_{n=1}^N J_{l_n}(A_n) \cdot \exp[-i(\omega_0 t \\ + \sum_{n=1}^N l_n(\omega_n t + \phi_n))] \end{aligned} \quad (8)$$

길이 z 를 가진 단일모드 파이버를 통해 전파된 전계는 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} E(z,t) = E_0 \exp(\alpha_F z / 2) \sum_{l_1=-\infty}^{\infty} \cdots \sum_{l_n=-\infty}^{\infty} \prod_{n=1}^N J_{l_n}(A_n) \\ \cdot \exp[-i(\omega_0 t + \sum_{n=1}^N l_n(\omega_n t + \phi_n) \\ - k(\omega_n z))] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, α_F : 파이버의 감쇄계수

$k(\omega_n)$: 각주파수 $\omega_0 + \omega_n$ 에서의 파이버의 전파상수

파이버의 전파상수 $k(\omega_n)$ 은 각주파수 ω_0 에 대하여 2차 항까지 근사적으로 전개할 수 있다.

$$k(\omega_n) = k_0 + \omega_n k' + 1/2 \omega_n^2 k'' \quad (10)$$

여기서, k_0 : 전파상수

k' : 각주파수 ω_0 에 대한 제1계도함수

k'' : 각주파수 ω_0 에 대한 제2계도함수

각주파수 ω_0 에 대한 제2계도함수 k'' 은 파이버의 색분산계수 k_d 와 다음과 같이 관련된다.[7]

$$k'' = (\lambda^2 / 2\pi c) m_d \quad (11)$$

여기서, λ : 레이저 파장

c : 빛의 속도

m_d : 분산계수

식(10)에서 주어진 전계 $E(z, t)$ 가 광전류로써 수신될 때, 검파된 광전류 $I(t)$ 는

$$I(t) = AE(t)E^*(t) = I_0 \sum_{l_1=-\infty}^{\infty} \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} J_{l_1}(A_1) J_{m_1}(A_1) \exp(-i\phi_1) \cdots \sum_{l_N=-\infty}^{\infty} \sum_{m_N=-\infty}^{\infty} J_{l_N}(A_N) J_{m_N}(A_N) \exp(-i\phi_N) \times \prod_{j=1}^N \prod_{k=1}^N \exp(-i\phi_{jk}) \quad (12)$$

여기서, A : 광신호에서 광전류로의 전환계수

$$I_0 = AE_0^2 \exp(a_r z) \quad (13)$$

$$\phi_k = (l_m - m_m) (\omega_n t + \phi_N - \omega_n k' z) - 1/2 (l_n^2 - m_n^2) \omega_n^2 k'' z \quad (14)$$

$$\phi_N = (l_1 l_k - m_1 m_k) \omega_1 \omega_k k'' z \quad (15)$$

식(12)의 n 을 0에서 N 에 대하여, $l_n - m_n$ 을 p_n 으로 치환하면 $I(t)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I(t) = I_0 \sum_{p_1=-\infty}^{\infty} \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} J_{m_1}(A_1) J_{p_1+m_1}(A_1) \exp(-i\phi'_1) \sum_{p_N=-\infty}^{\infty} \sum_{m_N=-\infty}^{\infty} J_{l_N}(A_N) J_{p_N+m_N}(A_N) \exp(-i\phi'_N) \times \prod_{j=1}^N \prod_{k=1}^N \exp(-i\phi'_{jk}) \quad (16)$$

$$\text{여기서, } \phi'_1 = p_n (\omega_n t + \phi_N - \omega_n k' z) - 1/2 (p_n^2 + m_n p_n) \omega_n^2 k'' z \quad (17)$$

$$\phi'_N = (p_1 p_k + p_1 m_k + p_k m_1) \omega_1 \omega_k k'' z \quad (18)$$

ω_n 항의 크기는 식(16)에서 $p_n = \pm 1$ 로 하고 나머지는 모두 0으로 함으로서 구할 수 있다.

식(16)에 주어진 수신된 광전류 $I(t)$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$I(t) = I_0 + \sum_{k=0}^{\infty} \delta I(\omega_k) \sin(\omega_k t + \theta_k) \quad (19)$$

식(16)에서 모든 n 에 대하여 $p_n = 0$ 으로 하면 다음 공식을 사용하여 $I(t)$ 의 직류 성분을 구할 수 있다.

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} J_k^2(A_k) = 1 \quad (20)$$

위식에서 n 을 무한대로 하였기 때문에 식(21)은 수신된 광전류에 있어서 위상에서 진폭으로의 전환잡음에 대한 연속스펙트럼을 나타낸다. 그러므로 연속스펙트럼에서의 A_n 의 기대값을 구하기 위해서는 A_n 을 레이저 전계에 있어서의 위상잡음에 대한 통계학과 관련지어야 한다.

레이저의 위상잡음 $\phi(t)$ 의 전력 스펙트럼을 Langevin 방정식에 따라서 유도해 낼 수 있다. 시간 t 동안 위상변화에 대한 제곱의 평균치 $\langle \Delta \phi^2(t) \rangle$ 는 다음과 같다.[4]

$$\langle \Delta \phi^2(t) \rangle = R / 2I (1 + \alpha^2) t \quad (22)$$

여기서, $\langle \quad \rangle$: 기대값 또는 평균값

R : 평균 자연방출율

I : 광자수

α : 레이저 선폭계수

레이저 위상잡음의 전력 스펙트럼 $R\phi(f)$ 는 식(22)를 Fourier 변환 시킴으로써 얻을 수 있다.

$$R\phi(f) = \Delta \nu / \pi f^2, 0 < f < \infty \quad (23)$$

여기서, $\Delta \nu = R(1 + \alpha^2) / 4\pi I$

식(22)에 의하면 위상의 크기 A_n 의 평균치는 위상잡음의 전력 스펙트럼과 관련지을 수 있다.

$$\lim_{T \rightarrow \infty} 1/T \langle \frac{A_n^2}{2} \rangle = R\phi(f) \quad (24)$$

그러면 위상에서 진폭으로의 전환잡음에 의한 전력 스펙트럼밀도는 다음과 같이 주어진다.

$$N(f) = \frac{1}{2} \delta I^2(f) \approx \frac{1}{2} \left(\sum_{n=0}^{\infty} 4J_n [1/f(2\Delta\nu/\pi)^{1/2}] J_{n+1} [1/f(2\Delta\nu/\pi)^{1/2}] \sin[\frac{1}{2}(2n+1)(2\pi f)^2 k^2 z] \right)^2 \quad (25)$$

2-2. 위상-진폭 전환잡음에 의한 전력손실

앞절에서 위상에서 진폭으로의 전환잡음에 의한 전력 스펙트럼밀도를 이론적으로 구하였으며, 다음은 강도변조-직접검파(IM-DD)시스템의 위상잡음에서 진폭잡음으로의 전환에 의한 시스템의 성능을 분석할 것이다.

물론 여기에서는 반도체 레이저의 직접 광변조시 생기는 주파수 칩의 영향을 최소화하기 위하여 외부광변조를 하였다.

그러나 외부광변조 후에도 주파수 칩현상과 비슷한 레이저선폭이 넓어지는 현상이 나타나는데, 이것은 변조기 내부의 굴절률 변화에 따라 레이저의 선폭이 넓어지기 때문이다.

위상잡음이 파이버의 색분산을 통하면 진폭섭동을 일으키게 되어 시스템의 성능을 저하시켜, 초고속 전송 시스템의 전송거리를 제한하는 주요인이 될 것이다. 이러한 잡음은 레이저의 선폭과 파이버의 색분산에 관계되며, 이 잡음에 의한 신호대 잡음비는 입력신호의 전력의 크기에는 무관하다. 즉 입력신호의 전력을 증가시켜도 오차확률의 개선은 없다.

광수신기에서 위상-진폭으로의 전환잡음의 전력 N_{PM-AM} 은 식(25)을 이용하여 구할 수 있다.

$$N_{PM-AM} = \{(e\eta/h\nu)MPr\}^2 \sigma_{PM-AM}^2 \int_0^{\infty} N(f) |H_T(f)|^2 df \quad (26)$$

여기서 e : 전자의 전하량

$h\nu$: 광자 에너지

η : 양자효율

M : APD의 평균 이득

$$\sigma_{PM-AM}^2 = \int_0^{\infty} N(f) |H_T(f)|^2 df \quad (27)$$

위에서의 광수신기의 전달함수 $H_T(f)$ 는 APD (Avalanch Photo Detector) 검파기로 가정하면 다음과 같다.[3]

$$H_T(f) = \begin{cases} \cos(2\pi f) \cdot \sin(\pi f) / \pi f, & 0 < f < f_0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (28)$$

여기서, f_0 : 비트율

가우시안 근사를 이용하면, 2진 디지털 시스템의 신호대 잡음비는 아래식과 같이 주어진다.[5] [6]

$$Q = (e\eta/h\nu) \cdot MPr / (\sigma_0 + \sigma_1) \quad (29)$$

여기서, σ_0^2 과 σ_1^2 은 각각 0, 1 신호를 수신했을때의 잡음전력이며 위상-진폭으로 전환잡음이 존재하면, 다음과 같이 근사적으로 주어진다.[5] [6]

$$\begin{aligned} \sigma_0^2 &= 2e(e\eta/h\nu)M^{2+x} Pr \sum_1 f_0 + \sigma_i^2 \\ \sigma_1^2 &= (e\eta/h\nu)M^{2+x} Pr (\sum_1 - I_0)f_0 + (e\eta/h\nu MPr)^2 \sigma_{PM-AM}^2 + \sigma_i^2 \end{aligned} \quad (30)$$

여기서, x : APD의 과다잡음계수

σ_i^2 : 수신기의 잡음전력

\sum_1, I_0 : Personik 변수들

신호대 잡음비 Q 는 오차확률과 다음과 같이 관계된다.

$$Pe = (1/2\pi)^{1/2} \int_0^{\infty} \exp(-x^2/2) dx \quad (31)$$

진폭섭동으로 인한 잡음 때문에 생기는 전력손실은 다음 공식과 같이 간단하게 근사화시킬 수 있는데, 이 경우 Pin 다이오드와 APD에 대한 전력손실은 아래와 같다.[1]

$$P = -5 \log(1 - Q_R^2 \sigma_{PM-AM}^2) \quad [\text{dB}] : \text{Pin 검파기}$$

$$P = -5(2 + X)/(1 + X) \cdot \log(1 - Q_R^2 \sigma_{PM-AM}^2) \quad [\text{dB}] : \text{APD 검파기} \quad (32)$$

여기서, Q_R^2 : 주어진 오차확률에 대한 신호대 잡음비

III. 수치해석 및 결과 고찰

3-1. 잡음전력 스펙트럼밀도

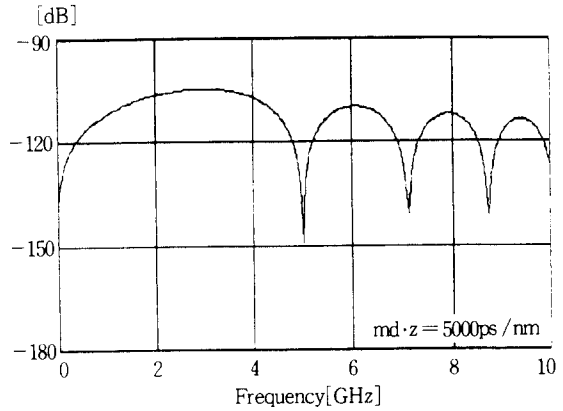
위상-진폭으로의 전환잡음에 의한 전력 스펙트럼밀도를 식(25)에 의하여 300MHz의 레이저선폭에 대하여 구하였다.

$$N(f) = \frac{1}{2} \delta I^2(f) \approx \frac{1}{2} \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} 4J_n^2 \left[\frac{1}{f} (2\Delta\nu/\pi)^{1/2} \right] J_{n+1}^2 \left[\frac{1}{f} (2\Delta\nu/\pi)^{1/2} \right] \cdot \sin^2 \left[\frac{1}{2} (2n+1) (2\pi f)^{1/2} k' z \right] \right\}^2$$

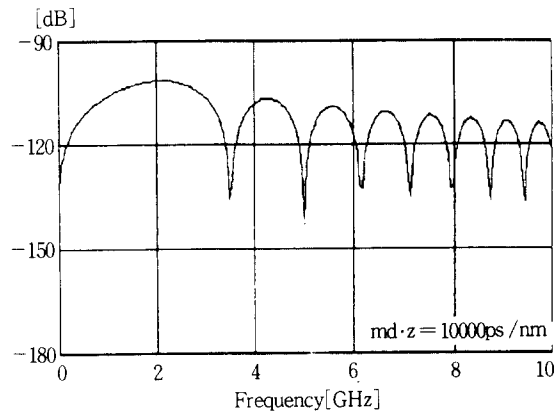
[그림 1]은 파이버 색분산 5,000ps/nm에서 40,000ps/nm에 대한 위상-진폭으로의 전환잡음에 대한 전력 스펙트럼밀도를 나타낸다. 여기서 레이저선폭은 300MHz이다.

[그림 2]는 300Km와 560Km의 단일모드 파이버를 통과한 후 DFB 레이저 다이오드의 위상잡음 때문에 생긴 수신된 신호의 진폭잡음의 측정치를 나타낸 것이다. [15] 이 DFB 레이저 다이오드의 광원은 1.55 μ m, 레이저 선폭은 300MHz이며, 파이버의 색분산은 17.3ps/km.nm이다.

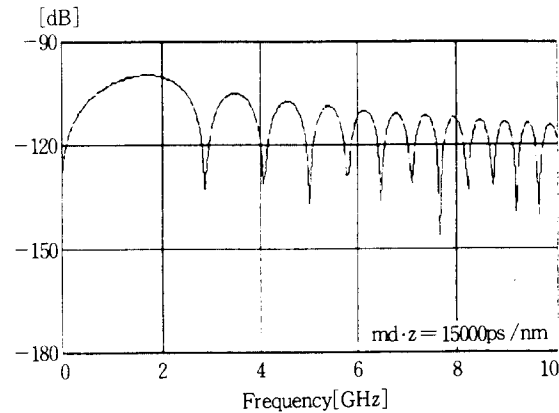
기저대역 스펙트럼은 22GHz의 대역폭을 가진 Pin 다이오드를 이용하여 측정된 것이며, 잡음전력 스펙트럼밀도에 있어서 색분산량은 각각 5,190과 9,688ps/nm이다.



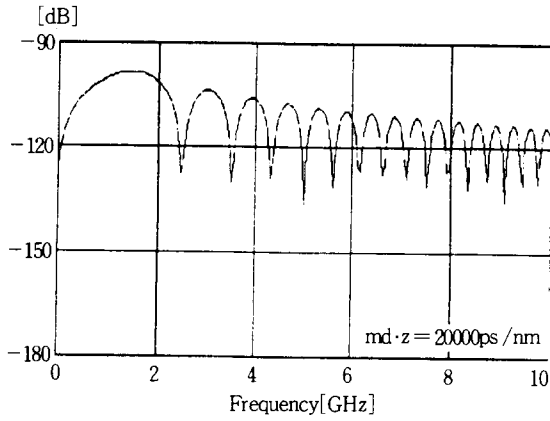
(a) $\Delta\nu = 300\text{MHz}$, $m_d \cdot z = 5,000\text{ps/nm}$



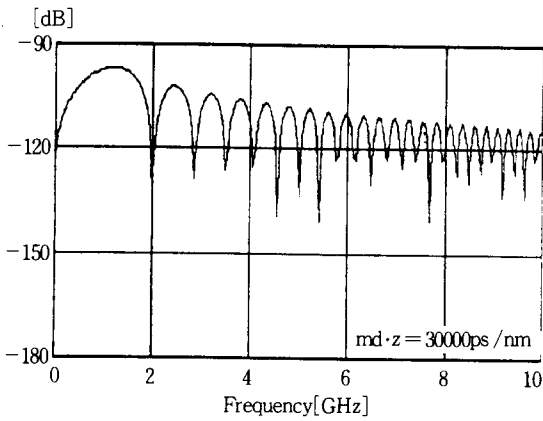
(b) $\Delta\nu = 300\text{MHz}$, $m_d \cdot z = 10,000\text{ps/nm}$



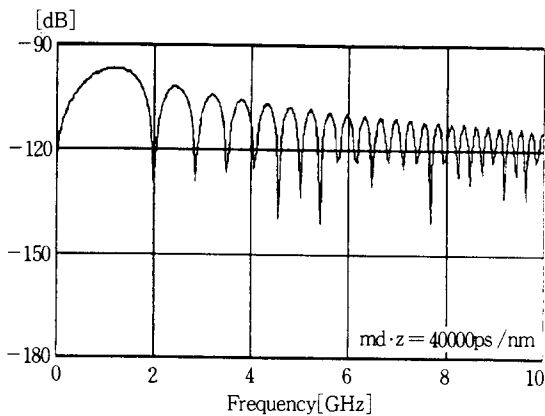
(c) $\Delta\nu = 300\text{MHz}$, $m_d \cdot z = 15,000\text{ps/nm}$



(d) $\Delta v = 300\text{MHz}$, $m_d \cdot z = 20,000\text{ps/nm}$



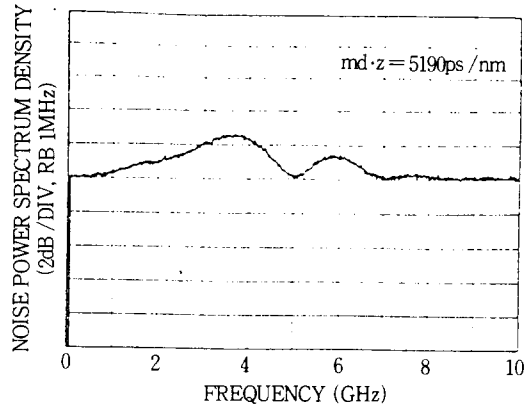
(e) $\Delta v = 300\text{MHz}$, $m_d \cdot z = 30,000\text{ps/nm}$



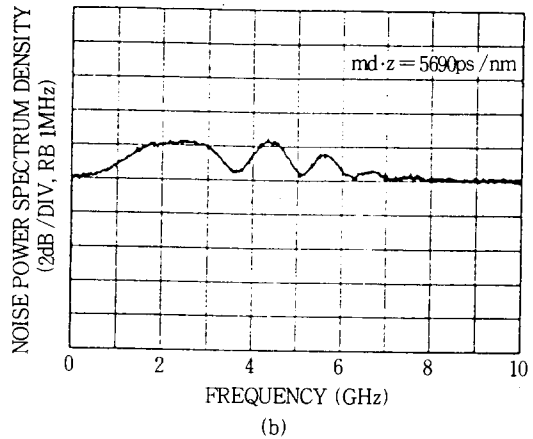
(f) $\Delta v = 300\text{MHz}$, $m_d \cdot z = 40,000\text{ps/nm}$

[그림 1] 위상-진폭 전환잡음에 의한 잡음전력 스펙트럼밀도

[Fig. 1] Noise power spectral density



(a) $\Delta v = 300\text{MHz}$, $m_d \cdot z = 5,190\text{ps/nm}$



(b) $\Delta v = 300\text{MHz}$, $m_d \cdot z = 9,688\text{ps/nm}$

[그림 2] 수신된 광전류의 진폭잡음의 기저대역 스펙트럼 [15]

[Fig. 2] Baseband spectrum of amplitude noise in receiver

[그림 1]과 [그림 2]를 비교해 볼 때, 주파수가 $f_0 = (1/2\pi k^2 z)^{1/2}$ 에서 스펙트럼의 첫번째 사이드로브의 위치가 일치함을 알 수 있고, [그림 1]에서 첫번째 사이드로브의 위치는 색분산이 증가함에 따라 증가하며 주파수 간격은 감소하는 것을 알 수 있다.

대역 제한된 광수신기에 대한 위상-진폭으로의 전

환잡음은 파이버의 색분산이 증가함에 따라 급격히 증가하게 될 것이다.

그러므로 특히, 넓은 수신대역을 요구하는 초고속 광파이버 시스템에서 위상-진폭으로의 전환잡음에 의한 영향은 매우 중요하다.

3-2. 비트율에 대한 잡음전력

앞 절에서 위상-진폭으로의 전환잡음에 의한 스펙트럼밀도를 구하였으며 이 절에서는 강도변조-직접검파 시스템에 있어 위상-진폭잡음에 의한 전력손실을 구함으로써 시스템의 성능을 분석할 것이다.

왜냐하면 주어진 오차확률 범위내에서 광파이버 통신시스템의 성능을 분석하는데 있어, 전력손실의 형태로 알아보는 것이 편리하기 때문이다.

여기서는 외부광변조를 하였기 때문에 레이저 다이오드는 연속발진으로 동작하여 주파수 칩의 영향을 최소화할 수 있으므로, 외부광변조시 생기는 위상잡음이

파이버내의 색분산을 통합으로써 전환되는 진폭잡음이 전송시스템의 성능을 저하시키는 주요인이 된다.

광수신기에 있어서의 위상-진폭 전환잡음전력 N_{PM-AM} 은 식(26)을 이용하여 구하였으며, 식(27)에서 색분산 $10,000\text{ps/nm}$ 에 대하여 비트율의 함수로서 잡음 전력 σ_{PM-AM}^2 을 구하였다.[그림 3]

$$N_{PM-AM} = \{(e\eta/h\nu) \cdot MPr\}^2 \sigma_{PM-AM}^2$$

$$\{(e\eta/h\nu) \cdot MPr\}^2 \int_0^\infty N(f) |H_T(f)|^2 df \quad (26)$$

$$\sigma_{PM-AM}^2 = \int_0^\infty N(f) |H_T(f)|^2 df$$

잡음전력밀도에서 예상했듯이 [그림 3]에 의하면 초고속 전송시스템에서는 잡음전력이 비트율이 증가함에 따라 증가하나 10Gb/s 이상에서는 잡음전력의 포화현상이 나타난다. 그 이유는 레이저의 주파수 칩이 파이버내의 부(negative)의 색분산을 통하면 펄스의 압축을 일으키기 때문이라고 생각되어진다.

3-3. 색분산에 의한 전력손실

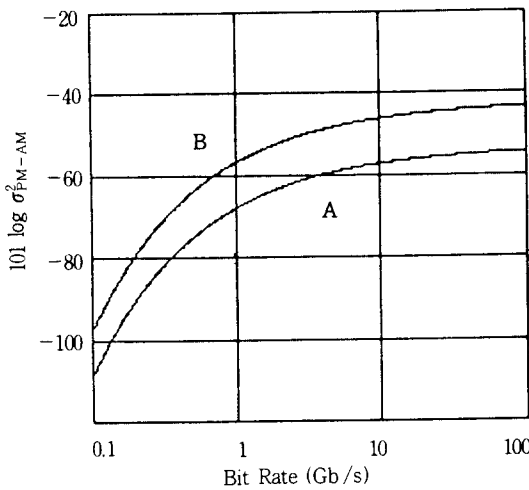
가우시안 근사를 이용한 전송시스템의 신호대 잡음비 Q값과 관련시킨 오차확률 P_e 는 식(31)이다.

위의 식을 이용하여 10^{-9} 의 오차확률을 갖는 시스템의 전력손실을 여러개의 레이저선폭(100MHz, 200MHz)에 대하여 색분산의 함수로서 구하였다.

Pin 다이오드에 대하여도 식(31)에서 $M = 1$ 로 하여 APD와 유사하게 잡음전력손실을 구할 수 있다.

[그림 4]는 기존의 단일모드 파이버와 직접 광증폭기를 가진 2.4Gb/s의 전송시스템에서 오차확률 10^{-9} 에 대한 잡음전력손실을 나타낸다. 송신기의 레이저는 외부광변조에 의해 선폭이 100MHz에서 200MHz를 가진 DFB 레이저 다이오드이며, 광수신기로는 APD를 가정하여 구하였다. 그리고 참고로 이론치(실선)와 비교하기 위하여 실험치(점선)를 같이 표시하였다.[14]

[그림 4]에서 보여진 바와 같이 측정된 전력손실은 색분산이 8,600ps/nm에서 급격하게 증가하지만, 이론치는 색분산에 대하여 점차적으로 증가하고 있다. 즉 레이저선폭이 100MHz에 대해서는 [그림 4.a] 이론치



A : $\Delta\nu = 100\text{MHz}$, B : $\Delta\nu = 200\text{MHz}$

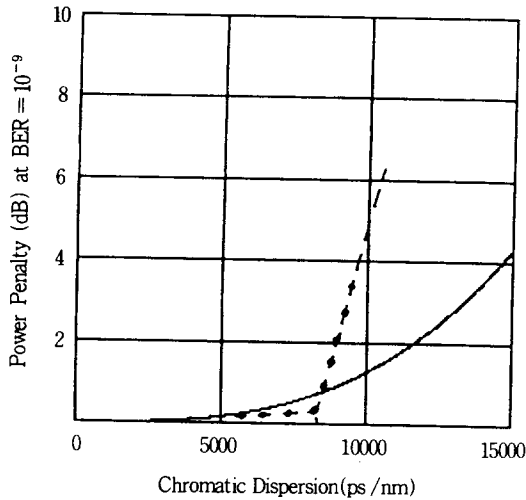
$$m_d \cdot z = 10,000\text{ps/nm}$$

[그림 3] 비트율의 함수로서 위상-진폭 전환잡음에 의한 전력

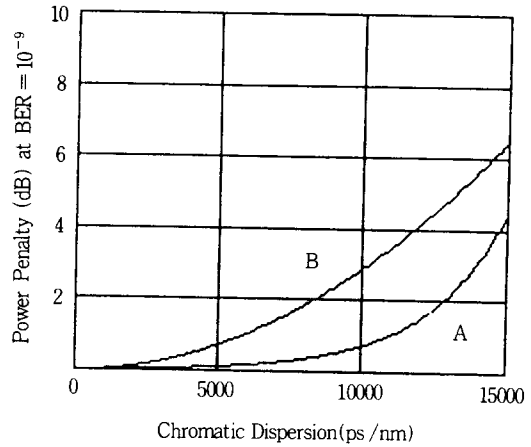
[Fig. 3] Noise power due to PM-AM conversion noise over bit rates

가 측정치에 비해서 많이 벗어나 있지만 200MHz에 대해서는 [그림 4.b] 어느정도 실험치에 근사적으로 일치함을 보이고 있다.

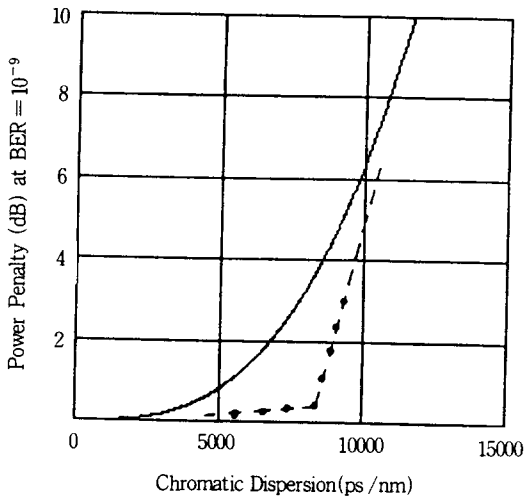
그러므로 색분산에 의한 레이저 위상잡음에 의해서 생기는 진폭잡음이 전송시스템에 미치는 영향을 측정하는 것은 매우 유용하다.



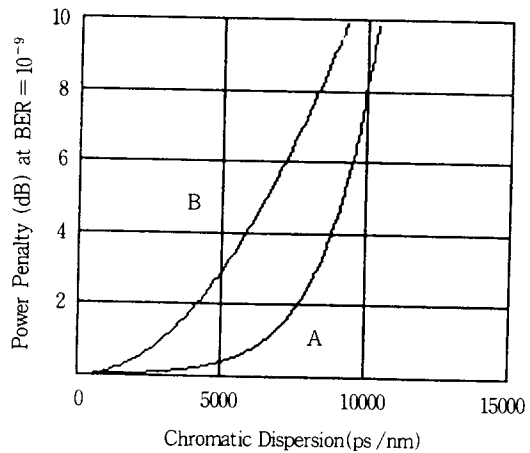
(a) $\Delta \nu = 100\text{MHz}$



(a) $\Delta \nu = 100\text{MHz}$



(b) $\Delta \nu = 200\text{MHz}$



(b) $\Delta \nu = 200\text{MHz}$

A : 이론치, B : 근사치[1]

[그림 4] 색분산 함수에 대한 전력손실

(오차확률 10^{-9} , APD다이오드, 2.4Gb/s, : 실험치[14])

[Fig. 4] Power penalty over chromatic dispersion

[그림 5] 색분산 함수에 대한 전력손실

(오차확률 10^{-9} , Pin 다이오드, 2.4Gb/s)

[Fig. 5] Power penalty over chromatic dispersion

진폭잡음에 의해서 생기는 전력손실은 역시 간단화시킨 공식에 의해서도 근사적으로 구할 수 있는데 이러한 경우, Pin 다이오드와 APD에 대한 전력손실은 식 (32)과 같이 구할 수 있다.[1] 여기서 전력손실은 dB 단위이다.

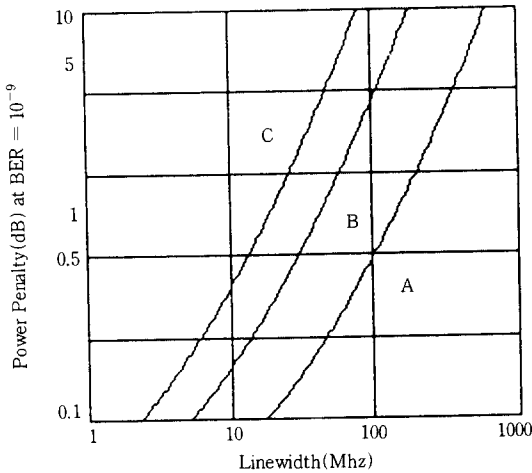
[그림 5]는 10^{-9} 의 오차확률에서 전력손실을 색분산의 함수로써 정확하게 이론치를 이용하여 구한 것과 식

(32)을 이용하여 위상-진폭 전환잡음에 의한 전력손실을 근사적으로 구한 것이다. 여기서 수신기는 Pin 다이오드, 라인비트율은 2.4Gb/s, 레이저선폭은 각각 100MHz와 200MHz이다.

3-4. 레이저선폭에 대한 전력손실

라인비트율이 2.4Gb/s인 전송시스템에서 요구되어지는 레이저선폭을 측정하기 위하여 [그림 6]에서처럼 여러가지 색분산량(5,000, 10,000, 15,000ps/nm)에 대해 주어진 오차확률 10^{-9} 에서 전력손실을 구하였다.

[그림 6]의 결과에 의하면 색분산량이 10,000ps/nm 이상인 경우, 전력손실을 1dB이하로 하기 위해서는 레이저선폭을 수십 MHz이하로 제한시켜야 할 것이다. 물론 이것은 레이저로 광의 외부 반사효과를 충분히 최소화 시키기만 하면 기존의 DFB 레이저 다이오드에서 레이저선폭을 수십 MHz 이하로 만들기는 어렵지 않다고 보고되어 있다.[3] [4]



- A: $m_d \cdot z = 5,000 \text{ps/nm}$
- B: $m_d \cdot z = 10,000 \text{ps/nm}$
- C: $m_d \cdot z = 15,000 \text{ps/nm}$

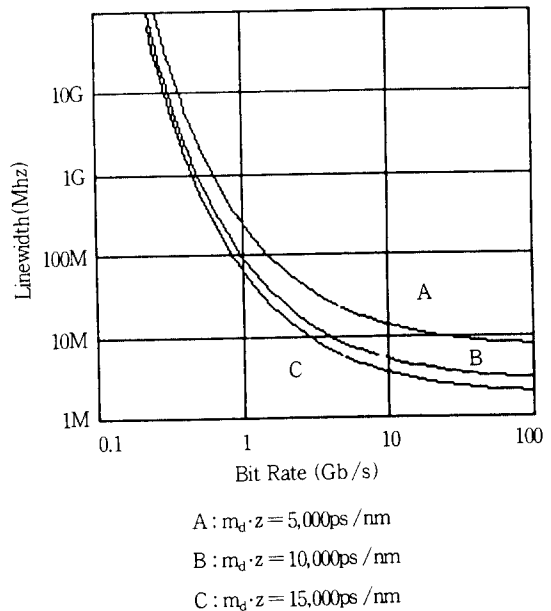
[그림 6] 레이저선폭에 대한 전력손실
(오차확률 10^{-9} , Pin 다이오드, 2.4Gb/s)

[Fig. 6] Power penalty over laser linewidth

3-5. 비트율에 대한 레이저선폭

오차확률 10^{-9} 에서 시스템 전력손실을 1dB이하로 유지하기 위해서 요구되어지는 레이저선폭을 여러개의 색분산량에 대해 비트율의 함수로써 [그림 8]에 구하였다. 비트율이 증가함에 따라 레이저의 선폭이 점점 작아지지만 [그림 3]에서 보여진 바와 같이 높은 비트율 영역에서는 잡음전력의 포화가 이루어지기 때문에 비트율이 10Gb/s 이상에서는 레이저선폭에 대한 요구조건은 같다.

이러한 비트율의 함수로써 레이저선폭에 대한 분석은 미래의 초고속, 강도변조-직접검파 광파이버 통신 시스템에서 요구되는 레이저선폭을 측정되는데 매우 유용하다고 기대되어진다.



- A: $m_d \cdot z = 5,000 \text{ps/nm}$
- B: $m_d \cdot z = 10,000 \text{ps/nm}$
- C: $m_d \cdot z = 15,000 \text{ps/nm}$

[그림 7] 비트율에 대한 레이저선폭
(오차확률 10^{-9} , Pin 다이오드, 2.4Gb/s)

[Fig. 7] Laser linewidth over bit rates

IV. 결 론

초고속 광파이버 전송시스템에서 파이버의 분산에

의한 레이저의 위상잡음에 의해 진폭에 생기는 잡음전력밀도를 정량적으로 구하였으며, 이 공식으로부터 시스템 전력손실을 여러가지 함수에 대하여 구하였다.

- (1) 비트율의 함수로서의 잡음전력 : 비트율이 증가함에 따라 잡음전력이 증가하나 10Gb/s 이상에서는 잡음전력의 포화현상이 일어난다. 이것은 아마도 레이저 주파수 첩이 파이버의 색분산을 통하면 펄스의 찌그러짐 보다는 압축을 일으키므로 이것에 의해서 잡음전력이 더 이상 증가하지 않는 것으로 생각되어진다.
- (2) 색분산에 의한 전력손실 : 실험치는 색분산량이 8600ps/nm에서 급격하게 증가하나 이론치는 색분산량에 대해 점차로 증가함을 보인다. 100MHz의 레이저선폭에서 보다는, 200MHz의 레이저선폭에서 실험치에 더 가까우며 200MHz인 경우 파이버의 색분산이 8600ps/nm 이상에서는 전력손실이 매우 심하다.
- (3) 레이저선폭의 함수로서의 전력손실 : 2.4Gb/s 전송시스템에서 요구되어지는 레이저선폭을 오차확률 10^{-9} 에서 측정된 결과 색분산량이 10,000ps/nm 이상인 경우, 전력손실을 1dB 이하로 제한하기 위해서는 레이저선폭을 수십 MHz 이하로 제한시켜야 한다.
- (4) 레이저선폭에 대한 요구조건 : 비트율에 대하여 레이저선폭을 구한 결과, 전력손실을 1dB 이하로 하기 위해서는 레이저선폭을 100MHz 정도로 유지해야하며 [그림 3]에서와 같이 높은 비트율 영역에서는 잡음전력의 포화가 이루어지기 때문에 10Gb/s에서의 레이저선폭의 요구조건은 같다.

이론적인 잡음전력밀도를 이용하여 직접 광증폭기를 가진 강도변조-직접검파 시스템에서의 위상-진폭으로의 전환잡음에 대한 시스템 성능을 여러가지 함수에 대하여 이론적으로 구하여 실험치와 비교한 결과, 이 이론은 외부광변조를 이용한 초고속 시스템의 성능을 제한하는 중요한 인자가 됨을 알 수 있다.

초고속 전송시스템의 중계거리를 제한하는 주요인은 파이버의 색분산에 의한 것이다. 앞으로 이러한 색분산을

줄일 수 있는 보상방법에 대한 연구가 활발히 진행되어야 할 것으로 사료되며, 파이버의 색분산을 1ps/nm·km 이내로 줄일수만 있다면 전송거리를 10,000km 이상까지 증가시키는 것이 가능할 것이다.

참 고 문 헌

1. S.Yamamoto, M.Kuwzuru, H.Wakabayashi, and Y.Iwamoto, "Analysis of Chirp Power Penalty in 1.55 μ m DFB-LD High Speed Optical Fiber Transmission systems," J.Lightwave Technol., vol. LT-5, no.10, pp.1518-1514, 1987.
2. A.R.Chraplyvy, R.W.Tkach, L.L.Buhl, and R.C Alferness, "Phase Modulation to Amplitude Modulation Conversion of CW Laser Light in Optical Fibers." Electron Lett., vol.22, pp.409-411, 1986.
3. C.H.Henry, "Theory of The Linewidth of Semiconductor Lasers," IEEE Quantum Electron., vol. QE-18, no.2, pp.259-264, 1982.
4. M.Lax, "Classical Noise IV. Langevin Methods," Rev.Mod.Phys., vol.38, pp.541-566, 1966.
5. Y.Okano, K.Nakagawa, and T.Ito, "Laser Mode Partition Noise Evaluation for Optical fiber Transmission," IEEE Trans, Commun., vol. COM-28, no.2, pp.238-243, 1980.
6. K.Ogawa, "Analysis of Mode Partition Noise in Laser Transmission Systems," IEEE J.Quantum Electron, vol..QE-18, no.5, pp.849-855, 1982.
7. A.F.Elrefaie, R.E.Wagner, D.A.Atlas, and D.G. Daut, "Chromatic Dispersion Limitations in Coherent Lightwave Transmission Systems," J. Lightwave Technol., vol.6, no.5, pp.704-709, 1988.
8. S.K.Korotky, A.H.Gnauck, B.L.Kasper, and J.C. Campbell, "8-Gbit/s Transmission Experiment over 68Km of Optical Fiber using a Ti:LiNbO₃ External Modulator," J.Lightwave Technol., LT-5, no.10, pp1505-1509, 1987.
9. F.Koyama and K.Iga, "Frequency Chirping in

- External Modulators," *J.Lightwave Technol.*, vol.6, no.1, pp.87-93, 1988.
10. T.L.Koch and J.E.Bowers, "Nature of Wavelength Chirping in Directly Modulated Semiconductor Lasers," *Electron Lett.*, vol.20, pp.1038-1040, 1984.
 11. C.H.Henry, R.A.Logan, and K.A.Bertness, "Spectral Dependence of the Change in Refractive Index due to Carrier Injection in GaAs Lasers," *J. Appl.Phys.*, vol.52, pp.4451-4461, 1981.
 12. S.Fujita, I.Takano, N.Henmi, S.Shikada, I.Mito, K.Taguchi, and K.Minemura, "4/Gbit/s Long-Span Transmission Experiments Employing High-Speed DFB-LD's and InGaAs-APD's," in *Tech. Dig. ECOC '86 (Barcelona, Spain)*, pp.507-510, Sept.1986.
 13. R.A.Linke, "Transient Chirping in Single Frequency Lasers : Lightwave Systems Consequences," *Electron Lett.*, vol.20, pp.427-474.
 14. S.Machida, J.Yamada, T.Mukai, Y.Horikoshi, Tsuchiya, and T.Niya, "1.5 μ m Optical Transmission Experiment using Very Low Loss Single-mode Fibers," *Electron.Lett.*, vol.15, pp.219-221, 1977.
 15. T.Ito et al., "Intensity Fluctuations in each Longitudinal of a Multimode AlGaAs Laser," *IEEE Quantum Electron.*, vol.QE-13, pp.574-579, 1977.
 16. O.Hirota, and Y.Suematsu, "Noise Properties of Injection Lasers due to Reflected Waves," *IEEE J.Quantum electron.*, vol.QE-15, pp.142-149, 1979.
 17. M.W.Fleming and A.Mooradian, "Fundamental Line Broadening of Single-mode (GaAl) As Diode Lasers," *Appl. phys. Lett.*, vol.38, pp.511-515, 1981.
 18. M.W.Fleming and A.Mooradian, "Spectral Characteristics of External-Cavity Controlled Semiconductor Lasers," *IEEE J.Quantum Electron.*, vol.QE-17, pp.44-57, 1981.
 19. C.H.Henry, R.A.Logan and K.A.Bertness, "Spectral Dependence of the Change in Refractive Index due to Carrier Injection in GaAs Lasers," *J.Appl.Phys.*, vol.52, pp.4451-4461, 1981.
 20. F.Koyama and K.Jga, "Frequency Chirping of External Modulator and its Reduction," *Lett.*, vol.21, pp.1065-1066, 1986.