

논문 2007-44SD-4-1

## 피드포워드 보상회로를 이용한 광대역 광송신기

( Broadband Optical Transmitter using Feedforward Compensation Circuit )

윤 영 설\*, 이 준 재\*, 문 연 태\*\*, 김 도 균\*\*, 최 영 완\*

( Young-Seol Yun, Joon-Jae Lee, Yon-Tae Moon, Do-Gyun Kim, and Young-Wan Choi )

## 요 약

아날로그 광전송 시스템의 성능평가에 있어 광송신기의 선형성은 매우 중요한 파라미터이다. 본 논문에서는 피드포워드 보상회로를 적용한 광송신기에서 180도 하이브리드 커플러를 사용하여 위상천이기의 좁은 주파수 반응으로 인해 제한되었던 보상 대역폭을 확장한 새로운 방식의 광대역 아날로그 광송신기 특성에 대해 보고한다. 3차 혼변조 왜곡신호의 크기가 10 dB 이상 감소되는 보상 대역폭이 1.6 GHz를 중심으로 약 200 MHz 까지 확장됨을 확인하였다. 보상기법을 적용한 회로의 대역폭 측정은 네트워크 분석기를 활용하여 효율적으로 수행하였으며, 측정결과를 통해 그 효율성을 입증하였다. 디지털용으로 사용되는 저가의 레이저 다이오드를 사용하여 SFDR (Spurious-Free Dynamic Range)이 약 6 dB/Hz 개선됨을 실험적으로 확인하여 본 연구의 유효성을 검증하였다.

## Abstract

Linearity is the one of the most important features for analog-optic transmission system. In our research, the available bandwidth for the feed-forward compensation circuit is enhanced by using a 180 hybrid coupler in the circuit. The bandwidth having the decreased 3rd-order intermodulation distortion(IMD3) over 10 dB is extended over 200 MHz with the center frequency of 1.6 GHz. We performed an efficient bandwidth measurement for the feed-forward compensation system, which uses the network analyzer instead of the traditional measuring system that uses two RF signal generators and the spectrum analyzer. We identify the usefulness of this method from experimental results. In this study, we used cheap digital-purpose laser diodes for economical aspect, which proves the efficiency of the proposed analog system. The spurious-free dynamic range is improved about 6 dB/Hz.

**Keywords :** Analog optical links, Analog optical transmitter, Direct modulation, Feedforward compensation, Laser diode

## I. 서 론

셀룰러 이동통신, PCS(Personal Communication System) 등의 무선 통신 시스템들은 수 km이상의 넓은 지역을 커버할 수 있는 마이크로 셀 네트워크를 사용한다. 하지만 빌딩이 많은 도심지역이나 산악지역에서는 많은 장애물들로 인해 전파가 잘 전달되지 않는

음영지역이 발생하게 된다. 현재 사용되는 마이크로(Micro) 셀 단위의 네트워크 대신 피코(Pico)셀 단위의 네트워크의 사용은 음영지역 제거, 주파수 재사용 등의 측면에서 많은 이점이 있다. 이러한 무선 네트워크는 멀티미디어 서비스, 대용량 서비스 등 다양한 서비스를 수용하기 위해서 광통신 기술을 접목하는 유무선 통합 형태로 진행되고 있다. 특히 국내의 2세대 이동통신에서는 광증계기를 널리 이용하고 있으며, 3세대 이동통신용 시스템을 위해서도 광증계기를 다양하게 개발하고 있다. 광대역, 저손실의 특성을 가지는 광통신 기술은 증가하는 무선접속 네트워크의 용량을 수용할 수 있는 높은 잠재력을 보유하고 있으며, RF 기지국에 비해 상

\* 정회원, \*\* 학생회원 중앙대학교 전자전기공학부 (School of Electrical and Electronic Engineering, Chung-Ang University)

※ 본 논문은 2005년도 중앙대학교 박사 후 연수과정 지원사업에 의한 것임.

접수일자: 2006년11월17일, 수정완료일: 2007년3월9일

대적으로 저렴한 광증계기의 가격으로 인해 경제적인 이득도 제공한다. Optical link 시스템은 신호처리 기능의 대부분이 교환기에서 이루어지기 때문에 기지국에서 전기신호 처리를 최소화 할 수 있으므로 기지국 시스템의 단순화와 설치 및 유지비용의 절감 효과가 있다. 또한 현재 이동 통신용으로 할당된 주파수대역에서 변조가 가능한 광대역 특성과 함께 다양한 신호 포맷을 지원하는 유연성이 있다<sup>[1]</sup>. 일반적인 광전송시스템에서 광원을 변조하는 방법에는 직접 변조와 외부 변조가 있다. 외부변조는 chirp이 작고 잡음지수가 작다는 특성 때문에 기간 망에 많이 쓰이고, 직접 변조는 간단하고 저렴하다는 장점 때문에 도심 지역의 가입자 망에 많이 쓰인다. RF(Radio Frequency) 신호를 LD(Laser Diode)에 직접 변조하는 아날로그 광 전송방식은 2세대와 3세대 이동통신 대역폭을 수용할 수 있는 능력을 충족시켜야 한다. 다수의 이동통신 서비스의 수용은 하나의 LD에 다수의 반송파가 존재하는 것을 의미하며, 이로 인해 LD에 입력되는 신호의 전력레벨이 높아지게 되어 LD의 비선형 왜곡 성분이 기존의 단일 반송파를 수용하는 시스템에서 보다 더 심각한 영향을 미치게 된다<sup>[2]</sup>. 아날로그통신 시스템에서 3차 상호변조왜곡 신호의 발생은 시스템의 성능에 악영향을 미치게 되므로 기준치 이하로 줄여야 한다. 아날로그 광통신 시스템의 선형성을 개선하기 위한 방법으로는 백오프(Back-off), 전치왜곡(Pre-distortion), 피드포워드(Feedforward) 보상법 같은 방식들이 사용되고 있다. 전치왜곡 방식은 FP-LD(Fabry-Perot LD), MZM (Mach-Zehnder Modulator), DFB-LD(Distributed Feedback LD) 등의 광원을 사용하여 1990년대 후반부터 연구되어 왔다<sup>[3]</sup>. 이 방식은 구현이 쉽고 값이 저렴하나, 좁은 대역에서 동작하고 선형성 개선 값이 다른 방식에 비해 미약하다는 단점을 가지고 있다. 1990년대 초반부터 발전해온 피드포워드 보상법은 CATV(Cable Television) 시스템의 선형성을 개선시킨 연구와 FP-LD 잡음 레벨을 개선시킨 연구가 발표되었다<sup>[4-7]</sup>. 최근에는 5 GHz이하의 다양한 주파수 대역에서 연구가 이루어지고 있다<sup>[8-9]</sup>. 피드포워드 보상법은 신호 크기 및 위상 조절회로의 복잡성 때문에 제작과 시스템의 적용에 제한을 받아왔지만, 다른 방식에 비해 상대적으로 높은 선형성과 안정된 동작특성을 얻을 수 있어 지금도 활발히 연구가 진행 중에 있다.

본 연구에서는 피드포워드 보상법을 이용한 아날로그 광송신기의 선형성을 향상시킴과 동시에 최근 요구

되고 있는 다중 서비스 동작을 위한 광대역 특성을 확보 할 수 있는 방법을 제시하고 실험결과를 통해 그 유효성을 검증하였다.

## II. 본 론

### 1. 피드포워드 보상법에서 광대역화를 위한 방법

피드포워드 보상법에서의 광대역화 방법으로는 다양한 방법이 존재한다. 반전 증폭기를 이용하는 방법, 위상 천이기를 이용하는 방법, 하이브리드 커플러의 위상차를 이용하는 방법 등이 있다. 반전 증폭기를 이용하는 방법은 Fock에 의해서 처음 제안되었으나, 넓은 주파수에서 위상이 180도 반전되는 매커니즘이 부족하여 광대역 특성을 얻기가 힘들다. 위상 천이기를 이용하는 방법에 있어서 상용인 위상 천이기는 전압가변 용량기(Varactor)를 사용하기 때문에 주파수 선택도가 높다. 따라서 넓은 주파수 범위에서 동작하는 위상천이를 구현하기에는 관련기술이 취약하여 본 연구에서 사용하는 것이 부적절 하였다. 하이브리드 커플러의 위상차를 이용하는 방법에 있어서 커플러의 출력 포트는 각각 90도와 270도 위상을 갖는다. 이는 두 경로의 신호가 180도의 위상차를 가지게 되므로 지연시간을 동일하게 맞추면, 넓은 주파수 범위에서 주 신호를 상쇄시킬 수 있게 된다. 180도 하이브리드 커플러의 기본적인 특성은 분배기 또는 결합기로 동작하는 두 포트에서 신호의 위상 차이가 180도 나며, 그 중 한쪽 포트는 공통(Common) 포트와 동일한 위상을 가지고 있는 것이 특징이다. 180도 하이브리드 커플러는 1.3~2.6 GHz 대역에서  $\pm 8$ 도 정도의 위상편이 특성을 보이고 있으며, 위상편차와 크기편차가 각각  $\pm 8$ 도,  $\pm 0.5$  dB 이내일 경우 20 dB 이상의 선형성 개선 효과가 나타남을 확인할 수 있다<sup>[10][11]</sup>. 따라서 180도 하이브리드 커플러는 각 경로를 통해 전달되는 신호의 위상을 반전시키고, 넓은 주파수 대역에서 평탄한 위상편이 특성을 보이므로 광송신기의 선형화에 매우 적합한 소자로 판단되었다.

피드포워드 보상법에서 크기편차는 위상편차와 같이 중요하게 다뤄져야 하며 광대역 특성을 가지는 마이크로파-광 송신기의 경우 넓은 주파수 영역에서 위상을 일정 수준으로 미세하게 조절하는 것은 간단하지 않은 일이다. 반면 신호의 크기는 회로적인 구현, P-pad, T-pad와 같은 감쇠기 또는 광대역 증폭기 등을 사용하여 상당한 수준으로 미세하게 조정될 수 있다. 최근 RF 회로 및 소자 기술의 발전으로 인해 MMIC 등의 형태

로 제작되는 증폭기들 중에서 100 % 이상의 비대역폭을 가지는 증폭기들이 상당히 많아졌다. 또한 chip capacitor, chip resistor와 같은 집중형 소자들은 주어진 최대 주파수 범위 내에서 주파수에 따른 영향을 거의 받지 않는다. 따라서 위상 조정이 이뤄진 주파수 대역에서의 크기 조절을 위해 위와 같은 기술 및 소자를 적용하는 것은 적절한 것으로 판단된다.

상업적으로 판매되는 광대역 커플러의 특성을 기본으로 하여, RF 경로상에 적절한 RF 회로 및 소자를 적용하여 마이크로파-광 송신기의 선형화를 광대역으로 구현하였다. 물론 광송신기의 핵심 소자인 LD의 임피던스 특성 때문에, 집중형 RF 소자들이 가지는 광대역 특성을 전부 활용할 수 없으므로 광대역화를 위해서는 삽입손실(IL, insertion loss) 또는 반사손실(RL, return loss)과 같은 RF특성과의 trade-off가 이루어져야 한다.

## 2. Electrical Delay Line의 위상 변환

기존의 피드포워드 보상법은 주 신호 루프 (Loop 1)와 에러보상 루프 (Loop 2)의 신호 크기와 위상을 사용 주파수에서 적절히 조절하는 것이 필수적이다. 해당 주파수의 반전위상을 만들기 위해 신호가 진행되는 경로의 길이를 조절하는 방법을 사용하였다. 경로상의 길이 조절은 다음과 같은 식 (1)과 식 (2)를 바탕으로 이루어진다.

$$\Phi_1 = 2\pi f_c \tau_1, \tau_1 = \frac{L_{1e}}{v_{1e}} = \frac{L_{1e}}{C_{space}/n_1} \quad (1)$$

$$\Phi_2 = 2\pi f_c \tau_2, \tau_2 = \frac{L_{2e}}{v_{2e}} = \frac{L_{2e}}{C_{space}/n_2} \quad (2)$$

$$\Phi_1 - \Phi_2 = 2k\pi + \pi \quad (3)$$

여기서, 첨자 1과 2는 각 경로를 나타내고,  $f_c$ 은 비선형 보상을 이루고자 하는 주파수이며,  $v_{1e}$ 와  $L_{1e}$ 는 각각 첫 번째 경로상의 전파의 유효 속도와 유효 길이를 나타낸다.  $n_1$ 과  $n_2$ 는 경로 상에 존재하는 물질의 굴절율을 나타내고,  $k$ 는 정수를 나타낸다. 전기적인 신호만을 다루는 일반적인 피드포워드 보상법과는 달리, 광신호가 결합된 피드포워드 보상법에서는 광파이버의 유전율과 길이를 고려해야 하기 때문에, 유효 속도와 유효 길이를 정확하게 계산하는 것이 좀 더 복잡해지는 특징이 있다. 따라서 본 연구에서는 근사적인 계산에 의한 근사값을 구한 후, 결정된 광파이버의 길

이를 기준으로 하여 피드포워드 보상회로를 제작하였으며, 길이조정이 가능한 마이크로파 전송선로를 이용하여 각 경로상의 위상반전을 이루었다. 식 (3)은 두 경로의 위상차가 180도여야 함을 나타낸다. 식 (3)을 이용할 경우 주파수가 바뀌면 그에 따른 위상도 바뀌게 됨으로 다른 주파수에서는 위상반전을 유지하지 못하게 된다 (식(4)). 따라서 이 방법을 이용할 경우 넓은 대역의 주파수 특성을 얻기에 부적절하다.

$$f_d \left( \frac{L_{1e}}{v_{1e}} - \frac{L_{2e}}{v_{2e}} \right) \neq \frac{1}{2}, \text{ where } k = 0 \quad (4)$$

여기서  $f_d$ 는 식 (1)의  $f_c$ 와 다른 주파수임을 나타낸다. 위상이 정확하게 반전되지 않은 경우 그 어긋나는 정도에 따라 보상되는 정도가 결정되게 된다<sup>[10][11]</sup>. 여기서 실제적인 보상정도는 크기(Magnitude)와 위상(Phase)의 관계에 의해서 결정된다. (식 4)를 통해 알 수 있듯이, 위상의 어긋나는 정도는 적용되는 주파수에 비례하는 특성을 갖는다. 예를 들어, 주파수가 0.1배 늘어지면, 두 경로의 위상차는 0.1배 늘어나는 성질이 있다. 참고논문 [10]과 [11]에서 알 수 있듯이, 이와 같은 방법을 이용한 보상회로의 10 dB 보상 주파수의 비대역폭은 약 4 %를 넘지 못했다. 이는 국내 이동통신서비스에서 사용하는 비대역폭인 8 % (SKTelecom 서비스 대역)에 미치지 못하는 범위으로써, 뛰어난 보상성능에도 불구하고 보상대역폭의 확대를 위한 기술이 필요하다. 피드포워드 보상법을 이용한 마이크로파-광 송신기의 선형화에 대한 논문들 중에서 넓은 비대역폭을 가지는 논문이 이미 발표되었다<sup>[6][7]</sup>. 참고논문의 결과를 살펴보면, 피드포워드 보상법을 이용하여 35 %이상의 비대역폭에 대해 선형성을 개선시키는 결과를 보였다. 그러나 참고논문 [6][7]은 광대역화를 위해 새로운 방법을 제시한 것이 아니라, 광대역 특성을 갖는 고가의 LD와 고성능 RF 송수신 소자 및 회로를 사용하여 구현한 것으로 파악되었다. 선형성이 우수한 마이크로파-광 송신기의 사용에 있어서 선형 특성뿐만 아니라, 경제성도 중요한 가치 척도 중의 하나이다. 따라서 고가의 마이크로파-광 송신기는 실용화에 있어서 큰 단점을 안고 있다고 할 수 있다. 이를 극복하기 위해, 본 연구에서는 마이크로파 광송신기의 선형성 관련 성능 향상과 더불어 저가 격화를 위한 방안이 연구되었다.

## 3. 네트워크분석기를 이용한 보상대역폭 측정방법

본 장에서는 마이크로파-광 송신기를 피드포워드 보

상기법으로 선형화하기 위한 실험에 있어서 비선형 특성 측정을 좀 더 효율적으로 수행하기 위해 새로이 제안된 측정 방법에 대해 기술하고자 한다. 마이크로파-광 송신기의 비선형 특성을 측정할 경우 일반적으로 투톤 실험을 수행한다. 투톤 실험을 위해서는 두 개의 신호 발생기와 하나의 주파수 분석기가 필요하다. 광대역 특성을 측정하기 위해서 주파수 영역을 가변시켜야 함으로 실험시간이 길어진다는 단점이 있다.

본 연구에서 제안된 마이크로파-광 송신기의 피드포워드 보상법은 원 신호(Fundamental signal)와 왜곡신호, 특히 3차 왜곡 신호(IMD<sub>3</sub> signal, 3<sup>rd</sup>-order intermodulation distortion signal) 각각의 상쇄간섭 효과를 이용하는 방법이다. 따라서 보상 회로의 각 경로 또는 루프 상에서 해당 신호가 얼마만큼 감쇠하는가를 측정함으로써 이 보상법의 성능을 평가할 수 있다. 본 연구에서 제안된 방법은 네트워크분석기(NA, Network Analyzer)를 이용하는 방법이다.

그림 1의 첫 번째 루프(L1)에서 두 경로는 신호원(Source)으로부터 나온 원 신호가 상쇄간섭에 의해 사라지게 하는 역할을 한다. 일반적으로 적용되는 방법인 투톤 입력에 의한 방법도 가능하지만, 본 연구에서는 싱글 톤에 의한 측정방법을 제시한다. L1에서 두 경로를 통과한 신호가 만나는 지점인 커플러의 출력은 각 입력단자의 위상이 180도 차이가 나도록 하는 특성을 가지고 있다. 따라서 투톤에 의한 원신호이건 싱글 톤에 의한 원신호이건 상관없이 그 출력은 상쇄간섭에 의해 작아지게 된다. 따라서 상쇄되는 주파수범위를 측정하기 위해 신호발생기의 주파수 설정을 바꿔가면서 상쇄 대역폭을 측정할 필요 없이, 네트워크분석기의 삽입손실(S<sub>21</sub>)을 측정함으로써 상쇄대역폭을 측정할 수 있다. 그림 1의 두 번째 루프(L2)에 대해서도 유사한 접근 방식이 적용 가능하다. 그러나 상쇄되는 신호가 3차 왜곡신호이기 때문에, 좀 더 섬세한 고려가 필요하다. 이 왜곡신호의 상쇄간섭을 일으키기 위해, L2의 두 경로를 통과한 신호가 합쳐지는 광커플러의 출력단에서 Pd1 경로에 의한 왜곡신호는 Pd2 경로에 따른 왜곡신호와 크기는 동일하고, 반대의 위상을 가져야 한다. 짧은 거리이므로 광손실이 거의 없다고 가정하였을 때, Pd2 경로에 따른 왜곡 신호의 크기는 광분배기의 전력비, O/E 및 E/O 변환손실, 커플러의 삽입손실, 증폭기의 증폭도, 광결합기의 전력비 등에 의해 영향을 받는다. Pd1 경로에 의한 왜곡신호는 광분배기의 전력비와 광결합기의 전력비에 의해 영향을 받는다. 여기서 Pd1 경로상의 각

전력비와 Pd2 경로상의 각 전력비는 다양한 요인을 고려하여 최적화 과정을 통해 결정된다. Pd2 상에서 왜곡 신호가 감쇠와 증폭을 겪는 것과 같이, 원 신호도 동일한 감쇠와 증폭을 겪게 된다. 결국, 각 경로를 통해 최종 출력단으로 전달되는 왜곡신호의 크기를 같게 할 경우, 각 경로를 통해 전달되는 원신호 역시 동일해지는 효과를 얻게 된다. 그와 더불어, Pd2 경로를 통해 전달된 왜곡신호의 위상이 180도 천이된 것과 같이, 원신호도 동일하게 위상천이를 겪게 된다.

정리하면, 피드포워드 보상회로가 잘 만들어져서 정상적으로 동작하는 경우, Pd1 경로를 통해 전달된 원신호와 Pd2 경로를 통해 전달된 원신호는 크기가 동일하고, 위상이 상호 반전된 특성을 가진다. 따라서 투톤이 아닌 싱글 톤 실험만으로 왜곡신호의 상쇄특성을 측정할 수 있으며, 이 상쇄 대역폭을 측정하기 위해 네트워크분석기를 사용할 수 있다. 이 방법을 이용하여 측정할 경우, Pf1은 정상 연결상태를 유지해야 하는 반면, Pf2에 대해서는 첫 번째 RF분배기의 출력포트를 중단 처리해야 한다.

그림 2는 위에서 제시된 방법과 같은 네트워크분석기를 이용한 측정결과와 투톤 입력에 의한 측정결과를 도시 한다. 여기서 기호로 이뤄진 그래프는 일반적으로 사용되는 투톤에 의한 측정결과이고, 실선으로 이뤄진 그래프는 본 연구에서 제안된 방법을 수행한 결과이다. 투톤에 의한 측정을 수행하기 위해 RF 입력전력을 0 dBm으로 하였다. 여기서 S<sub>21</sub>(단위, [dB])과 magnitude(단위, dBm)의 차이는 각 측정기기의 오차에 의한 것으로 확인되었다. 이 결과를 통해 본 연구에서 제안된 방법이 유효한 방법임을 확인할 수 있었다.

#### 4. 마이크로파와 광파 신호를 전송거리에 따른 비교

일반적으로 마이크로파-광 송신기에서 주파수 대역 평탄도와 관련된 성능은 송신단의 LD(Laser diode)에 의해 대부분 결정되는 것으로 알려져 있다. 마이크로파 광송신기에서, 직접변조를 위한 LD의 경우 약 6 Ω 정도의 임피던스를 가진다. 따라서 마이크로파 회로의 일반적인 임피던스인 50 Ω과는 상당한 차이를 보이며, 이로 인해 LD 자체의 가용 주파수보다 훨씬 좁은 범위의 대역폭에서 임피던스 매칭이 가능하다. 이러한 매칭 대역폭을 넓히기 위해서 다양한 방법이 적용되고 있는데, 그 중에서 저항을 이용하는 T형 감쇄기 또는 p형 감쇄기를 LD의 전단에 부착함으로써 반사손실을 최소화시키면서 대역폭을 넓히는 방법을 일반적으로 사용

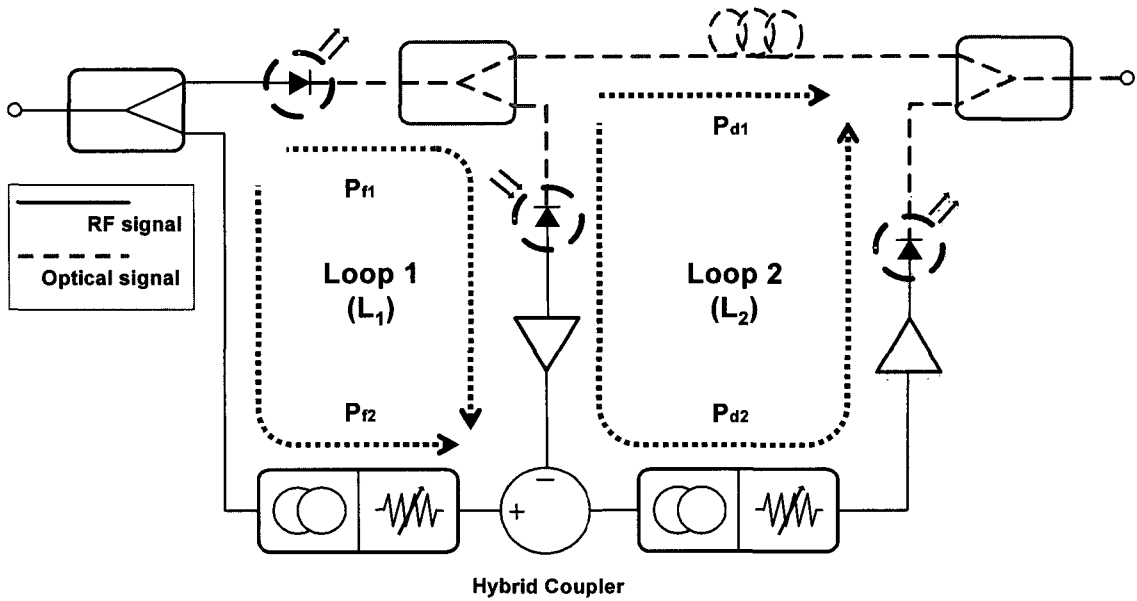


그림 1. 피드포워드 보상회로의 구성도  
 Fig. 1. Schematic of the feed-forward compensation circuit.

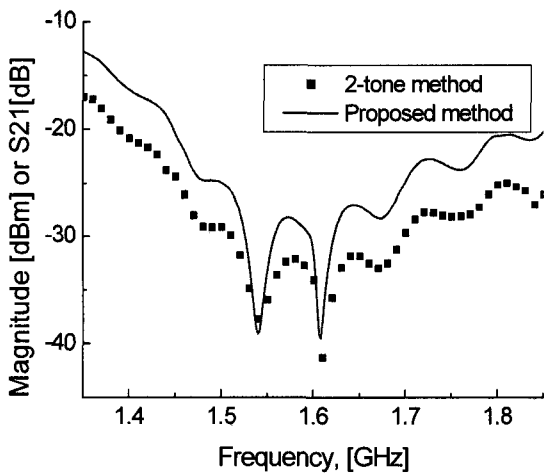


그림 2. 투 톤 입력에 의한 방법과 본 연구에서 제안된 방법에 의한 결과 비교  
 Fig. 2. Comparison between the traditional 2-tone method and the proposed method.

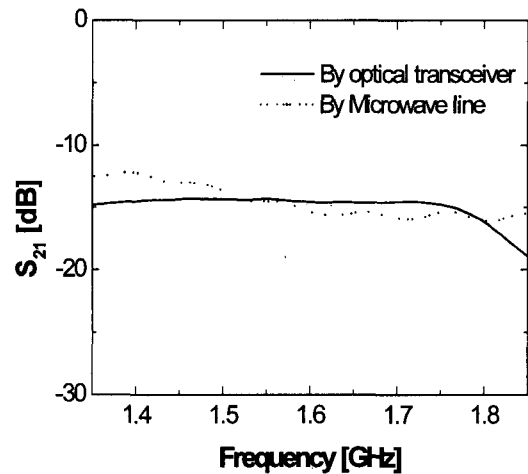


그림 3. 마이크로파 전송선로(점선)와 광송수신기(실선)의 S21  
 Fig. 3. S21 of microwave line(dotted-line) and optical transceiver(solid-line).

하고 있다. 그리고 감쇄기에 의한 손실은 수신단에서 증폭기의 증폭도를 조정함으로써 보상이 가능하다. 마이크로파-광 수신기에서 PD(Photo-detector)와 RF 증폭기 조합의 대역폭은 시스템 전체의 대역폭에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 여러 차례의 실험결과를 통해 확인할 수 있었다.

그림 3은 마이크로파 전송선로와 광송수신기의 삽입손실(S21)을 보여주고 있다. 여기서 사용된 마이크로파 전송선로는 50 Ω의 임피던스를 가지는 마이크로스트립선로(유전율 4.5)와 지연시간을 맞춰주기 위한 플렉시블

동축선으로 구성된다. 본 실험에서는 LD 모듈과 PD 모듈을 따로 사용했기 때문에, 각각의 모듈에 연결된 광섬유의 길이는 약 30 cm 정도 된다. 또한 광커플러의 길이가 전송거리에 포함되므로 실제적으로는 약 1 m 정도의 광전송 거리를 가진다. 앞 절에서 언급된 바와 같이, 피드포워드 보상회로의 광대역화를 위해서는 지연시간을 동일하게 맞춰야 한다. 따라서 마이크로파 전송선로의 길이 또한 약 1 m 정도의 길이를 가진다. 따라서 그림에서의 점선과 같이 주파수가 증가함에 따라 손실이 증가하는 경향을 보인다. 이러한 현상은 향후 LD

와 PD를 포함하는 집적회로의 구현을 통한 광전송거리의 최소화를 통해 마이크로파 전송선로의 길이를 최소화시킴으로써 극복이 가능하다. 본 실험에서 사용된 LD는 아날로그 특성이 불량하여 아날로그용으로 사용하지 못하는 LD를 사용하였다. 따라서 가용주파수 또는 선형성 특성이 양호하지 못한 특성을 가지고 있으며 이로 인해 비교적 저가에 공급된다.

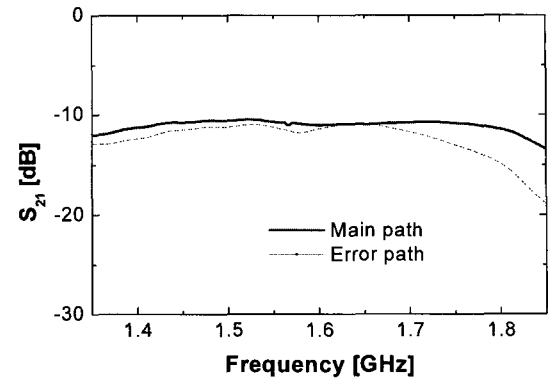
본 연구의 목적 중 하나인 피드포워드 보상법을 이용한 마이크로파-광 송수신기의 선형성 향상에 있어서 경제성을 고려한 설계도 중요하게 고려되었다. 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 저가/저성능의 LD임에도 불구하고 적절한 RF-매칭회로를 통해 광대역에서 평탄한 RF 전송특성을 얻을 수 있었다. 본 실험에서 사용된 PD는 일반적으로 LD보다는 가용주파수 범위가 넓은 것으로 알려져 있으며, 비선형 특성에는 영향을 거의 미치지 않는 것으로 간주되었다.

#### 5. 피드포워드에 의한 광대역 선형화 특성 측정

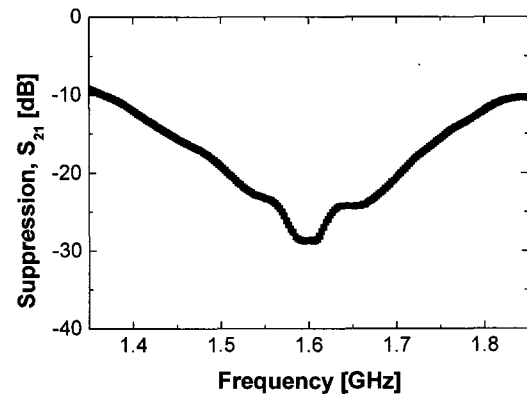
그림 4는 L2(Error cancellation loop)에서 각 경로를 통과한 신호의 크기를 네트워크 분석기로 측정된 결과를 도시한다. 그림 4(a)는 각 경로를 통과한 신호의 삽입손실을 나타내고 있으며, (b)는 왜곡신호의 감쇄정도를 나타내고 있다. 그림 4(a)에서 180도 커플러를 통과하는 신호는 그림 3에서와 같이 주파수 증가함에 따라 감쇄가 커지는 현상은 나타나지 않는다. 이는 전송 길이가 상대적으로 짧을 뿐만 아니라, 감쇄기와 증폭기 등을 이용하여 고주파 대역의 감쇄분을 상쇄시켰기 때문이다.

커플러를 통과하는 신호는 두 개의 LD와 두 개의 PD 그리고 감쇄기와 증폭기를 통과하기 때문에 직접 전달되는 신호에 비해 대역 평탄도와 대역폭이 그다지 넓지 않은 특성을 보인다. 따라서 왜곡신호의 감쇄현상이 일어나는 대역폭은 커플러의 대역폭보다 좁은 범위를 가짐을 알 수 있다. 그림 4(b)는 본 연구에서 제안된 네트워크 분석기를 이용한 효율적인 선형성 보상 측정 방법(실선)과 일반적으로 사용되는 투톤 신호를 이용한 측정방법(점선)을 적용하여 측정된 결과이다.

1.6 GHz에서 두 결과는 유사한 특성을 보이지만, 1.5 GHz 이하에서는 상당히 다른 결과를 보여준다. 이는 네트워크 분석기를 이용한 측정이 주 신호의 감쇄분을 측정하는 방식인 반면, 투톤 측정방식은 왜곡신호의 감쇄분을 측정하는 방식이기 때문인 것으로 사료된다. 광소자 및 감쇄기, 증폭기를 통과하는 전송경로 상



(a)



(b)

그림 4. 주경로와 에러 경로에서의 삽입손실 비교 (a)와 주신호의 상쇄정도(b)

Fig. 4. Comparison of insertion losses between the main loop and the error path(a) and the suppression of the fundamental signal measured by the proposed method(b).

에서 실제 발생된 왜곡신호의 위상과 주파수의 변이가 주신호의 변이와는 약간 다른 경향을 보이는 것에 기인한 것으로 판단된다. 10 dB 보상 범위를 기준으로 두 측정결과 모두 약 200 MHz 이상의 보상 대역폭을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 위상 천이기 등을 이용했을 때 얻을 수 있는 비 대역폭 2~4 % 보다 훨씬 넓은 약 12 %의 비대역폭을 나타낸다. 따라서 광대역 커플러를 이용한 피드포워드 보상법의 유효성을 확인할 수 있다.

그림 5는 본 연구에서 제작된 피드포워드 보상기 사진이다. 바닥에 있는 모듈이 광 송수신부로 구성된 부분이며, 왼쪽 모듈이 마이크로파 시간지연을 조절하기 위한 부분이다. 오른쪽 모듈은 커플러 출력 신호를 증폭하기 위한 증폭기로 구성된 부분이며, 제일 위에 있는 모듈이 본 연구에서 사용된 하이브리드 커플러이다.

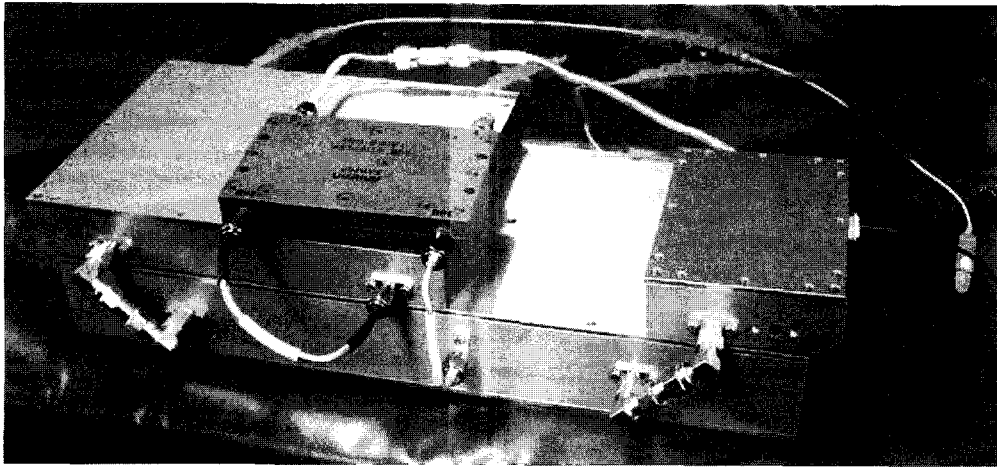


그림 5. 제작된 광대역 피드포워드 보상회로를 적용한 아날로그 광 송신기의 사진  
 Fig. 5. Photograph of the developed feed-forward compensation modules.

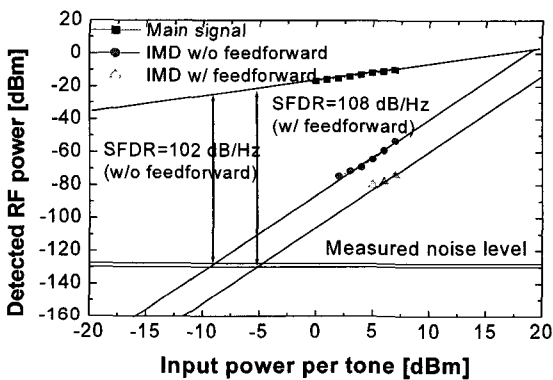


그림 6. 제작된 모듈의 SFDR  
 Fig. 6. SFDR of the developed module.

광전송선로의 길이를 최소화하거나, LD, PD 그리고 광 커플러 등에 대한 집적기술이 개발된다면 전체적인 구조의 단순화도 가능하리라 판단된다. 그림 6는 본 연구에서 개발된 피드포워드 보상기의 SFDR(spurious free dynamic range)를 나타낸다. 여기서 사용된 주파수는 각각 1.62 GHz와 1.621 GHz로 상용모듈의 시험에서 일반적으로 사용되는 1 MHz 주파수 간격을 이용하였다.

충분한 왜곡신호를 얻기 위해서 RF 입력전력을 7 dBm으로 하였고, 두 LD 모두에 대해 문턱전류의 2 배 이상의 전원전류 영역에서 동작시켰다. 이러한 전원전류 영역을 사용해야 relaxation oscillation 등의 예측 불가능한 왜곡요인을 제거할 수 있기 때문이다. 측정된 SFDR은 피드포워드 보상법을 적용하지 않았을 경우에는 102 dB/Hz였으나, 이 보상법을 적용한 회로에 대해서는 108 dB/Hz였으며, 이 보상법에 의해 약 6 dB/Hz 정도 개선됨을 알 수 있다.

### III. 결 론

본 연구에서는 피드포워드 보상법을 이용한 마이크로파-광 송신기의 선형성을 향상시키면서 동시에 대역폭을 확장시킬 수 있는 기술을 개발 및 제작하였으며, 측정결과를 통해 광대역성을 확인할 수 있었다. 또한 피드포워드 보상법을 이용한 선형화 기술 개발 및 광대역화 측정을 좀 더 편리하게 할 수 있도록 하는 측정방법에 대해 제안하였고, 실험결과를 통해 검증하였다. 본 연구에서는 특수하게 제작된 하이브리드 커플러를 사용하였으며, 이 커플러는 두 입력측의 신호 중 하나가 넓은 주파수 대역에서 위상 반전되어 출력측에서 결합되는 구조를 가진다. 이 커플러를 이용함으로써 기존의 위상 천이기를 사용하는 방법보다 훨씬 넓은 약 12 %의 비대역폭을 얻을 수 있었다. 또한 피드포워드 보상법에 의해 얻을 수 있는 대역폭을 측정하는 방법에 있어서, 기존의 두 톤 입력에 의한 방법보다 개선된 네트워크 분석기를 이용하여 시험할 수 있는 방법을 제안하였으며, 그 유효성을 실험을 통해 검증하였다.

마이크로파 광송신기에서 사용되는 아날로그용 LD는 그 수요가 늘어나 가격이 점점 저렴해지고 있기는 하지만, 아직도 디지털용 LD에 비해서는 고가이다. 본 연구에서는 저가의 디지털용 LD를 이용하여 선형성이 우수한 마이크로파 광송신기를 제작하고자 하였으며, 실험을 통해 약 6 dB/Hz의 SFDR 개선결과를 얻을 수 있었다. 좀 더 넓은 대역에서 선형성 보상을 이루기 위해서는 마이크로파 소자 및 광소자의 대역 평탄도를 증가시키는 것이 필수적이다. 본 연구에서 확인하였듯이, 마이크로파 전송선로의 길이가 길어지면 대역 평탄도를

넓게 확보하기는 어려운 실정이다. 따라서 추후에는 집적화 등의 연구를 통해 전송선로의 길이를 최소화시키기 위한 기술개발이 필요할 것으로 사료된다.

### 참 고 문 헌

- [1] J. E. Mitchell, "Performance of OFDM at 5.8GHz using radio over fibre link," *Electronics Letters*, vol.40, no.21, pp. 1353-1354, Oct. 2004.
- [2] J. C. Daly, "Fiber Optic Intermodulation Distortion," *IEEE Trans. On Communications*, Vol. COM-30, No. 8, pp.1954-1958, Aug. 1982.
- [3] R. B. Childs and V. A. O'Byrne, "Predistortion linearization of directly modulated DFB lasers and external modulators for AM video transmission", in *OFC '90*, paper WH6, 1990
- [4] L. S. Fock, A. Kwan, and R.S.Tucker, "Reduction of Semiconductor Laser Intensity Noise by Feedforward Compensation: Experimental and Theory," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol.10, No.12, pp.1919-1925, DEC. 1992.
- [5] D. Hassin and R. Vahldieck, "Feedforward Linearization of Analog Modulated LDs-Theoretical Analysis and Experimental Verification," *IEEE Trans. On MTT*, Vol.14, No.12, pp. 2376-2382, DEC. 1993.
- [6] L. S. Fock and R. S. Tucker, "Reduction of Distortion in analogue modulated semiconductor lasers by feedforward compensation," *Electron. Lett.*, vol. 27, pp. 669-671, 1991.
- [7] L. S. Fock, R. S. Tuck, "Simultaneous reduction of intensity noise and dirtotion in semiconductor lasers by feedforward compensation," *Elect. Letts.* 27, 1297-1299, 1991.
- [8] T. Ismail, C. P. Liu and A. J. Seeds, "Uncooled directly modulated high dynamic range source for IEEE802.11a wireless over fibre LAN applications," *Proc of Optical Fibre Communications*, (OFC 2004), Los Angeles, California, 2004.
- [9] T. Ismail, C. P. Liu, J. E. Mitchell, and A. J. Seeds, "Feed-Forward Linearised Uncooled DFB Laser in a Multi-Channel Broadband Wireless over Fibre Transmission at 5.8 GHz," *International Tropical Meeting on Microwave Photonics (MWP) 2005*, T3-6, pp. 115-118, October 2005.
- [10] Sang-Hyun Park, and Young-Wan Choi, "Significant Suppression of the Third Intermodulation Distortion in Transmission System with Optical Feedforward Linearized Transmitter," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, pp. 1280-1282, Jun. 2005.
- [11] Joon-Jae Lee, Sang-Hyun Park, and Young-Wan Choi, "Enhanced ACPR of W-CDMA Signals Optical Feedforward Transmitter by Optimization," *Microwave Photonics 2005*, pp 59-62, Oct. 2005.



저 자 소 개



윤 영 설(정회원)  
1998년 중앙대학교  
전자공학과 졸업  
2000년 중앙대학교 첨단영상  
대학원 졸업(공학석사)  
2005년 중앙대학교 전자전기  
공학부 졸업(공학박사)

<주관심분야 : 통신, 선형화, 에너지 IT>



이 준 재(정회원)  
2004년 중앙대학교  
전자전기공학부 졸업  
2006년 중앙대학교 대학원  
전자전기공학부 졸업  
(공학석사)

<주관심분야 : Microwave-Photonics, 광통신,  
RF시스템 설계>



문 연 태(학생회원)  
1996년 중앙대학교 전자공학과  
학사 졸업.  
2000년 중앙대학교 전자공학과  
석사 졸업.  
2004년 중앙대학교 전자공학과  
박사 졸업.

<주관심분야 : 통신, 컴퓨터, 신호처리, 반도체>



김 도 균(학생회원)  
2003년 중앙대학교 전자전기  
공학부 졸업  
2005년 중앙대학교 전자전기  
공학부 졸업(공학석사)  
2005년~현재 중앙대학교 전자  
전기공학부 박사과정

<주관심분야 : Mixer, Amplifier, 신호처리, 반도체>



최 영 완(정회원)  
1985년 서강대학교 전자공학과  
석사졸업.  
1987년 버팔로 뉴욕주립대(SUNY  
at Buffalo), 전기 및 컴퓨  
터공학과 석사졸업.  
1992년 버팔로 뉴욕주립대(SUNY  
at Buffalo), 전기 및 컴퓨  
터공학과 박사 졸업.

1992년~1995년 한국전자통신연구원(ETRI)  
선임연구원,

1995년~현재 중앙대학교 전자공학과 부교수.

<주관심분야 : 광전자, 광통신, 광스위칭 시스템  
및 소자, Microwave Photonics, Optical CDMA,  
Bio signal processing>