

유무선 통합시스템을 위한 마이크로파 회로 모델링 기반의 광전자 프리디스토션 광송신기의 설계 및 제작

논 문
60-4-23

Systematic Design and Realization of opto-electrical Predistortion Optical Transmitter based on Microwave Circuit Modeling for Radio-over-Fiber Systems

이 태 경* · 김 홍 승* · 오 금 윤* · 김 두 근** · 최 영 완†
(Tae-Kyeong Lee · Hong-Seung Kim · Guem-Yoon Oh · Doo-Gun Kim · Young-Wan Choi)

Abstract - We have systematically designed and experimentally demonstrated the opto-electrical predistortion optical transmitter using microwave circuit modelling for reducing the nonlinearity of the distributed-feedback laser diode (DFB-LD). The DFB-LD is analyzed using microwave circuits model based on rate equations. Through the system-level simulation for predistortion method, the optimized characteristics of the RF components in the system are confirmed. The simulated and experimental results show the reduced distortion products. These results are analyzed as the evaluation parameters for the miniaturization and optimization of the opto-electrical predistortion method in radio-over-fiber systems.

Key Words : Predistortion, Intermodulation distortion, Nonlinearity, Distributed-feedback laser diode

1. 서 론

최근 이동통신의 급격한 발달로 인하여 넓은 대역폭 혹은 높은 데이터 전송률을 가진 고속의 통신 서비스에 대한 고객의 요구는 날이 증가하고 있으며, 보다 나은 Quality of Service (QoS) 는 건물들 사이의 음영지역이나 지하 같은 전파 고립지역에서부터 전파환경이 우수한 아파트나 인구 밀집지역까지 원하고 있다. 이러한 상황에서 유·무선 통합 시스템인 Radio-over-Fiber(RoF) 시스템은 그 대안으로 연구되고 있다. RoF 시스템은 이동성의 장점을 가진 이동통신 기술과 Central station 에서 Base station 혹은 Access point 까지 간섭이 없고, 손실이 적은 광통신 시스템이 결합한 통신 방식으로 마이크로파 대역의 신호를 직접 원격 안테나로 보내기 때문에 동축 케이블을 사용하는 기존의 방식에 있는 주파수 변환 회로가 필요하지 않다. 그러므로 원격 안테나의 구성이 간단해지고 이는 전체 시스템의 구축비용 및 관리 등의 면에서 장점을 갖는다[1].

RoF 시스템에서 사용되는 방식 중 가장 일반적으로 레이저 다이오드(LD)에 마이크로파 대역인 RF 신호를 직접 변조하는 아날로그 Sub-carrier multiplexing (SCM) 광 전송 방식을 사용한다. 아날로그 SCM 광 전송방식은 그 구성이 간단하여 널리 이용되고 있다. 일반적으로 SCM 방식은 RoF 시스템에서 중요한 부품인 distributed-feedback laser

diode (DFB-LD) 를 직접 변조하는 방식이 많이 이용되는데, 이는 가격 면에서 장점을 갖고 있다. 하지만 DFB-LD는 비선형 특성을 갖고 있으며, LD 의 비선형성은 3 차 상호변조 왜곡신호를 발생시키고 이는 전체 시스템의 성능을 열화시킨다. 그러므로 비선형 왜곡 현상을 개선하기 위해 피드포워드 (Feed-forward), 백오프 (Back-off), 프리디스토션 (Predistortion) 기법 같은 여러 방식들이 연구되고 있다 [2-4]. 이들 선형화 기법 중 프리디스토션 기법은 기존의 전기회로에서 증폭기의 선형화에 주로 쓰이는 기법으로 광 링크에서는 아날로그 RF 신호를 레이저 다이오드로 변조할 때 생기게 되는 비선형성을 제거하기 위해 송신기에 신호를 입력하기 전에 미리 원 신호를 왜곡시켜서 입력하는 방식으로 이용된다. 프리디스토션 기법은 주로 전기회로를 이용한 방법이 제안 되는데, 이는 레이저 다이오드와 선 왜곡 회로 간의 주파수 응답 특성이 차이가 있어서 높은 선형성 향상 혹은 넓은 동작영역을 갖기 어렵고, 또한 기존의 광전자 소자를 이용한 프리디스토션 기법은 주파수 변화 이외의 다른 조건을 고정시켰을 때, 광대역으로 동작하기 어렵다.

본 연구에서는 기존 기법의 단점을 극복하기 위해 두 개의 루프를 구성된 광전자 프리디스토션 기법을 제안하였다. 제안한 방식은 선왜곡 신호를 만들기 위하여 전기소자와 광전자 소자를 이용하였기 때문에 두 개의 루프를 구성하기 위해서는 정확한 계산이 필요하게 된다. 그러므로 광전자 소자인 DFB-LD를 분석하기 위하여 rate equation을 기반으로 microwave simulator의 파라미터를 추출하여 모델링 하였으며, 이를 기반으로 시스템 레벨의 시뮬레이션을 통하여 제안한 광전자 프리디스토션 기법의 가능성을 검토하였다. 이를 제작하여 높은 선형성 향상을 보였으며, 외부 조건의 변화 없이 주파수의 변화에 따른 넓은 동작영역을 갖는 광송신기를 실험적으로 증명하였다.

* 정 회 원 : 중앙대 공대 전자전기공학부 박사과정

** 정 회 원 : 한국광기술원 광융합시스템 연구소 센터장

† 교신저자, 정회원 : 중앙대 전자전기공학부 교수

E-mail : ychoi@cau.ac.kr

접수일자 : 2011년 3월 9일

최종완료 : 2011년 3월 21일

2. 본 론

2.1 Distributed-feedback laser diode의 회로 모델링

LD를 이용한 시스템의 성능을 예측하기 위해서는 LD의 모델링이 필요한데, 이때 동작특성을 표현하는 가장 기본적인 모델링은 rate equation을 이용하여 파라미터를 추출하는 것이다. 이는 여러 분야에서 사용되고 있으며, 지금까지 많은 논문에 의해 검증되어 왔다.

LD의 rate equation은 LD의 변수들을 바탕으로 하여 전자 밀도 (electron density), N ($1/m^3$) 과 광자 밀도 (photon density), S ($1/m^3$) 가 시간영역에서 어떻게 변하는가를 보여준다. 이러한 rate equation을 기반으로 LD의 변수들을 L-I curve, 주파수 응답특성, 광섬유 응답 함수의 세 가지 측정을 통해 추출할 수 있고, 이를 바탕으로 전자 밀도와 광자 밀도를 얻을 수 있다[5, 6].

$$\frac{dS(t)}{dt} = \Gamma g_0 \frac{N(t) - N_t}{1 + \epsilon S(t)} S(t) - \frac{S(t)}{\tau_p} + \frac{\Gamma \beta}{\tau_n} N(t) \quad (1)$$

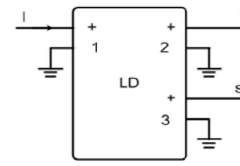
$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I}{qV} - \frac{N(t)}{\tau_n} - g_0 \frac{N(t) - N_t}{1 + \epsilon S(t)} S(t) \quad (2)$$

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{\alpha}{2} [\Gamma g_0 (N(t) - N_t)] \quad (3)$$

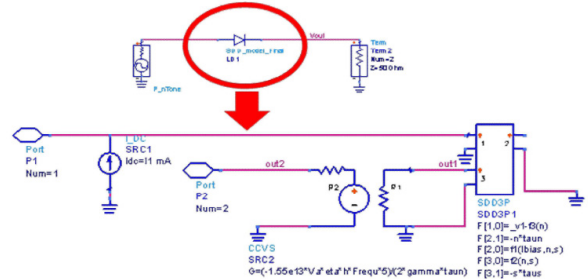
$$P(t) = \frac{V \eta h \nu}{2 \Gamma \tau_p} S(t) \quad (4)$$

식 (1-4)는 파라미터 추출을 위한 nonlinear gain compression을 고려한 일반적인 rate equation 모델이다. 식 (1-3)은 laser cavity 안의 광 field와 carrier density의 상호 작용을 통한 lasing process를 나타낸 것이고, 식 (4)는 photon density와 출력 광 파워와의 관계를 나타내고 있다 [7]. 실제 Laser diode의 L-I curve, 주파수 응답의 차, 광섬유 응답 함수 등의 실험과 위의 이론을 기반으로 fitting하면 DFB-LD를 모델링하기 위한 parameter를 모두 추출할 수 있다. 우리는 parameter를 추출하기 위하여 $1.55 \mu m$ 파장과 11.282 mA의 임계전류를 갖고, Multi quantum well 구조의 pigtailed package 되어있는 uncooled DFB-LD를 사용하였다.

기존의 연구된 LD의 회로 모델들은 small signal과 large signal 분석을 위해 rate equation을 바탕으로 등가 회로로 모델링 되었고 실제 측정 결과와 비교, 분석을 통해 모델의 정확성을 입증 하고자 하였다. 하지만 바이어스 조건이나 온도 변화와 같은 실험 조건을 바탕으로 계산을 통해 소자 값을 결정하는 구조이기 때문에 바이어스 조건을 변화시키면서 실험을 하기에는 그 과정이 복잡하여 많은 시간이 필요로 한다.



(a)



(b)

그림 1 (a) ADS 마이크로파 모의실험 장치에서 SDD 모델; (b) DFB-LD의 SDD 모델을 위한 회로 구성도
Fig. 1 (a) Symbolically-Defined Device (SDD) model in ADS microwave simulator (b) Schematic symbol for the SDD model of DFB laser diode

그림 1(a)에서 Agilent ADS의 Symbolically Defined Device(SDD)는 n-port 소자로써 각각의 포트의 전류와 전압을 서로의 상관관계 함수에 의해 정의한다. 본 논문에서 사용한 rate equation은 전류 I 와 n 그리고 s 에 의한 함수이므로 SDD3 소자를 이용하여 n 과 s 를 각각의 port의 전류로 치환하게 되면 전류에 의한 n 과 s 의 변화를 구할 수 있고, 이렇게 얻은 s 를 광 파워로 변환하면 효과적으로 레이저 다이오드를 모델링하게 된다. 또한 기존의 LD의 회로 모델과는 달리 바이어스 조건을 직접 입력 해 줄 수 있기 때문에 바이어스 조건에 따라 다른 값의 소자를 사용해야 하는 회로 모델보다 사용하는데 있어 용이한 점이 있다. 그림 1(b)에서 SDD model을 이용한 uncooled DFB-LD의 회로 모델링을 보여준다. 이때 DFB-LD를 측정하기 위해서 matching circuits을 구성하였는데, 이때 사용된 circuits은 microstrip line theory를 바탕으로 구성하였으며, 중심 주파수는 2.4 GHz를 기준으로 제작하였다.

그림 2(a)에서와 같이 L-I curve를 측정하기 위하여 DFB-LD의 bias current를 0 mA에서 30 mA까지 1 mA씩 변화시켜 입력하고, 이때 출력은 optical powermeter를 이용하여 측정하였다. 그림 2(b)는 E/O response에 대한 측정 및 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 측정하기 위하여 18 mA의 current를 인가시키고, Network Analyzer (NA)를 이용하여 RF 신호를 직접 변조하여 측정하였다. 이때 output power는 TTI (Terahertz Technologies Inc.) 사의 TIA가 포함되어있는 O/E converter를 사용하여 신호를 검출하여 다시 NA로 S-parameter의 S21을 측정하였다.

그림 3은 two-tone 측정결과 및 모의실험 결과를 나타내고 있다. RF 신호는 Wiltron 사와 Agilent 사의 RF signal generator를 사용하였고, 직접 변조된 신호는 O/E converter를 통과하여 Anritsu사의 RF Spectrum Analyzer (SA)로

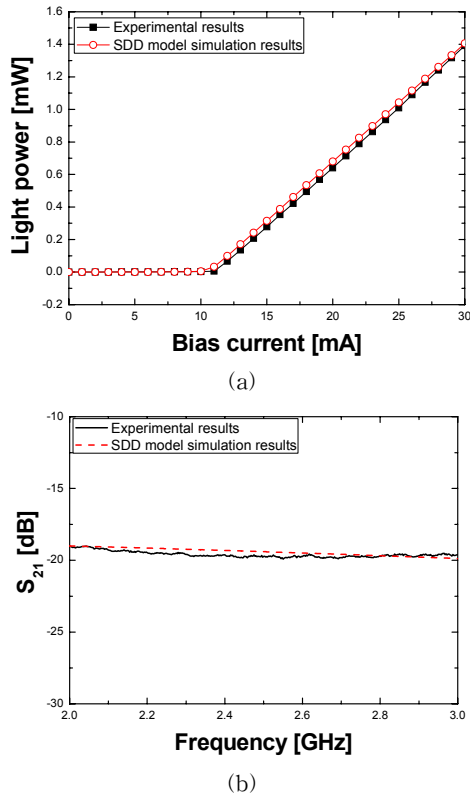


그림 2 DFB-LD를 분석하기 위한 모의실험 및 측정 결과: (a) L-I curve 결과 비교; (b) 주파수 응답 특성 비교
 Fig. 2 Simulation and experimental results for analysis of DFB-LD: (a) Comparison of L-I curve in simulation and experiment results; (b) Comparison of characteristic of frequency response in simulation and experiment results

측정하였다. 그림 3(a)와 (b)는 각각 1 MHz, 10 MHz의 channel spacing을 갖는 two-tone에 대하여 실험하였다. 그림 2-3에서 실제 측정결과와 시뮬레이션 결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었으며, 이 모델링 회로를 simulator 상에서 하나의 소자로 설정할 수 있기 때문에 광 송신기의 전체 회로를 구성할 수 있게 되어 제작될 광 송신기의 성능을 미리 분석해 볼 수 있고, 제작과정에서 생기는 문제점을 미리 예상할 수 있다.

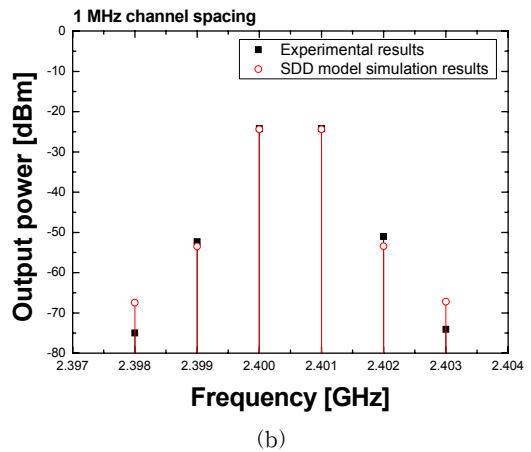
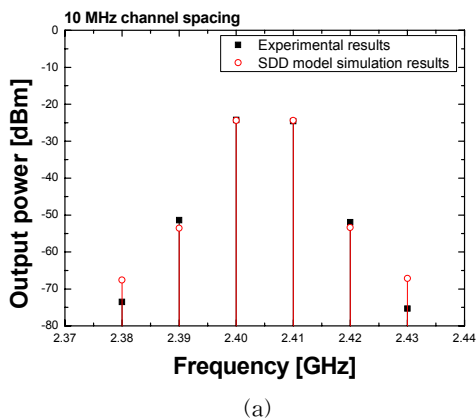


그림 3 DFB-LD의 two-tone 측정 결과 및 모의실험 결과 비교: (a) 1 MHz의 채널 대역폭; (b) 10 MHz의 채널 대역폭
 Fig. 3 Comparison of simulation and experimental results for analysis of DFB-LD: (a) 1 MHz channel spacing; (b) 10 MHz channel spacing

2.2 제안하는 광전자 프리디스토션 기법 및 모의 실험

앞에서 설명한 SCM 광 전송 시스템에서 LD의 비선형성은 시스템 전체의 성능을 열화 시킨다. 이를 개선하기 위하여 본 논문에서는 광전자 프리디스토션 기법을 제안하고자 한다. 그림 4는 제안하는 광전자 프리디스토션 기법을 나타내고 있다. 입력된 RF 신호는 divider에 의하여 나누어져서 slave laser diode (SLD)로 입력된다. 입력된 RF 신호는 SLD에서 직접 변조하여 전/광 변환 되고, photo detector (PD)에 의해 광/전 변환 된다. 이 과정에서 SLD의 비선형성에 의해 비선형 성분인 IMD3 신호가 발생되고, 감쇄기와 위상 천이기를 통과한 중심 신호와 결합기에서 벡터적으로 결합하여 중심 신호가 제거된 에러 신호만을 추출할 수 있다. 이렇게 추출된 에러 신호는 main loop의 전기적 지연선로에 의해 전송된 중심 신호와 벡터적 결합하여 선 왜곡된 신호가 만들어 지게 된다. 여기서 생성된 선 왜곡 신호는 중심 신호가 master LD (MLD)에 입력되어 직접 변조시 전/광 변환하는 과정에서 생기는 왜곡신호 성분과 벡터적 결합으로 왜곡신호 성분만 감쇄 혹은 제거되어 선형성이 향상된 RF 신호가 된다.

그림 5는 그림 1에서 모델링한 DFB-LD의 마이크로웨이브 회로를 이용하여 시스템 레벨에서 모의실험하기 위한 회로 구성도를 나타내고 있다. 프리디스토션을 구성하고 있는 요소 중에서 전압 가변 감쇄기는 통신 시스템에서 수신기나 송신기의 이득 컨트롤, RF 신호원의 크기 조정과 같은 목적으로 많이 사용되고 있다. 제안된 구조에서는 main loop와 minor loop에서 전력 결합기를 통해 각각의 루프의 신호를 합성한다. 이때 정확한 합성 결과를 얻기 위해서는 합성되는 두 가지의 신호는 같은 크기를 가져야 하므로 신호의 크기 조정을 위해 전압 가변 감쇄기가 사용되어야 한다. 프리디스토션 광 송신기에 사용되는 전압 가변 감쇄기는 하이브리드 커플러와 편 다이오드를 이용하여 하이브리드 커플러

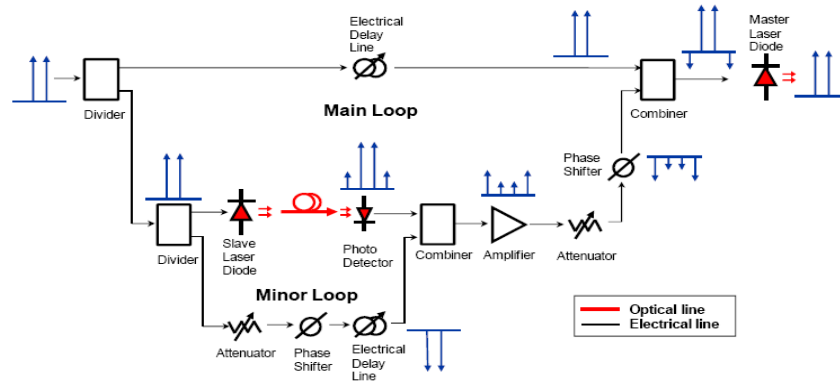


그림 4 제안하는 광전자 프리디스토션 기법
 Fig. 4 Proposed opto-electrical predistortion method

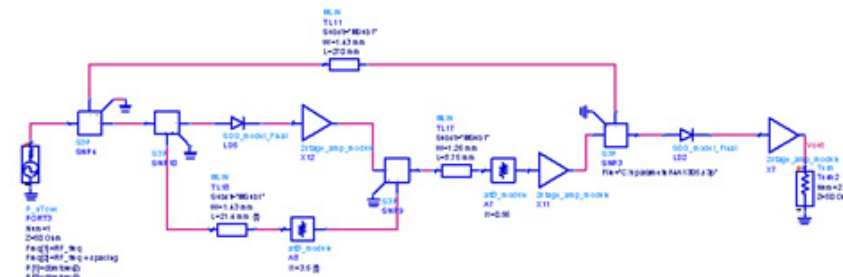


그림 5 프리디스토션 광 송신기의 시스템 레벨의 모의실험 회로 구성도
 Fig. 5 Schematic of system-level simulation in predistortion optical transmitter

의 2, 3 포트의 임피던스를 변화시켜 1 포트에서 4 포트로 가는 RF 신호의 크기를 변화시켜주는 가변 감쇄기가 사용되었다. 여기서 사용된 하이브리드 커플러는 소자의 기본적인 특성에 대한 데이터인 s4p 파일을 이용하였고, 전압 가변 감쇄기에 사용되는 PIN 다이오드는 제조회사에서 제공된 회로 모델을 이용하여 모델링 하였다. RF 증폭기 또한 하이브리드 형태로 제작된 증폭기의 성능과 같은 성능을 얻기 위해 gain block 칩을 사용하였고, 매칭을 위하여 L 과 C, 그리고 마이크로스트립 라인을 사용하였으며, 칩 제조사에서 제공된 s2p 파일을 이용하여 구성하였다.

모의실험 과정은 실제 광 송신기 측정과 같은 과정으로 먼저 s-parameter 시뮬레이션을 통해 Minor loop 에서의 크기와 위상을 결정 하였고, Minor loop 의 electrical path 를 제거하고 optical path 만 연결한 후, Main loop 의 electrical path 를 연결하고 Main loop 에서의 감쇄기와 전기적 지연선로를 이용하여 크기 및 위상을 결정하여 최종 출력 단에서의 출력확인 하였다. 이미 결정된 광소자와 전자 소자들의 조건들을 바탕으로 harmonic balance 모의실험을 실행하여 투톤 테스트를 수행하였다.

이때 2.2 GHz 대역을 기준으로 1 MHz의 channel spacing을 갖도록 RF 신호를 입력하였으며 electrical, optical path의 크기와 위상을 조절하여 중심 RF 신호가 상쇄 되는 것을 확인하였다. 그림 6은 전체 시스템에서 선형화 기법을 적용하였을 때와 적용하지 않았을 때의 two-tone 모의실험 결과 그래프이다. 모의실험 결과 IMD3는 약 40 dB의 성능 향상을 보였다.

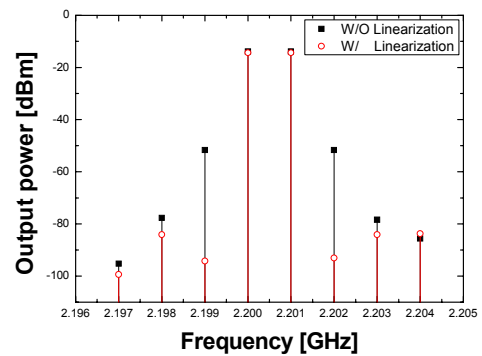


그림 6 프리디스토션 광 송신기의 시스템 레벨의 모의실험에서 two-tone 모의실험 결과
 Fig. 6 System-level simulation results of two-tone test in predistortion optical transmitter

2.3 제안된 구조의 선형화 실험 결과

제작된 광전자 프리디스토션 광 송신기에 사용된 SLD는 1550 nm 파장 대역을 갖는 Teradian 사의 디지털용 uncooled DFB-LD 를 사용하였고, MLD 는 동일한 제조사의 Analog type의 uncooled DFB-LD를 사용하였다. 이때 출력 광 파워는 각각 -10.1 dBm, -6 dBm이고, 제안된 기법의 선형성 정도를 확인하기 위하여 bias current는 threshold current 근처인 12 mA로 동일하게 구성하여 인위적으로 높은 비선형성을 보이도록 하였다. 그림 4.3.1과 같이

백투백으로 연결된 구성으로 two-tone 실험에서 신호발생기인 Wiltron사의 6759B 와 Anritsu사의 MG3692B를 이용하여 2.2 GHz와 2.201 GHz의 1 MHz 채널 대역폭을 갖는 RF 신호를 입력하였다. 이때 입력한 RF의 크기로 0 dBm 을 인가시켰다. 광 송신기를 이용하여 신호를 전송한 후 TTI 사의 TIA-3000 O/E converter 를 이용하여 신호를 수신하고, 그 신호는 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정하였다. 이때 resolution bandwidth (RBW) 는 10 kHz이고, video bandwidth (VBW) 는 300 kHz 로 측정하였다. 그림 7(a)에서 실험 결과 선형화 기법을 적용하지 않았을 때 IMD3 는 -24.59 dBc 였고, 그림 7(b)에서 선형화 기법을 적용하였을 때 IMD3 는 -55.48 dBc 로 수신단에서 측정된 IMD3 는 약 30 dB 의 성능 향상을 보였다.

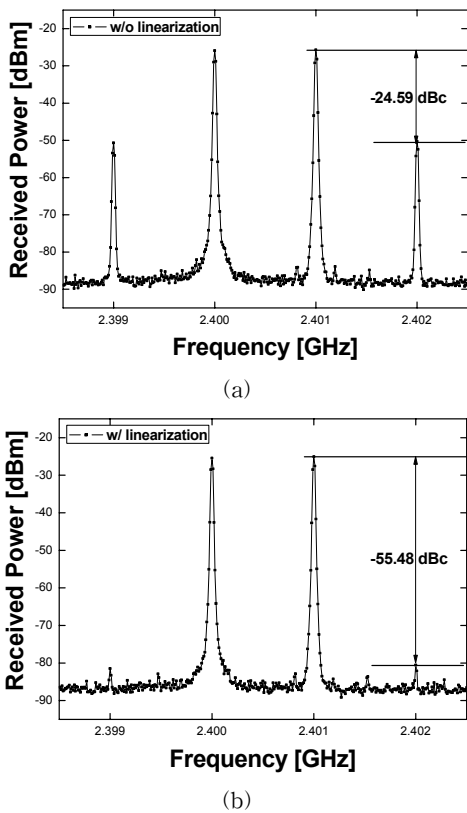


그림 7 제안된 구조를 갖는 광 송신기 전체 시스템의 two-tone 실험 결과: (a) 선형화 기법을 적용하지 않았을 때; (b) 선형화 기법을 적용하였을 때
 Fig. 7 Comparison of two-tone test results in overall system: (a) With linearization method; (b) Without predistortion method

그림 8(a)는 변조 주파수의 변화에 따른 출력 결과 그래프이다. 주파수 간격은 1 MHz 로 동일하고 중심주파수는 2.2 GHz 에서 2.55 GHz 까지 10 MHz 의 단위로 변화시켰다. 실험셋업은 그대로 유지하고, 이때 주파수 이외의 모든 조건은 two-tone 실험과 동일시하여 측정하였다. 그림 8(a)에서 IMD3 의 10 dB 이상 성능 향상 범위는 2.39 GHz에서 2.43 GHz 까지 약 40 MHz 이다. 이때 광 송신기는 2.4 GHz 에 맞추어서 최적화를 하였기 때문에 그와 같은 결과

를 얻을 수 있었다. 실험결과에서 변조 주파수를 변화 시키면 LD의 주파수 응답이 달라지고 이에 따른 왜곡신호의 위상 혹은 크기에 대한 제어가 달라져야 함을 의미한다.

그림 8(b)는 RF 입력 크기의 변화에 따른 출력 결과 그래프이다. 중심주파수는 1 MHz의 주파수 간격을 갖는 2.4 GHz와 2.401 GHz로 하고, RF 입력 신호의 크기를 -5 dBm 에서 3 dBm까지 1 dB씩 증가 시켜주면서 측정하였다. 실험 setup은 그대로 유지하고, 이때 입력 신호의 크기 이외의 모든 조건은 two-tone 실험과 동일시하여 측정하였다. 프리디스토션 기법에서 성능 향상을 보이기 위해서는 electrical path와 error signal generation path에서 IM3의 크기가 동일하고 위상이 180° 차이가 나야 한다. 하지만 그림 8(b)와 같이 0 dBm의 한 지점에서 성능향상을 보였다. 이는 입력 신호의 크기에 따라 두 path에서 IM3 의 크기가 일정하지 않아서 다음과 같은 결과를 나타내는 것이다. 그러므로 Spurious Free Dynamic Range 를 향상시키기 위해서는 RF 입력 크기에 따라서 조절을 해야 한다.

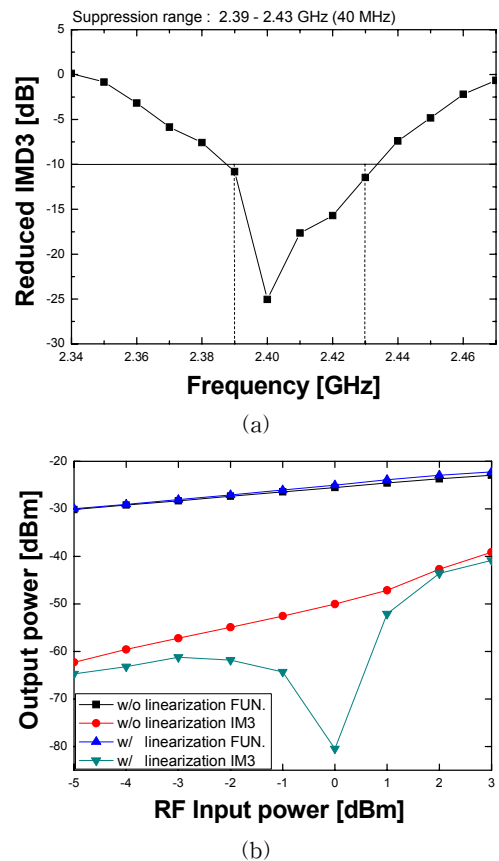


그림 8 제작된 프리디스토션 광 송신기의 동작 특성 측정: (a) 주파수에 따른 동작대역 측정 결과; (b) 입력 RF 신호의 크기에 따른 전체 시스템의 출력 변화 측정 결과

Fig. 8 Operation characteristic of realized predistortion optical transmitter: (a) Dynamic range according to frequency variation; (b) Output power variation of overall system according to change of input RF power

3. 결 론

비선형 소자인 laser diode는 RoF 링크에서 매우 중요한 소자로 사용된다. 그러므로 비선형 성분을 제거하기 위해 DFB-LD의 microwave circuits modeling을 통하여 system-level의 모의실험을 하였고, 이를 기반으로 약 30 dB의 높은 선형성 개선 정도를 갖는 선형 광 송신기를 제작하여 실험적으로 증명하였다. 또한 실험 결과로 중심주파수가 2.39 GHz에서 2.43 GHz까지 약 40 MHz 범위에서 10 dB 이상의 선형성 개선 효과를 보였다.

본 논문에서 이용한 모의실험은 다양한 조건에서 제작 될 수 있는 프리디스토션 광 송신기를 제작하는데 있어 전기소자와 광전자 소자의 주파수 응답 특성 등의 결과를 미리 확인 할 수 있고, 제작시의 문제점에 대해 대비할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 방법은 다른 방식의 선형화 기법을 제안하고 제안된 방법의 타당성을 확인하는 과정에서 유용하게 사용 될 것이라 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2010-0014612 및 No. 2011-0002497)을 받고, 2009년도 정부(교육과학기술)의 재원으로 한국연구재단의 대학중점연구소 지원 사업으로 수행된 연구임(2009-0093817)

참 고 문 헌

[1] A. J. Cooper, "Fibre/radio for the provision of cordless/mobile telephony services in the access network," *Electron. Lett.*, 26(24), 2054-2056, 1990.

[2] Y. T. Moon, J. W. Jang, W. K. 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*, 15(19), 12167-12173, 2007.

[3] H. D. Jung, D. H. Jeon, and S. K. Han, "Linearity Enhancement of an Electroabsorption Modulated Laser by Dual-Parallel Modulation," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 14(4), 2002.

[4] L. Roselli, V. Borgioni, F. Zepparelli, F. Ambrosi, M. Comez, P. Faccin, and A. Casini, "Analog laser predistortion for multiservice radio-over-fiber systems," *J. Lightw. Technol.*, 21(5), 1211-1223, 2003.

[5] S. A. Javro and S. M. Kang, "Transforming Tucker's linearized laser rate equations to a form that has a single solution region," *J. Lightw. Technol.* 13, 1899 - 1904, 1995.

[6] J. C. Cartledge and R. C. Srinivasan, "Extraction of DFB laser rate equation parameters for system simulation purpose," *J. Lightw. Technol.* 15, 852 - 860, 1997.

[7] S. J. Zhang, N. H. Zhu, E. Y. B. Pun, and P. S. Chung, "Rate-equation based circuit model of high-speed semiconductor lasers," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, 49, 539 - 542, 2007.

저 자 소 개



이 태 경 (李 泰 景)

2008년 중앙대학교 전자전기공학부 학사 졸업.
 2010년 중앙대학교 전자전기공학부 석사 졸업.
 2010년~중앙대학교 전자전기공학부 박사과정.
 <주관심분야 : Microwave Photonics, 광통신, 광소자, 바이오센서>



김 홍 승 (金 弘 昇)

2008년 중앙대학교 전자전기공학부 학사 졸업.
 2010년 중앙대학교 전자전기공학부 석사 졸업.
 2010년~중앙대학교 전자전기공학부 박사과정.
 <주관심분야 : 집적 광학소자, Plasmonics, 바이오센서>



오 금 윤 (吳 錦 潤)

2007년 중앙대학교 전자전기공학부 학사 졸업.
 2009년 중앙대학교 전자전기공학부 석사 졸업.
 2009년~중앙대학교 전자전기공학부 박사과정.
 <주관심분야 : 집적 광학소자, Plasmonics, 바이오센서>



김 두 근 (金 斗 根)

1998년 중앙대학교 전자전기공학부 학사 졸업.

2000년 중앙대학교 전자전기공학부 석사 졸업.

2003년 중앙대학교 전자전기공학부 박사 졸업.

2003년~2005년 University of California Santa Barbara 박사후 연구원

2006년~2007년 중앙대학교 초빙교수

2007년~2008년 중앙대학교 전임연구원

2009년~한국광기술원 선임연구원(센터장)

<주관심분야 : 집적 광학소자, Plasmonics, 바이오센서>



최 영 완 (崔 永 完)

1985년 서강대학교 전자공학과 학사 졸업.

1987년 State University of New York at Buffalo, 전기 및 컴퓨터 공학 석사 졸업.

1992년 State University of New York at Buffalo, 전기 및 컴퓨터 공학 박사 졸업.

1992년~1995년 한국전자통신연구원(ETRI) 전임연구원

1995년~현재 중앙대학교 전자공학과 교수.

<주관심분야 : 광전자, 광통신, 광소자, Microwave Photonics, Plasmonics, Bio-sensor system>