

광전자 프리디스토션 기법을 적용한 광 송신기의 높은 선형성 향상 특성

High-linearity enhancement of optical transmitter using optoelectronic predistortion method

이 태 경*, 문 연 태, 최 영 완
(Tae-Kyeong Lee, Yon-Tae Moon and Young-Wan Choi)

Abstract : 최근 통신시스템과 핸드폰, PDA 등의 통신기기들의 발전에 따라 사용자들은 높은 데이터 전송률과 고속의 통신서비스를 요구하고 있다. 이러한 상황에서 유·무선 통합 시스템인 Radio-over-Fiber(RoF) 시스템은 그 대안으로 대두되고 있다. 본 논문에서는 광전자소자를 선 왜곡 방식에 적용하여 광 송신기의 선형성을 향상시키는 방법을 제안하였다. 선 왜곡 방식은 두 개의 루프로 구성되어 있으며, 광 부품인 레이저 다이오드와 포토 다이오드 그리고 RF 부품인 위상변위기, 감쇄기, RF 결합/분배기, RF 증폭기를 사용하였다. 메인 루프에서 주 레이저 다이오드의 비선형성에 의해 발생된 왜곡신호성분은 보조 루프에서 부 레이저 다이오드를 이용하여 추출된 선 왜곡신호에 의해서 제거된다. 제안된 선형화 기법을 적용하여 2.4 GHz에서 선형화 기법을 적용하기 전보다 3차 상호변조 왜곡성분이 약 30 dB 향상된 결과를 얻었다.

Keywords: Distributed-feedback laser diode, Intermodulation distortion, Linearization, Predistortion, Radio-over-fiber

I. 서론

최근 통신시스템과 핸드폰, PDA 등의 통신기기들의 발전에 따라 사용자들은 높은 Data rate 과 고속의 통신서비스를 요구하고 있으며, 보다 나은 Quality of Service (QoS)에 대해서는 건물들 사이의 음영지역이나 지하 같은 전파 고립지역에서부터 전파환경이 우수한 아파트나 인구 밀집지역까지 원하고 있다. 이러한 상황에서 유·무선 통합형 통신시스템인 Radio-over-Fiber (RoF) 시스템은 그 대안으로 연구되고 있다. RoF 시스템은 Central station에서 Base station 혹은 Access point 까지 손실이 적고 간섭이 없는 광통신 시스템과 Access point 에서 안테나를 통해 무선기기로 이동성의 장점을 가진 무선 통신 시스템을 결합한 통신방식으로 구성되어 있다. 동축케이블을 이용한 기존 방식과는 달리 RoF 시스템은 광섬유를 이용하기 때문에 Central station에서 Base station 혹은 Access point간의 Data 전송 시 마이크로파 대역인 RF신호를 낮은 주파수로 변환시킬 필요가 없게 된다. 그러므로 기존 통신 방식에서 원격안테나의 주파수 변환을 위한 회로가 제거 될 수 있다. 이러한 이유로 Access point의 구성이 간단해지고, 가격 면에서 장점을 가진다. [1, 2]

아날로그 통신시스템에서 가장 중요한 요소들 중 하나는 송신부의 선형성이다. RoF 통신시스템에서 가장 일반적으로 사용하는 광 전송시스템은 레이저 다이오드 (LD) 에 RF 신호를 직접 변조하는 아날로그 Sub-carrier multiplexing (SCM) 광 전송방식인데[3], 이 방식에서 LD의 비선형성은 3차 상호 변조 왜곡성분을 발생시켜 시스템의 성능을 열화 시킨다. 아날로그 SCM 광 전송방식에서 비선형 왜곡 현상을 개선하기 위한 방법으로 프리디스토션 (Predistortion), 피드포워드 (Feedforward) 같은 방식들이 연구되고 있다.[4-6] 피드포워드

는 시스템이 복잡하여 구현하기 어렵고 LD의 분산의 영향으로 장거리 전송 시 단점이 있다. 프리디스토션은 기존의 전기 회로에서 증폭기의 선형화에 주로 쓰이는 기법으로 광 링크에서는 아날로그 RF 신호를 레이저 다이오드로 직접 변조 혹은 외부 변조를 할 때 생기게 되는 비선형 선분을 제어하기 위해 송신기에 신호를 입력하기 전에 미리 원 신호를 왜곡시켜서 입력하는 방식으로 이용된다. 이런 선 왜곡 기법을 이용하여 선형화 하는 방법은 주로 전기회로를 이용한 방법이 제안되었다. 본 연구에서는 송신기의 선형성을 향상시키기 위하여 광전자 소자 프리디스토션 기법을 이용한 광 송신기를 제작하였다.

II. 본론

Principle of operation

그림 1은 선형화 동작 원리를 도식적으로 나타낸 것이다. 원 신호인 RF 신호는 비선형 소자인 LD에서 직접 변조 시 전/광 변환되는 과정에서 비선형 왜곡성분이 발생되게 되는데, 여기서 Slave LD (SLD)의 역할은 원 신호인 RF 신호를 직접 변조하여 선 왜곡신호를 생성하는 것이다. 이러한 왜곡된

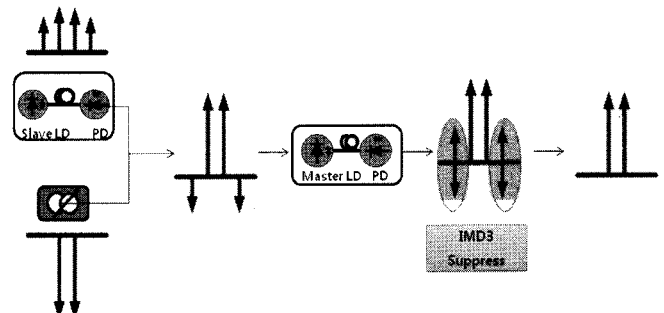


그림 1. 선 왜곡 신호를 이용한 선형화 동작원리
Fig 1. Principle of operation using predistortion

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2008. 07. 25., 채택확정 : 2008. 08. 01.

이태경, 문연태, 최영완 : 중앙대학교 전파광파통신연구소
(momoci1985@gmail.com, yontae@gmail.com, ychoi@cau.ac.kr)

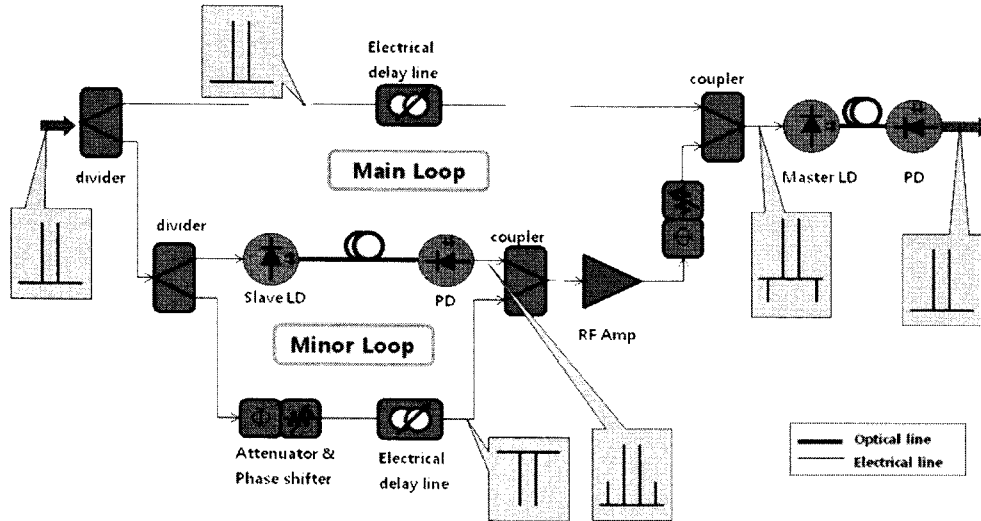


그림 2. 제안된 광전자 프리디스토션 기법의 구성도
 Fig 2. Structure of proposed optoelectronic predistortion technique

신호와 선 왜곡된 신호는 크기가 같고 위상이 180° 차이났을 때 상쇄 된다.

이와 같은 원리로 LD의 입력전류(I)에 따른 광 전력 크기(P)의 관계식을 polynomial 계수 a를 이용하여 3차 polynomial 식으로 표현하면, 다음과 같다.

$$P = a_1 I + a_2 I^2 + a_3 I^3 \quad (1)$$

입력전류에 입력크기가 A로 동일하고 주파수가 f₁, f₂ 인 식 (2)와 같은 two-tone의 RF 신호를 입력한다면,

$$I = A(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 통해 출력된 LD의 광 전력 크기는 다음과 같다.

$$P = (a_1 A + \frac{9}{4} a_3 A^3)(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) + \dots + \frac{3}{4} a_3 A^3 (\cos(2\omega_1 \pm \omega_2)t + \cos(2\omega_2 \pm \omega_1)t) \quad (3)$$

여기서 비선형 성분인 IMD3의 크기는 $\frac{3}{4} a_3 A^3$ 이고, 이를 제어하기 위하여 선 왜곡된 입력전류 (I) 는 2f₁- f₂, 2f₂- f₁ 의 주파수에 크기가 B 이고, 위상의 변환 정도가 (φ) 인 IMD3 성분을 생성하면 다음과 같다.

$$I = A(\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) + B(\cos((2\omega_1 \pm \omega_2)t + \phi) + \cos((2\omega_2 \pm \omega_1)t + \phi)) \quad (4)$$

원 신호와 왜곡된 신호에 의한 LD의 광 전력 크기 중 다른 성분들을 모두 무시하고 제어를 위한 IMD3성분의 출력 크기는 다음과 같다.

$$\frac{3}{4} a_3 A^3 (\cos(2\omega_1 \pm \omega_2)t + \cos(2\omega_2 \pm \omega_1)t) + Ba_1 (\cos((2\omega_1 \pm \omega_2)t + \phi) + \cos((2\omega_2 \pm \omega_1)t + \phi)) \quad (5)$$

이때 비선형 성분인 IMD3 성분을 상쇄할 수 있는 크기가 $\frac{3}{4} a_3 A^3 = Ba_1$ 이고, 위상 φ=180° 를 만족할 때 가장 높은 성향상을 볼 수 있다.

Optoelectronic predistortion technique

그림 2는 제안된 광전자 프리디스토션 기법의 구성도이다. 광전자 프리디스토션 기법은 2개의 루프로 구성되어 있다. 메인 루프는 선 왜곡 신호 생성루프이고, 보조 루프는 에리 신호 생성 루프이다. 보조 루프의 Slave LD (SLD)에서 직접 변조 시 전/광 변환하는 과정에서 발생된 비선형 성분이 포함된 신호는 적절한 위상 천이와 증폭 혹은 감쇄를 통하여 들어온 RF 신호와 벡터적 결합으로 비선형 성분인 에리신호만 추출되고, 이 에리신호는 메인 루프에서 들어온 원 신호인 RF 신호와 결합하여 선 왜곡된 신호를 생성한다. 여기서 생성된 선 왜곡 신호는 Master LD (MLD)에서 직접 변조 시 전/광 변환하는 과정에서 생기는 왜곡신호 성분과 벡터적 결합으로 왜곡신호 성분만 감쇄 혹은 제거되어 선형성이 향상된 RF 신호가 된다.

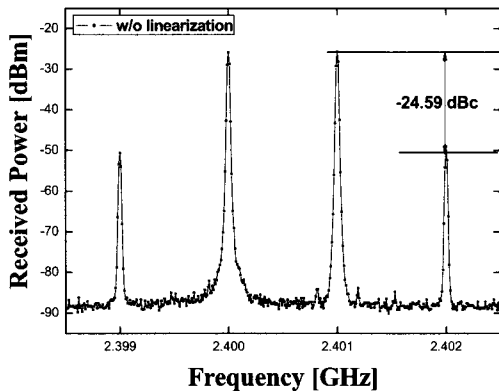
Experiments and results

제작된 광전자 프리디스토션은 광 부품인 2개의 Distributed Feedback Laser Diode (DFB-LD)와 Photodiode (PD) 그리고 RF 부품인 감쇄기, 위상 천이기, RF 결합/분배기, RF 증폭기로 구성되어 있다.

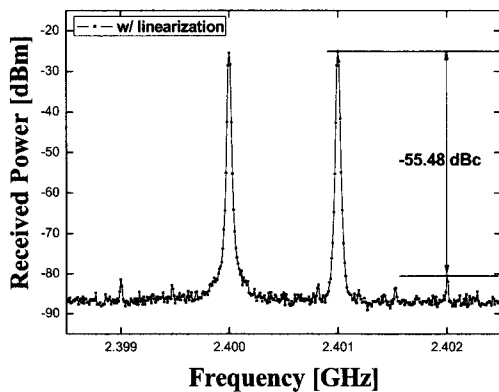
제작된 광 송신기의 선형성을 측정하기 위해 two-tone 실험을 하였다. 입력 RF 신호의 전력은 0 dBm 이고, 주파수는 2.4 GHz 와 2.401 GHz 로 주파수 간격이 1 MHz 되도록 설정하였다. 높은 선형성 향상을 보기 위하여 보조 루프의 SLD

는 Teradian사의 파장이 1550 nm인 Digital DFB-LD를 사용하였고, 구동전류를 인위적으로 임계전류 근처의 값인 12 mA로 설정하여 3차 상호변조 신호인 IMD3 성분이 약 -50 dBm이 되도록 하였다. 송신부인 MLD는 Teradian사의 파장이 1550 nm인 Analog DFB-LD를 사용하였다. 또한 RF 위상변위기와 감쇄기는 Hybrid type 으로 구성하여 정확한 크기와 위상을 조절할 수 있도록 하였다.

그림 3은 two-tone 실험결과이다. 이때 Resolution Bandwidth (RBW) 는 10 kHz이고, Video Bandwidth (VBW) 는 300 kHz 로 측정하였다. 그림 3(a) 에서 프리디스토션 기법을 사용하지 않았을 때, 3차 상호변조 왜곡신호인 IMD3는 -24.59 dBc 이고, 그림 3(b) 에서 선형화 보상기법을 적용 했을 때, IMD3가 -55.48 dBc 로 수신단에서 측정된 IMD3는 약 30 dB 의 성능 향상을 보였다.



(a)



(b)

그림 3. two-tone 실험 결과 : (a) 선형화 보상기법 사용하지 않음. (b) 선형화 보상기법 사용함.

Fig 3. Results of two-tone test : (a) free-running (b) with linearization

그림 4는 변조 주파수의 변화에 따른 출력 결과이다. 주파수 간격은 1 MHz 로 동일하고 중심 주파수는 2.2 GHz 에서 2.55 GHz 까지 10 MHz 씩 변화시켰다. 이때 주파수 이외의 모든 조건은 동일시 하여 측정하였다. IMD3의 10 dB 이상 성능 향상 범위는 약 50 MHz 이다. 변조 주파수를 변화

시키면 LD의 주파수 응답이 달라지고 이에 따라 왜곡신호의 위상 혹은 크기에 대한 제어가 달라져야 함을 의미한다.

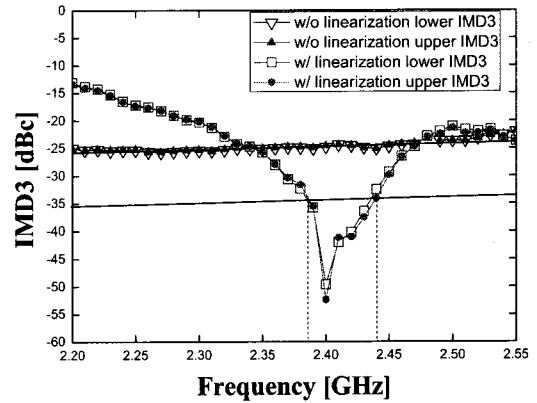


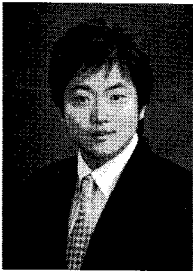
그림 4. 주파수의 변화에 따른 출력 결과
Fig 4. Results of frequency variation

III. 결론

이 논문에서 광 소자인 DFB-LD의 비선형성을 이용한 광 전자 프리디스토션을 제안하여 광 송신기를 제작하였고, 실험적으로 증명하였다. 프리디스토션 기법에 광전자소자를 사용함으로써 기존의 전자소자의 주파수 응답 한계를 극복하여 광대역으로 동작이 가능한 송신기를 향후 제작할 것이다.

참고문헌

- [1] A. J Seeds and K. J Williams, Microwave photonics," *J. Lightw. Technol.*, 24, 4628–4641 (2006).
- [2] D. Wake, M. Webster, G. Wimpenny, K. Beacham, L. Crawford, M. Photonics and U. K. Suffolk, Radio over fiber for mobile communications," *Microwave Photonics, 2004. MWP'04. 2004 IEEE International Topical Meeting on*, 157 (2004).
- [3] T. E. Darcie, Subcarrier multiplexing for lightwave networks and videodistribution systems," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 8, 1240 (1990).
- [4] Yon-Tae Moon, In Woo ang, Woon-Kyung Choi and Y.-W. Choi, Simultaneous noise and distortion reduction of a broadband optical feedforward transmitter for multi-service operation in radio-over-fiber systems," *Optics Express*, Vol.15 / No.19 pp 12167 ~ 12173 (2007).
- [5] I. H. Choi, S. H. Lee, H. C. Kwon, Y. W. Choi and S. K. Han, Compensation of intermodulation distortion of laser diode by using optoelectronically predistorted signals," *Microwave and optical technology letters(Print)*, 48, 1144 (2006).
- [6] L. Roselli, V. Borgioni, F. Zapparelli, F. Ambrosi, M. Comez, P. Faccin and A. Casini, Analog laser predistortion for multiservice radio-over-fiber systems," *Lightwave Technology, Journal of*, 21, 1211 (2003).



이 태 경

2008 년 중앙대학교 전자전기공학부(공학사), 2008 년 ~ 현재 중앙대학교 일반대학원 석사과정 재학 중. 관심 분야는 Radio-over-fiber system, Feedforward and predistortion linearization method, Analog circuit design (RFIC).



문 연 태

2003 년 중앙대학교 전자전기공학부(공학사). 2005 년 중앙대학교 전자전기공학부(공학석사). 2005 년 ~ 현재 중앙대학교 일반대학원 박사과정 수료. 관심 분야는 Radio-over-fiber system, Feedforward and predistortion linearization method, Optical device (Photodetector, Modulator), Analog circuit design (RFIC)



최 영 완

1985 년 서강대학교 전자공학과 (공학사). 1987 년 SUNY at Buffalo, 전기 및 컴퓨터공학과(공학석사). 1992 년 SUNY at Buffalo, 전기 및 컴퓨터공학과(공학박사). 1992 년 ~ 1995 년 한국전자통신연구원(ETRI) 선임 연구원. 1995 년 ~ 현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수. < 주관심 분야: Microwave-Photonics, Bio-sensor system(devices and circuit), RFIC >

자전기공학부 교수. < 주관심 분야: Microwave-Photonics, Bio-sensor system(devices and circuit), RFIC >