

마하-젠더 광 변조기와 EDFA로 구성된 아날로그 광통신 링크에서 변조기 바이어스 조절을 이용한 랜덤 지터의 감소

Jitter Reduction by Modulator-Bias Control in Analog Fiber-Optic Links Employing a Mach-Zehnder Modulator Followed by an Erbium-Doped Fiber Amplifier

Min-Young Lee*, Young-Min Yoon*, Jong-Dug Shin**

이 민 영*, 윤 영 민*, 신 중 덕**

Abstract

We report an efficient jitter reduction technique in an analog fiber-optic link employing a Mach-Zehnder modulator followed by an erbium-doped fiber amplifier. By adjusting the modulator-bias to $0.089V_{\pi}$, we could increase the RF gain up to 10.65 dB for 10 GHz RF signal and reduce the random jitter by 46.5%, max, at an input optical power of -0.11 dBm to the EDFA.

요 약

본 논문에서는 마하-젠더 광 변조기와 EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier)로 구성된 아날로그 광통신 링크에서 광 변조기에 인가되는 바이어스 전압의 조절을 통해 광통신 링크 출력의 랜덤 지터를 효과적으로 감소시키는 방법에 관하여 연구하였다. 광 변조기의 바이어스를 $0.5V_{\pi}$ 로부터 약 $0.089V_{\pi}$ 로 이동시켰을 때, 10 GHz RF 신호의 이득은 최대 10.65 dB가 증가하였고, 랜덤 지터는 EDFA의 입력 광 파워가 -0.11 dBm일 때 최대 46.5% 감소하였다.

Key words : random jitter, microwave photonics, fiber-optic communications, optical fiber amplifiers, low-biased modulation.

1. 서론

현재 활발한 연구가 진행 중인 아날로그 광통신 링크는 안테나 원격 제어, 신호 처리, ROF (radio-over-fiber) 등의 분야에서 종전보다 훨씬 향상된 성능을 나타내고 있다. 아날로그 광통신 링크에서는 일반적으로 강도변조/직접검파 방식이 사용되기 때문에 RF 이득을 최대로 하고 짝수차 고조파의 왜곡을 억제하기 위하여 광 변조기의 바이어스를 $0.5V_{\pi}$ 로 인가한다. 이 경우, 광 변조기 출력 신호의 왜곡을 발생시키지 않기 위해서 크기가 작은 RF 신호를 인가하므로 출력 광 파워의 대부분은 광 반송파로 전달되게 된다. 또한, RF 신호의 이득과 선형 영역(dynamic range)을 증가시키기 위해 광섬유 증폭기를 사용하기 때문에 증폭된 광 파워로 인해 광섬유에서는 비선형 현상이 발생하며 광 검출기에서는 신호의 왜곡이 나타날 수 있다. 따라서, 아날로그 광통신 링크에서 잡음 지수를 감소시키고 선형 영역을 증가시키기 위해서 광 반송파를 억압하기 위한 연구들이 진행되어 왔으며, 대표적으로 광 필터를 이용하는 방법 [1]과 광 변조기의 바이어스를 조정하는 방법 [2-6] 등

* 崇實大學校 情報通信電子工學部
(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

★ 교신저자 (Corresponding author)

接受日:2009年 12月 8日, 修正完了日:2009年 12月 28日

이 제안되었다. 광 필터를 이용하는 방법은 광 변조기 다음에 광 필터를 삽입하여 광 반송파를 억압하는 방법으로써 선형 영역을 약 10 dB정도 향상시키는 결과를 얻었으나 필터를 추가적으로 사용해야하는 단점이 있다. 광 변조기의 바이어스를 조정하는 방법은 추가적인 부품을 사용하지 않고 광 변조기의 바이어스를 $0.5V_{\pi}$ 에서 0 바이어스 근처로 이동시키면 광 변조기의 출력 광 파워가 감소하여 광 신호의 실효 이득이 증가하게 되고 결과적으로 RF 신호가 $0.5V_{\pi}$ 바이어스인 경우보다 더 증폭되어 선형 영역이 증가되는 효과가 나타난다.

위상 배열 안테나 제어를 위한 빔 성형망의 기본 구조인 광 실시간 지연선로[7,8]에 연결된 광 링크에서는 잡음으로 인해 지터가 발생되면 각 안테나 소자에 공급되는 위상이 변동하여 위상 배열 안테나의 주 빔 방향이 변하여 성능이 떨어지기 때문에, 지터를 감소시켜 시스템을 안정화 시키는 방법에 관한 연구가 반드시 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 마하-젠더 광 변조기와 EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier)를 사용하는 아날로그 광통신 링크에서 변조기의 바이어스 조정을 통한 랜덤 지터의 감소 효과를 실험을 통하여 규명하였다.

본 논문의 II.1절에서는 마하-젠더 광 변조기와 EDFA를 사용한 아날로그 광통신 링크에서 광 변조기 바이어스 조정에 따른 RF 신호의 이득 변화의 원리에 대하여 간단히 설명하였고, II.2절에서는 랜덤 지터에 관하여 정리하였으며, II.3절에서는 바이어스 전압을 변화시키며 최대 RF 이득을 얻을 수 있는 최적 바이어스를 구하였고, $0.5V_{\pi}$ 바이어스와 최적 바이어스 조건에서 EDFA의 광 입력 파워를 변화시키며 출력 RF 전력과 EDFA 이득 및 랜덤 지터를 측정하고 이를 분석하였다. 마지막으로 III장에서는 본 논문의 결과를 요약하였다.

II. 본론

1. 마하-젠더 광 변조기의 바이어스 조정에 따른 RF 신호 이득의 변화

일반적인 아날로그 광통신 링크는 그림 1과 같이 LD(Laser Diode), 마하-젠더 광 변조기(Mach-Zehnder Modulator; MZM), EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier), PD(Photodiode) 수신부로 구성된다. MZM에는 고조파 왜곡 및 혼변조 현상을 최소화하기 위해 주로 $0.5V_{\pi}$ 바이어스(quadrature bias)를 인가하며, EDFA는 RF 이득과 광수신기의 입력 선형 영역

(dynamic range)을 증가시키고 RF 잡음지수를 향상시키기 위하여 사용된다.

그러나 MZM의 바이어스 전압을 $0.5V_{\pi}$ 부터 0 바이어스 쪽으로 점차 낮추게 되면 MZM의 스위칭 곡선을 따라 기울기가 점차 낮은 쪽으로 이동하여 바이어스 전압이 $0.5V_{\pi}$ 인 경우보다 MZM 출력 광 파워와 RF 파워가 감소하게 된다. 바이어스의 이동에 따라 EDFA에 입력되는 광 파워가 감소하였기 때문에 광 신호에 대한 EDFA의 실효 이득이 상대적으로 증가하여 RF 신호의 이득이 증가하는 효과가 나타난다.

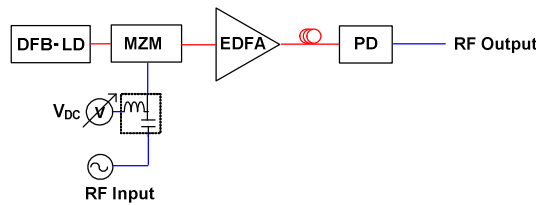


Fig. 1. An analog fiber-optic link.
그림 1. 아날로그 광통신 링크

그림 2에 MZM에 인가되는 바이어스 전압을 변화시킬 때 MZM 출력 변화에 관한 개념도를 도시하였다. 동일한 진폭을 갖는 입력 RF 신호에 대하여 저전압 바이어스의 경우에는 EDFA 이득의 증가 효과로 인해 출력 RF 신호의 크기가 크게 나타나도록 도시되어있다.

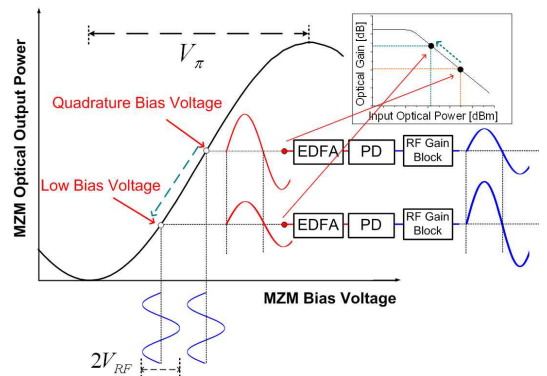


Fig. 2. Conceptual representation of the relationship between the bias voltage and the optical output power of MZM.

그림 2. MZM에 인가된 바이어스 전압 변화에 따른 출력 RF 파워의 변화에 대한 개념도

2. 랜덤 지터

지터는 시간 신호가 시간 축 상의 이상적인 위치로부터 매우 짧은 시간을 벗어나는 것을 말하며 크게 deterministic 지터(deterministic jitter; DJ)와 랜덤 지터(random jitter; RJ) 두 종류로 나뉜다[9]. DJ는 디지털 시스템에서 신호의 누화, 분산, 임피던스 부정합, 부호간 간섭, 듀티 사이클 왜곡 등에 의해 발생하며, 반복적이고 예측 가능하며 침투치 범위가 제한되어 있기 때문에 비교적 정확하게 측정이 가능하다. 랜덤 지터는 열잡음, 산탄잡음과 같은 광대역 잡음과 위상 잡음 등에 의해 발생하며 슬루율(slew rate; S) 및 대역폭에 영향을 받는다. DJ와 달리 랜덤 지터는 랜덤하기 때문에 통계적으로 다루어져야 하며 범위가 제한되어 있지 않아서 정확한 값을 얻을 수가 없다. 본 절에서는 광대역 잡음과 위상 잡음으로부터 랜덤 지터를 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 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 σ_{v_n} 은 잡음 전압의 실효치(root-mean-square; rms)로서 잡음 전력을 시스템의 전체 대역폭에 걸쳐 적분하여 구할 수 있다. 지터는 이상적인 시간 위치로부터 잡음 전압으로 인해 Δt 의 매우 짧은 시간을 벗어나는 것을 말한다. 또한 슬루율 S 는 시간 신호의 최대 변화율로서 다음과 같이 표현된다[10].

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

(1), (2)식으로부터 광대역 잡음으로 인한 랜덤 지터 Δt_n 의 pdf는 다음과 같은 가우시안 분포를 갖는다.

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

정현파의 경우 슬루율은 정의에 의하여 $S = V_0 2\pi f_0$ 이므로 랜덤 지터의 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 Δt_ϕ 는 다음과 같다.

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

Δt_ϕ 의 전력 스펙트럼 밀도 $S_{\Delta t_\phi}(f)$ 는 위상 변동의 전력 스펙트럼 밀도 $S_\phi(f)$ 와 다음의 관계식을 갖는다.

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

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].

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

본 논문에서 총 랜덤 지터는 광대역 잡음으로 인한 랜덤 지터 Δt_n 와 위상 잡음으로 인한 랜덤 지터 Δt_ϕ 의 합으로 제한하였으며 총 랜덤 지터의 실효치 σ_{RJ} 는 다음과 같이 표현된다.

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

3. 실험 및 고찰

아날로그 광통신 링크의 MZM에 인가하는 바이어스 전압을 조정하며 최대 RF 이득이 나타나는 바이어스 전압을 구하였고, $0.5 V\pi$ 와 최대 RF 이득 바이어스에서 EDFA 입력 광 파워에 따른 출력 RF 파워 및 랜덤 지터를 측정하여 비교하였다. 랜덤 지터는 광 수신기 종단에서 광대역 잡음과 위상 잡음을 Agilent사의 E4440A RF 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정된 스펙트럼으로부터 랜덤 지터를 계산한 값과 Tektronics사의 CSA8000 샘플링 오실로스코프의 히스토그램 기능을 이용하여 측정된 랜덤 지터 값과 비교하였다.

그림 3은 아날로그 광통신 링크의 MZM에 인가되는 바이어스에 따른 RF 이득과 랜덤 지터를 측정하기 위한 실험 구성도이다. 실험에 사용한 LD는 DFB-LD로서 중심 파장이 1552.3 nm이고, 최대 출력 파워는 약 8 mW이다. MZM은 LiNbO3광 변조기로서, 동작 파장은 1.55 μm 이고, 삽입손실은 약 8.0 dB, $V\pi$ 는 3.48 V로 측정되었다. RF 입력은 -10 dBm, 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.

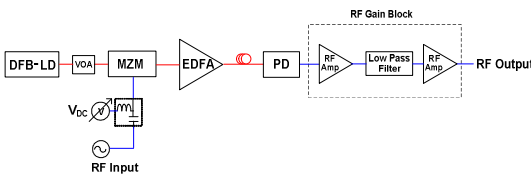


Fig. 3. Schematic of experimental setup for measuring RF gain and random jitter.
그림 3. RF 이득과 랜덤 지터 측정을 위한 실험 구성도

먼저 MZM에 $0.5 V\pi$ 바이어스를 인가하고, LD 출력 광 파워를 VOA(Variable Optical Attenuator)로 조절하며 RF 이득과 랜덤 지터를 측정하였다. 실험에 사용한 PD의 입력 포화 전력이 3 dBm이기 때문에 EDFA의 이득을 조정하여 PD 입력을 2 dBm으로 고정시켰다. 그림 4는 바이어스 전압에 따른 RF 이득의 측정치를 나타내고 있다. 수평축은 반파 전압 $V\pi$ 로 정규화한 바이어스 전압으로 도시하였다. 서로 다른 EDFA 입력 광 파워에 대하여 각각 MZM의 바이어스를 조정하며 RF 이득을 측정하였다. EDFA 입력 광 파워가 -0.11 dBm 인 경우에 최대 RF 이득

을 나타내는 바이어스는 약 $0.072 V\pi$ 로 측정되었고, EDFA 입력 광 파워가 -2.13 dBm인 경우에는 약 $0.081 V\pi$, -4.14 dBm인 경우, 약 $0.094 V\pi$, 그리고 -6.15 dBm인 경우, 약 $0.119 V\pi$ 로 측정되어 EDFA 입력 광 파워 레벨에 따라 최적 바이어스가 변하였다. 본 실험에서는 최적 바이어스를 $0.089 V\pi$ 로 고정하고 출력 파라미터들을 측정하였다.

그림 5는 MZM 바이어스를 각각 $0.5 V\pi$ 와 $0.089 V\pi$ 로 인가한 경우에 EDFA 입력 광 파워에 따른 RF 출력 파워와 EDFA 이득을 보이고 있다. 그림의 왼쪽 종축은 EDFA 입력 광 파워에 따른 출력 RF 파워를 나타내는데 $0.5 V\pi$ 바이어스 전압에서는 EDFA 출력 파워를 2 dBm로 고정시켰기 때문에 RF 출력 파워가 거의 일정한 것을 볼 수 있다.

그러나 동일한 실험 조건에서 MZM 바이어스 전압을 조정하여 RF 이득이 최대가 되도록 하면 MZM 스위칭 곡선의 기울기가 감소하여 EDFA에 입력되는 광 파워가 작게 되어 MZM 바이어스가 $0.5 V\pi$ 인 경우 보다 광 신호의 증폭률이 증가하는 것을 그림 5의 오른쪽 종축에 나타낸 EDFA 이득 데이터로부터 알 수가 있다.

EDFA 입력 광 파워가 가장 큰 -0.11 dBm인 경우에 $0.5 V\pi$ 바이어스 전압에서 출력 RF 파워가 -11.88 dBm으로 측정되었지만, $0.089 V\pi$ 바이어스 전압에서는 -1.23 dBm으로 측정되어, $0.089 V\pi$ 바이어스 전압일 경우가 $0.5 V\pi$ 바이어스 전압보다 RF 파워가 약 10.65 dB 증가하는 결과를 얻었다.

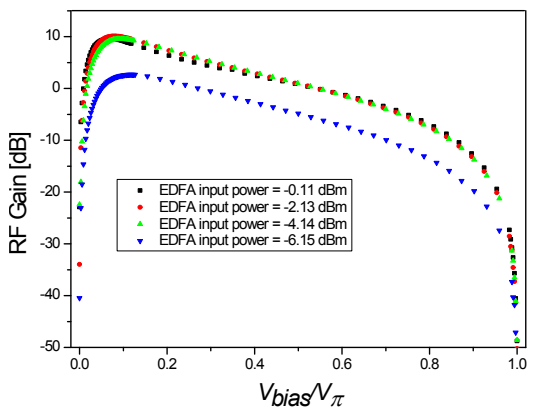


Fig. 4. Measured RF gain as a function of bias voltage.
그림 4. 바이어스 전압에 따른 RF 이득 측정치

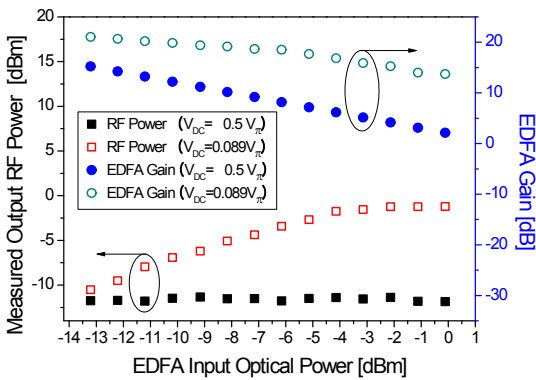


Fig. 5. Measured RF output power and EDFA gain as a function of EDFA input optical power with MZM biased at $0.5 V_{\pi}$ and $0.089 V_{\pi}$, respectively.

그림 5. $0.5 V_{\pi}$ 와 $0.089 V_{\pi}$ 바이어스에서 EDFA 입력 광 파워에 따른 RF 출력 파워와 EDFA 이득 측정치

그림 6은 바이어스 전압이 $0.5 V_{\pi}$ 인 경우와 $0.089 V_{\pi}$ 인 경우 측정된 랜덤 지터를 나타내고 있다. 실험에서 잡음 스펙트럼과 히스토그램으로 측정된 랜덤 지터가 상이하게 나타났다. 히스토그램을 이용하여 랜덤 지터를 측정할 경우에는 입력 광 파워가 작으면 히스토그램 곡선의 분산이 증가하여 입력 정현파 신호의 상승 부분과 하강 부분의 히스토그램 데이터가 서로 겹치게 되므로 랜덤 지터가 증가하여 나타나기 때문이다. 그리고, 랜덤 지터가 약 10 ps 이상인 경우에는 히스토그램 곡선의 분산 중첩이 과도하여 지터의 측정이 불가능하였다.

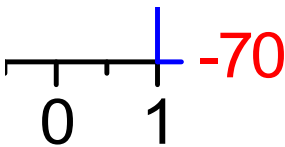


Fig. 6. Measured random jitter and ASE level as a function of EDFA optical input power with MZM biased at $0.5 V_{\pi}$ and $0.089 V_{\pi}$, respectively.

그림 6. 바이어스 전압 $0.5 V_{\pi}$ 와 $0.089 V_{\pi}$ 에서 EDFA의 입력 광 파워에 따른 랜덤 지터와 ASE 측정치

바이어스 전압이 $0.5 V_{\pi}$ 인 경우에는 MZM 입력 광 파워가 증가할수록 MZM 스위칭 곡선의 기울기가 커지게 되어 OSNR(Optical Signal-to-Noise Ratio)이 증가하고, 이는 랜덤 지터의 감소를 초래한다. 바이어스 전압이 $0.089 V_{\pi}$ 인 경우도 마찬가지로 MZM 입력 광 파워가 증가할수록 랜덤 지터가 감소한다. EDFA 입력 광 파워가 -9 dBm보다 큰 경우에는 $0.5 V_{\pi}$ 바이어스 경우보다 $0.089 V_{\pi}$ 바이어스인 경우에 랜덤 지터 값이 작게 측정되었다. EDFA 입력 광 파워가 -0.11 dBm인 경우에 $0.5 V_{\pi}$ 일 때 2.629 ps, $0.089 V_{\pi}$ 일 때 1.371 ps로 랜덤 지터가 측정되어, 최적 바이어스인 경우에 지터 감소율이 약 46.5%로 나타났다. 반면에 EDFA 입력 파워가 -9 dBm보다 작은 경우에는 $0.5 V_{\pi}$ 일 때가 $0.089 V_{\pi}$ 일 때보다 랜덤 지터가 작게 측정이 되었다. 이와 같은 현상은 그림 5의 EDFA 이득과 그림 6의 ASE(Amplified Spontaneous Emission) 레벨 데이터를 비교해 보면 알 수 있는데, EDFA 입력 광 파워가 낮은 때에는 저전압 바이어스를 인가한 경우에 얻게 되는 EDFA 이득의 효과보다는 ASE 잡음 전력의 증가 효과가 더욱 크게 나타나나, EDFA 입력 광 파워가 높은 때에는 이와는 반대 현상이 나타나서 잡음이 개선되기 때문이다.

III 결론

마하-젠더 광 변조기(Mach-Zehnder Modulator ; MZM)와 EDFA(Erbium-Doped Fiber Amplifier)를 사용하는 아날로그 광통신 링크에서 광 변조기에 인가되는 바이어스 전압을 조정하여 통상적인 $0.5 V_{\pi}$ 바이어스의 경우보다 링크의 RF 이득을 높일 수 있었으며, 이를 통해 랜덤 지터도 감소시킬 수 가 있었다.

MZM의 바이어스 전압을 $0.5 V_{\pi}$ 부터 0 바이어스 쪽으로 점차 낮추게 되면 MZM의 스위칭 곡선을 따라 기울기가 점차 낮은 쪽으로 이동하여 바이어스 전압이 $0.5 V_{\pi}$ 인 경우보다 출력 광 파워와 RF 파워가 감소하게 된다. 바이어스의 이동에 따라 EDFA에 입력되는 광 파워가 감소하였기 때문에 입력 광 신호에 대한 EDFA의 이득이 상대적으로 증가하여 결과적으로 RF 신호의 이득이 증가하는 효과가 나타나기 때문이다.

EDFA 입력 광 파워가 -0.11 dBm인 경우에는 RF 파워가 $0.089 V_{\pi}$ 바이어스 전압일 때 $0.5 V_{\pi}$ 바이어스 전압보다 약 10.65 dB 증가하였다. 또한 랜덤 지터는 바이어스 전압에 관계없이 입력 광 파워가 증가할수록 감소하였다. 하지만 EDFA 입력 광 파워가 -9 dBm보다 큰 경우에는 $0.5 V_{\pi}$ 바이어스 경우보다 $0.089 V_{\pi}$ 바이어스인 경우에 랜덤 지터 값이 작게 측

정되었다. EDFA 입력 광 파워가 -0.11 dBm인 경우에 $0.5 V\pi$ 와 비교하여 $0.089 V\pi$ 의 경우에 지터 감소율이 약 46.5%로 나타났다. 반면에 EDFA 입력 파워가 -9 dBm보다 작은 경우에는 $0.5 V\pi$ 일 때가 $0.089 V\pi$ 일 때보다 랜덤 지터가 작게 측정이 되었다. 이와 같은 현상은 EDFA 입력 광 파워가 낮은 때에는 저전압 바이어스를 인가한 경우에 얻게 되는 EDFA 이득의 효과보다는 ASE 잡음 전력의 증가 효과가 더욱 크게 나타나나, EDFA 입력 광 파워가 높은 때에는 이와는 반대 현상이 나타나서 잡음이 개선되는 효과가 나타나기 때문이다.

참고문헌

- [1] M. L. Farwell, W. S. C. Chang, and D. R. Huber, "Increased linear dynamic range by low biasing the Mach-Zehnder modulator," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, pp. 779-782, 1993.
- [2] M. J. LaGasse, W. Charczenko, M. C. Hamilton, and S. Thaniyavarn, "Optical carrier filtering for high dynamic range fibre optic links," *Electron. Lett.*, vol. 30, pp. 2157-2158, 1994.
- [3] D. J. M. Sabido and L.G. Kazovsky, "Dynamic range of optically amplified RF optical links," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 49, no. 10, pp. 1950-1955, 2001.
- [4] M. M. Sisto, S. LaRochele, and L. A. Rusch, "Gain optimization by modulator-bias control in radio-over-fiber links," *J. Lightwave Technol.*, vol. 24, pp. 4974-4982, 2006.
- [5] A. Karim and J. Devenport, "Noise figure reduction in externally modulated analog fiber-optic links," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 19, no. 5, pp. 312-314, 2007.
- [6] Vincent J. Urick, Modesto E. Godinez, Preetpaul S. Devgan, Jason D. McKinney, and Frank 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, pp. 2013-2019, 2009.
- [7] J.-D. Shin, B.-S. Lee, and B.-G. Kim, "Optical true time-delay feeder for X-band phased-array antennas composed of 2×2 optical MEMS switches and fiber delay lines," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol 16, no. 5, pp. 1364-1366, 2004.
- [8] 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, 2007.
- [9] 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, 2004.
- [10] D. Kucharski and K. T. Kornergay, "Jitter Considerations in the Design of a 10-Gbps Automatic Gain Control Amplifier," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 53, no. 2, pp. 590 - 597, 2005.
- [11] I. Zamek, S. Zamek, "Definition of Jitter measurement Terms and Relationships," *Proc. of the IEEE Inter. Test Conference*, 2005.
- [12] Chi H. Lee, *Microwave Photonics*, (CRC Press, Boca Raton, FL, 2007), pp.185 - 212.

저 자 소 개

이 민 영 (학생회원)



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

윤 영 민 (학생회원)



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

Microwave Photonics, Phased Array Antenna,
Microstrip Antenna

신 종 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