

# 마하-젠더 광 변조기와 EDFA를 사용한 아날로그 광통신 링크의 랜덤 지터 특성

## Characteristics of Random Jitter in Analog Fiber-Optic Links Employing a Mach-Zehnder Modulator and an EDFA

Young-Min Yoon\*, Min-Young Lee\*, Jong-Dug Shin\*\*, Boo-Gyoun Kim\*  
윤영민\*, 이민영\*, 신종덕\*\*, 김부균\*

### Abstract

We investigate the characteristics of RJ (random jitter) in an analog fiber-optic link employing a MZM (Mach-Zehnder modulator) and an EDFA (Erbium-doped fiber amplifier). RJ has been measured using two methods, one of which derived from the noise spectrum of a RF spectrum analyzer and the other from the histogram data of a sampling oscilloscope. If the optical power and/or the RF power input to the MZM increase, RJ decreases due to the output signal power increase. For the optical link without EDFA, the minimum RJ is about 1 ps at an RF power of 10 dBm and an optical power of 8 dBm measured using the noise spectrum method. For the optical link with an EDFA, RJ decreases toward a jitter floor as the EDFA gain increases. If the gain increases further, it has been observed that RJ increases from the minimum. If the EDFA gain is fixed, RJ is smaller for the case of larger optical input power. As the EDFA gain increases, RJ reduction rate becomes greater for the case of lower optical input power.

### 요약

마하-젠더 광 변조기(Mach-Zehnder modulator; MZM)와 EDFA(erbium-doped fiber amplifier)를 사용한 아날로그 광통신 링크의 랜덤 지터(Random Jitter; RJ) 특성에 관하여 연구하였다. RF 주파수 분석기의 잡음 스펙트럼 데이터를 이용한 지터 측정법과 샘플링 오실로스코프의 히스토그램 데이터를 이용한 지터 측정법의 두 가지 방법으로 RJ를 구하였다. MZM에 인가되는 광 파워나 RF 파워가 증가하면 출력 신호 파워가 증가하여 RJ가 감소하였다. EDFA가 삽입되지 않은 링크에서 잡음 스펙트럼으로 측정된 최소 RJ는 RF 파워 10 dBm, 광 파워 8 dBm인 경우에 약 1 ps으로 나타났다. EDFA를 삽입한 링크에서는 EDFA 이득이 증가하면 RJ가 지속적으로 감소하여 지터 바닥에 수렴하였다. 이 보다 이득이 증가하면 다시 RJ가 증가하는 것을 관찰하였다. EDFA의 이득이 동일하면, 입력 광 파워가 클 때 RJ의 크기가 보다 작았고, 또한 입력 광 파워가 작은 경우에는 EDFA 이득이 증가함에 따라 RJ의 감소율이 보다 크게 나타났다.

*Key words : Microwave photonics, Erbium-doped fiber amplifier, Mach-Zehnder modulator, Jitter*

\* 崇實大學校 情報通信電子工學部

(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

★ 교신저자 (Corresponding author)

※ 감사의 글 (Acknowledgment)

이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국 과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2006-000-11342-0)

接受日:2009年 11月 17日, 修正完了日: 2009年 12月 24日

## 1. 서론

마하-젠더 광 변조기 (Mach-Zehnder modulator; MZM)와 EDFA (erbium-doped fiber amplifier)

를 사용한 광통신 링크는 기존의 마이크로웨이브 소자들로 구성된 통신 링크의 한계를 극복하고자 ROF (Radio-Over-Fiber) 시스템 [1], 레이더 시스템 원격 제어 [2], 위상배열 안테나를 위한 광 빔성형망 [3-4] 등의 다양한 분야에 적용되고 있다. 이와 같은 광통신 링크는 전자파 간섭에 무관, 넓은 대역폭, 저 손실, 경량, 소형, 그리고 경제적이란 여러 장점을 가지고 있다. 일반적으로 아날로그 광통신 링크는 강도변조/직접검파 (intensity modulation/direct detection) 방식을 이용하며 강도변조는 외부 광 변조기를 이용한다. 외부 광 변조기는 주로 마하-젠더 간섭계 (Mach-Zehnder Interferometer; MZI) 구조를 이용한 MZM을 이용한다. EDFA는 광 시스템에서 발생하는 광 손실을 보상하여 광 수신기의 Dynamic Range를 향상시키는 데 사용된다. 최근 MZM과 EDFA의 파라미터를 조절하여 RF 이득 향상, RF 잡음지수 감소, SFDR (spurious-free dynamic range) 향상 등의 아날로그 광통신 링크의 성능을 극대화시키기 위한 연구와 [5-6] 링크의 성능 한계에 관한 연구가 [7] 발표되었다. 그러나 광대역 특성과 높은 전송속도를 갖는 광통신 링크의 성능 분석에서 지터 특성에 대한 연구는 미미하다.

본 논문에서는 아날로그 광통신 링크에서 MZM과 EDFA의 입력 파라미터에 따른 RJ의 변화에 관하여 연구하였다. II장 1절에서는 광대역 잡음과 위상 잡음으로부터 RJ를 계산하는 방법에 관하여 정리하였고, II장 2절에서는 MZM과 EDFA의 입력 파라미터에 따른 RJ를 측정하고 분석하였다. 마지막으로 III장에서는 본 논문의 연구 결과를 요약하였다.

## II. 본론

### 1. 랜덤 지터

지터는 신호가 시간 축 상의 이상적인 위치로부터 매우 짧은 시간을 벗어나는 것을 말한다. 지터는 크게 deterministic 지터 (deterministic jitter; DJ)와 랜덤 지터 (random jitter; RJ) 두 종류로 구분된다 [8]. DJ는 디지털 시스템에서 신호의 누화 (crosstalk), 분산, 임피던스 부정합, 부호간 간섭 (Intersymbol interference; ISI), 듀티 사이클 왜곡 (Duty Cycle Distortion; DCD) 등에 의해 발생하며, 반복적이고 예측 가능하며 침투치 범위가 제한되어 있기 때문에 비교적 정확하게 측정이 가능하다. RJ는 열잡음, 산탄잡음과 같은 광대역 잡음 (broadband noise)과 위상 잡음 (phase noise) 등에 의해 발생하며 슬루율 (slew rate; S) 및 대역폭에 영향을 받는다.

DJ와 달리 RJ는 랜덤하기 때문에 통계적으로 다루어져야 하며 범위가 제한되어 있지 않아서 정확한 값을 얻을 수가 없다. 본 절에서는 광대역 잡음과 위상 잡음으로부터 RJ를 계산하는 방법에 관하여 정리하였다

가. 광대역 잡음에 의한 랜덤 지터

일반적으로 시스템의 대역폭 전체에 걸쳐 나타나는 광대역 백색 잡음으로 인한 잡음 전압,  $v_n$ 의 확률 밀도 함수 (probability density function; pdf)는 가우시안 (Gaussian or normal) 분포를 갖는다.

$$f(v_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{v_n}^2}} \exp\left(-\frac{v_n^2}{2\sigma_{v_n}^2}\right) \quad (1)$$

여기서  $\sigma_{v_n}$ 은 잡음 전압의 실효치로서 잡음 전력을 시스템의 전체 대역폭에 걸쳐 적분하여 구할 수 있다. 지터는 이상적인 시간 위치로부터 잡음전압으로 인해  $\Delta t$ 의 매우 짧은 시간을 벗어나는 것을 말한다. 또한 슬루율은 timing 신호의 최대 변화율로서 다음과 같이 표현된다 [9].

$$S = \frac{v_n}{\Delta t} \quad (2)$$

어떤 랜덤 변수의 함수는 그 자체가 새로운 랜덤 변수가 되므로 [10] (1), (2)식으로부터 광대역 잡음으로 인한 RJ,  $\Delta t_n$ 의 pdf는 다음과 같다.

$$f(\Delta t_n) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi\left(\frac{\sigma_{v_n}}{S}\right)^2}} \exp\left(-\frac{\Delta t_n^2}{2\left(\frac{\sigma_{v_n}}{S}\right)^2}\right) \quad (3)$$

식 (3)으로부터 RJ의 pdf는 가우시안 분포를 가지며, RJ의 실효치,  $\sigma_{\Delta t_n}$ 은 슬루율에 반비례하며 잡음 전압의 실효치에 비례함을 알 수 있다. 정현파의 경우 슬루율은 정의에 의하여  $S = V_0 2\pi f_0$ 이므로 RJ의 실효치는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{\Delta t_n} = \frac{\sigma_{v_n}}{S} = \frac{\sigma_{v_n}}{V_0 2\pi f_0} \quad (4)$$

여기서  $f_0$ 는 신호의 주파수,  $V_0$ 는 신호의 크기를 나타낸다.

나. 위상 잡음에 의한 랜덤 지터

위상 변동,  $\phi(t)$ 가 존재하는 신호  $v(t) = V_0 \sin(2\pi f_0 t + \phi(t))$ 에서, 이상적인 시간 위치로부터 위상 변동으로 인한 지터,  $\Delta t_\phi$ 는 다음과 같다.

$$\Delta t_\phi = \frac{\phi(t)}{2\pi f_0} \tag{5}$$

$\Delta t_\phi$ 의 전력 스펙트럼 밀도 (power spectral density; PSD),  $S_{\Delta t_\phi}(f)$ 는 위상 변동의 PSD,  $S_\phi(f)$ 에 비례하며 비례상수  $1/(2\pi f_0)^2$ 를 갖는다.

$$S_{\Delta t_\phi}(f) = \frac{1}{(2\pi f_0)^2} S_\phi(f) \tag{6}$$

단측파대 (Single side-band; SSB) 위상 잡음,  $L(f)$ 는  $L(f) = \frac{1}{2} S_\phi(f)$ 의 관계가 있으며, 일반적으로 RF 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정 가능하다. SSB 위상 잡음으로부터 특정 오프셋 주파수 범위 ( $f_l \leq f \leq f_h$ )에서 위상 변동으로 인한 지터의 실효치는 다음과 같다 [11].

$$\sigma_{\Delta t_\phi} = \frac{1}{2\pi f_0} \sqrt{\int_{f_l}^{f_h} S_\phi(f) df} \tag{7}$$

본 논문에서 총 RJ는 광대역 잡음으로 인한 RJ,  $\Delta t_n$ 과 위상 잡음으로 인한 RJ,  $\Delta t_\phi$ 의 합으로 제한하였으며 총 RJ의 실효치,  $\sigma_{RJ}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{RJ} = \sqrt{\sigma_{\Delta t_n}^2 + \sigma_{\Delta t_\phi}^2} \tag{8}$$

2. 아날로그 광통신 링크의 랜덤 지터

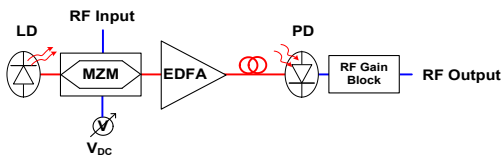


Fig. 1. An analog fiber-optic link  
그림 1. 아날로그 광통신 링크

아날로그 광통신 링크는 일반적으로 그림 1과 같이 광원 (Laser Diode; LD), MZM, EDFA, 광검출기 (Photodiode; PD)와 RF 이득 단으로 구성된다. 아날로그 광통신 링크에서 MZM의 DC 바이어스 전압은 주로 고조파 왜곡 및 혼변조 현상을 최소화하기 위해 quadrature 바이어스를 인가하며, EDFA는 RF 이득과 광수신기의 Dynamic Range(DR)를 증가시키고 RF 잡음지수를 향상시키는데 이용된다. 이러한 아날로그 광통신 링크에서 발생하는 RJ는 광대역 잡음과 위상 잡음 그리고 신호의 크기에 따라 영향을 받는다. 아날로그 광통신 링크에서 발생하는 잡음의 원인으로는 크게 열잡음 (thermal noise), 산탄잡음 (shot noise), LD 잡음, EDFA 잡음 등을 들 수 있는데, 그림 1의 광수신기 출력 단에서 RF 잡음 전력,  $N_{out}$ 은 다음과 같이 표현된다 [12].

$$N_{out} = N_{th} + N_{shot} + N_{laser} + N_{EDFA} \tag{9}$$

여기서,  $N_{th}$ 는 열잡음,  $N_{shot}$ 은 산탄잡음,  $N_{laser}$ 는 LD 잡음,  $N_{EDFA}$ 는 EDFA 잡음 전력이다. 열잡음과 산탄잡음은 일반적으로 백색 잡음 스펙트럼을 갖고, EDFA의 잡음전력은 주로 ASE (amplified spontaneous emission) 간의 비트 또는 광 반송파와 ASE 간의 비트로 발생하는데 EDFA의 출력 광 파워가 큰 경우 후자의 경우가 지배적이다.

본 장에서는 아날로그 광통신 링크에서 MZM과 EDFA의 입력 파라미터에 따른 RJ의 변화를 살펴보았다. 이를 위해 광 수신기 중단에서 광대역 잡음과 위상 잡음을 RF 스펙트럼 분석기 (Agilent E4440A)를 이용하여 측정하였고, 측정된 스펙트럼으로부터 RJ를 계산하였으며 이를 샘플링 오실로스코프 (Tektronics CSA8000)의 히스토그램 기능을 이용하여 측정된 RJ 값과 비교하였다.

가. MZM의 입력 파라미터 변화에 따른 랜덤 지터

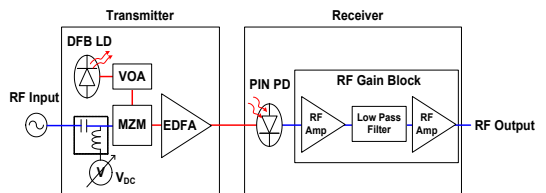


Fig. 2. Experimental setup for measuring random jitter  
그림 2. 랜덤 지터 측정을 위한 실험 구성도

그림 2는 아날로그 광통신 링크의 RJ를 측정하

기 위한 실험 구성도이다. 실험에 사용한 LD는 DFB(Distributed Feedback) LD로서 중심 파장이 1554.93 nm이고, 최대 출력 파워는 약 8 mW이다. MZM은 LiNbO3 MZI구조로서, 동작 파장은 1.55  $\mu\text{m}$  이고, 삽입손실은 약 8.2 dB,  $V_{\pi}$ 는 3.6 V, 오프셋 전압은 2.5 V로 측정되었다. MZM에는 quadrature 바이어스 전압 4.3 V를 인가하였다. RF 입력으로는 10 GHz 정현파를 인가하였고, MZM과 PD의 10 dB 통과 대역폭이 약 16 GHz로 측정되어 RF 이득 단에 차단주파수가 10.2 GHz인 RF 저역 통과 필터를 삽입하여 대역폭을 제한하였다. RF 이득 단의 전체 이득은 10 GHz에서 약 36.3 dB, 총 잡음지수는 약 8.8 dB로 측정되었다.

MZM의 입력 파라미터에 따른 RJ의 변화를 살펴보기 위해 그림 2의 실험 구성에서 EDFA를 제거하고 RF 출력단에서 잡음 전력과 신호 전력 그리고 RJ를 측정하였다. 그림 3은 MZM의 광 입력 신호와 RF 입력 신호의 변화에 따른 RJ 변화를 보여주는 개념도이다.

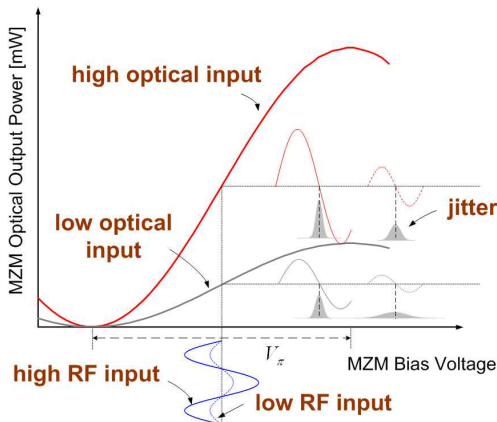


Fig. 3. Conceptual representation of the variation of RJ due to RF and optical power input to MZM  
 그림 3. MZM의 입력 RF와 광 파워에 따른 RJ의 변화를 보여주는 개념도

그림 4에는 MZM의 RF 입력 파워가 각각 -10 dBm, 0 dBm, +10 dBm인 경우에 RJ 측정값을 도시하였다. 그림 4에서 RF Spectrum이라고 표기된 RJ는 그림 2의 RF 출력단에서 RF 신호 전력, 전체 대역폭 내의 잡음전력, 그리고 위상 잡음 스펙트럼을 RF 스펙트럼 분석기로 각각 측정된 후 식 (4), (7), (8)을 이용하여 계산한 전체 RJ의 실효치다. 그리고, histogram으로 표기된 RJ는 샘플링 오실로스코프의

히스토그램 기능을 사용하여 측정된 RJ의 실효치를 나타낸다.

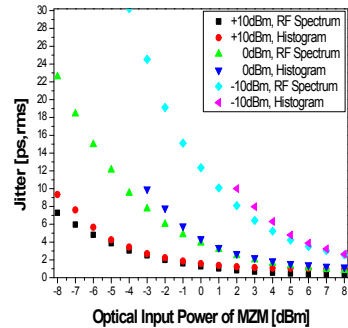


Fig. 4. Measured RJ vs. optical input power to MZM  
 그림 4. MZM의 입력 광 파워에 따른 RJ

그림 4에서 MZM의 입력 광 파워가 증가할수록 MZM 특성곡선의 기울기가 증가하므로 출력 광 파워도 증가한다. 이에 따라 출력 RF 신호,  $V_{RF_{out}}$ 이 증가하여 슬루율이 커진다. 또한 MZM의 입력 광 파워가 같을 때 RF 입력 신호의 크기,  $V_{RF_{in}}$ 이 클수록 슬루율이 커진다. 출력 광 파워가 증가함에 따라 위상 잡음은 감소하고, 광대역 잡음 전력은 다소 증가하지만 슬루율 증가율에 비해 광대역 잡음 전력 증가율은 미약하다. 따라서 총 RJ는 입력 광 파워와 RF 입력 파워가 증가할수록 감소하게 된다. RF 스펙트럼 방법으로 측정된 최소 RJ는 RF 입력 파워가 -10 dBm, 0 dBm, +10 dBm인 경우 각각 2.639 ps, 1.189 ps, 0.975 ps로 측정되었다.

그림 4에서 입력 광 파워가 작을 경우 RF 입력 신호의 크기에 따른 RJ의 변화폭이 크지만 입력 광 파워가 큰 경우 그 변화폭 그리 크지 않았다. 입력 광 파워가 0 dBm일 때 RF 입력 파워에 따른 지터의 변화폭은 11.112 ps이고, 입력 광 파워가 8 dBm 인 경우에는 2.271 ps로 측정되었다.

실험에서 잡음 스펙트럼과 히스토그램으로 측정된 RJ가 상이하게 나타났다. 히스토그램을 이용하여 RJ를 측정할 경우에는 입력 광 파워가 작으면 히스토그램 곡선의 분산이 증가하여 입력 정현파 신호의 상승 부분과 하강 부분의 히스토그램 데이터가 서로 겹치게 되므로 RJ가 증가하여 나타나기 때문이다. 그리고, RJ가 약 10 ps이상인 경우에는 히스토그램 곡선의 분산 중첩이 과도하여 지터의 측정이 불가능하였다.

나. EDFA의 입력 파라미터에 따른 랜덤 지터

우선 EDFA의 출력 광 파워를 일정하게 유지시키고, EDFA의 입력 광 파워와 이득에 따른 지터 변화에 대하여 살펴보았다. EDFA의 출력 광 파워를 0.5 dBm으로 유지하며 EDFA 입력 광 파워에 따른 RJ와 EDFA 출력 ASE 잡음 전력 측정값을 그림 5에 도시하였다. 출력 광 파워가 일정하므로 RF 출력 신호는 동일하다. EDFA 입력 광 파워가 작은 경우에는 일정한 EDFA 출력 광 파워를 얻기 위해서 보다 높은 EDFA 이득이 필요하게 되고, 이에 따라 ASE 잡음 레벨도 증가하게 되어 RF 잡음 전력이 커지므로 RJ는 증가한다. EDFA 입력 광 파워가 -1.4 dBm(EDFA 이득 1.9 dB)인 경우에 RJ는 0.815 ps로 가장 작게 측정되었다. EDFA 입력 광 파워가 -16 dBm보다 작은 경우, RJ가 급격히 증가하였다.

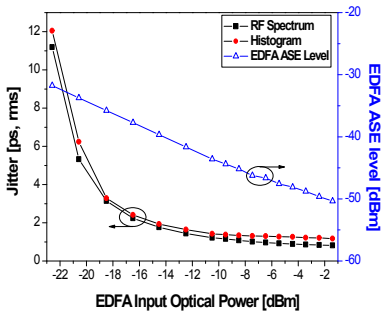


Fig. 5. Measured RJ and ASE level as a function of EDFA optical input power maintaining an optical output power at 0.5 dBm

그림 5. EDFA의 입력 광 파워에 따른 RJ 변화 (EDFA 출력 광 파워 0.5 dBm 유지)

다음으로 EDFA 입력 광 파워를 고정하고 EDFA 이득에 따른 RJ 변화를 살펴보았다. 그림 6은 서로 다른 EDFA 입력 광 파워에서 EDFA 이득에 따른 RJ 변화를 도시하였다. EDFA의 이득이 증가함에 따라 RF 출력 신호가 증가하여 RJ가 감소하였고, EDFA 입력 광 파워가 -10.34 dBm, -15.28 dBm, -20.02 dBm인 경우, 최소 RJ는 각각 1.23 ps, 1.87 ps, 3.60 ps로 측정되었다. EDFA의 이득이 동일한 경우, 입력 광 파워가 클 때 RJ의 크기가 보다 작았고, 또한 EDFA 이득이 증가함에 따라 입력 광 파워가 작은 경우에 RJ의 감소율이 보다 크게 나타났다. EDFA 입력 광 파워가 -20.02 dBm인 경우, EDFA 이득이 증가함에 따라 RJ가 최소화 되었다가

다시 증가하게 되는데, 이는 RF 잡음전력 증가율이 출력 RF 신호 전력 증가율보다 커지게 되어 나타나는 현상이라고 판단된다 [13].

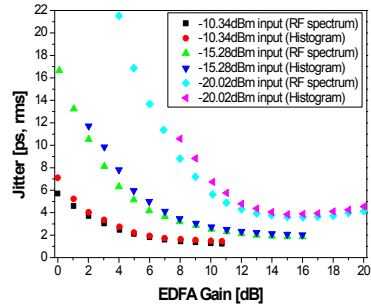


Fig. 6. Measured RJ as a function of EDFA gain with different optical input power to EDFA

그림 6. 서로 다른 EDFA 입력 광 파워에서 측정된 EDFA의 이득에 따른 RJ 변화

Table 1. Measured minimum RJ, EDFA gain, and ASE level as a function of optical input power to EDFA

표 1. EDFA 입력 광 파워에 따라 측정된 최소 RJ, EDFA 이득, ASE 잡음전력

EDFA input optical power [dBm]	EDFA gain [dB]	ASE level [dBm]	Calculated RJ from RF spectrum [ps]			Measured RJ from histogram $\sigma_{RJ}$ [ps]
			$\sigma_{\Delta t_s}$	$\sigma_{\Delta t_v}$	$\sigma_{RJ}$	
-15.28	15.99	-38.68	1.848	0.312	1.875	2.021
-17.96	15.97	-38.64	2.354	0.352	2.380	2.601
-19.49	16.03	-38.2	3.201	0.413	3.228	4.228
-21.37	16.21	-38.36	4.548	0.468	4.572	4.961
-23.31	16.13	-38.4	5.866	0.607	5.897	6.652
-25.02	16.21	-38.58	7.011	0.886	7.067	8.686
-27.68	16.01	-38.68	10.158	1.280	10.238	-

표 1에 EDFA의 입력 광 파워에 따라 측정된 최소 RJ와 EDFA 이득 그리고 ASE 잡음 전력을 정리하였다. EDFA 입력 광 파워가 -15 dBm 이하인 경우 실험을 통하여 EDFA 이득에 따른 최소 RJ를 찾을 수 있었다. 출력 RF 잡음 전력의 증가율이 신호 전력의 증가율과 비슷할 때 RJ가 최소화 되었으며, EDFA 이득이 더 커지면 RJ가 증가함을 볼 수 있었다. EDFA 입력 광 파워가 -15 dBm 보다 큰 경우에는, EDFA 이득이 16 dB 근처에서 RJ 변화가

매우 작아서 최소 RJ 측정은 불가능 하였다. 표 1에서 알 수 있듯이 EDFA 이득이 약 16 dB이고 ASE 잡음전력이 약 -38.5 dBm 근처에서 최소 RJ가 측정되었다.

### III 결론

MZM과 EDFA를 사용한 아날로그 광통신 링크에서 MZM과 EDFA의 입력 파라미터에 따른 랜덤 지터의 변화에 대하여 연구하였다. MZM의 입력 광 파워가 증가할수록 MZM 특성곡선의 기울기가 증가하여 슬루율이 커지고 위상잡음은 감소하며 광대역 잡음 전력은 다소 증가하지만 슬루율 증가율에 비해 광대역 잡음 전력 증가율은 미약하다. 따라서 총 RJ는 입력 광 파워와 RF 입력 파워가 증가할수록 감소하게 된다.

EDFA를 삽입한 광통신 링크에서 EDFA 출력 광 파워를 일정하게 유지시킨 경우 입력 광 파워가 작을수록 광 이득을 보다 증가시키기 때문에 ASE레벨이 커지게 되어 RJ가 증가하였고, EDFA 입력 광 파워를 고정시키고 EDFA 이득을 변화시킬 때 EDFA의 이득이 증가함에 따라 RF 출력 신호가 증가하여 RJ가 감소하였다. EDFA의 이득이 동일한 경우, 입력 광 파워가 클 때 RJ의 크기가 보다 작았고, 또한 입력 광 파워가 작은 경우에는 EDFA 이득이 증가함에 따라 RJ의 감소율이 보다 크게 나타났다. 출력 RF 잡음 전력의 증가율이 신호 전력의 증가율과 비슷할 때 RJ가 최소화 되었으며, EDFA 이득이 더 커지면 RJ가 증가함을 볼 수 있었다. EDFA 입력 광 파워가 -15 dBm 보다 큰 경우에는, EDFA 이득이 16 dB 근처에서 RJ 변화가 매우 작아서 최소 지터 측정은 불가능 하였다. EDFA 이득이 약 16 dB이고 ASE 잡음전력이 약 -38.5 dBm 근처에서 최소 RJ가 측정되었다

### 참고문헌

[1] J. Hongo, K. Kasai, M. Yoshida, and M. Nakazawa, "1-Gsymbol/s 64-QAM coherent optical transmission over 150 km," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, no. 9, pp. 638 - 640, May 2007

[2] M. L. VanBlaricum, "Photonic systems for antenna applications," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 36, no. 5, pp. 30 - 38, Oct. 1994

[3] J.-D. Shin, B.-S. Lee, and B.-G. Kim, "Optical True Time-Delay Feeder for X-band Phased-Array Antennas Composed of 2x2 Optical MEMS

Switches and Fiber Delay Lines," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, no. 5, pp. 1364 - 1366, May 2004

[4] B.-M. Jung, J.-D. Shin, and B.-G. Kim, "Optical True Time-Delay for Two-Dimensional X-Band Phased Array Antennas," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, no. 12, pp. 877-879, June 2007

[5] V. J. Urlick, M. E. Godinez, P. S. Devgan, J. D. McKinney, and F. Bucholtz, "Analysis of an Analog Fiber-Optic Link Employing a Low-Biased Mach-Zehnder Modulator Followed by an Erbium-Doped Fiber Amplifier." *J. Lightwave Technol.*, vol. 27, no. 12, pp. 2013-2019, June 2009

[6] E. Ackerman, W. Burns, G. Betts, J. Chen, J. Prince, M. Regan, H. Roussel, and C. Cox III, "RF-Over-Fiber Links With Very Low Noise Figure," *J. Lightwave Technol.*, vol. 26, no.15, pp. 2441-2448, Aug. 2008

[7] C. Cox, E. Ackerman, G. Betts, and J. Prince, "Limits on the performance of RF-over-fiber links and their impact on device design," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, no. 2, pp. 906 - 920, Feb. 2006

[8] N. Ou, T. Farahmand, A. Kuo, S. Tabatabaei, and A. Ivanov, "Jitter Models for the Design and Test of Gbps-Speed Serial Interconnects," *IEEE Design & Test of Computers*, vol. 21, no. 4, pp. 302-313, July 2004

[9] D. Kucharski and K. T. Kornergay, "Jitter Considerations in the Design of a 10-Gbps Automatic Gain Control Amplifier," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 2, pp. 590 - 597, Feb. 2005

[10] A. Papoulis and S. U. Phillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, McGraw-Hill, New York, pp. 123-168, 2002

[11] I. Zamek, S. Zamek, "Definition of Jitter measurement Terms and Relationships," *Proc. of the IEEE International Test Conference*, pp. 25-34, Nov. 2005.

[12] Chi H. Lee, *Microwave Photonics*, (CRC Press, Florida, pp. 185 - 212, 2007

[13] E. Sackinger, *Broadband Circuits for Optical Fiber Communication*, John Wiley&Sons, Inc., New Jersey, pp. 25 - 43, 2005

---

 저 자 소 개
 

---

**윤 영 민** (학생회원)

2003년 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 졸업 (공학사)  
 2005년 : 숭실대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)  
 2007년 9월~현재 : 숭실대학교 대학원 전자공학과 박사 과정  
 <주관심분야>

Microwave Photonics, Phased Array Antenna,  
 Microstrip Antenna

**이 민 영** (학생회원)

2008년 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 졸업 (공학사)  
 2008년 3월~현재 : 숭실대학교 대학원 정보통신공학과 (공학석사)  
 <주관심분야> Microwave Photonics, Phased Array Antenna

**김 부 균** (비회원)

1979년 : 서울대학교 전자공학과 졸업 (공학사)  
 1981년 : KAIST 전기 및 전자공학과 (석사과정)  
 1989년 : Univ. of Southern California, 전자공학과 (공학박사)  
 1993년 IBM Almaden 연구소 방문 연구원

1993년 IBM Almaden 연구소 방문 연구원

1997년~1998년 Univ. of California at Santa Barbara 방문 부교수

2004년~2006년: 산자부 산업기술발전심의회 위원

1981년~현재: 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수  
 <주관심분야> 위상 배열 안테나, SiP, 광통신 및 광네트워크용 소자

**신 중 덕** (정회원)

1981년 : 연세대학교 전자공학과 졸업 (공학사)  
 1987년 : Univ. of Texas at Austin, 전기 및 컴퓨터 공학과 (공학석사)  
 1991년 : Texas A&M Univ., 전기공학과 (공학박사)

1980년~1983년 대영전자공업(주) 개발부  
 1991년~1995년 한국전자통신연구소, 선임연구원  
 2001년~2002년 Alcatel USA 방문교수  
 1995년~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수  
 <주관심분야> OBS, OPS, OLS, 광 실시간 지연선로  
 빔 성형망, 광 센서 신호처리