

피드포워드 선형화 아날로그 광 송신기를 위한 위상 천이기와 전압 가변 감쇄기의 제작과 측정

이준재, 박상현, 이상봉, 최영완
 중앙대학교 전자전기 공학부 광전자 및 광통신 연구실

Experiment of Phase Shifter and Voltage Variable Attenuator for Linear Analog Optical Transmitter by Feedforward Compensation

Joon-Jae Lee, Sang-Hyun Park, Sang-Bong Lee, Young-Wan Choi
 School of Electronic and Electrical Engineering, Chung-Ang University

Abstract - 광 전송 마이크로 셀룰라 시스템과 부반송파 다중 송신 시스템 같은 마이크로파 광 전송 기술을 이용한 시스템들은 송신기의 비선형성에 의해서 발생하는 많은 왜곡 성분들, 특히 레이저 다이오드에서 발생한 왜곡 성분들에 의해서 많은 성능의 제한을 받는다. 이러한 왜곡 성분들을 제거하기 위해서 광 피드포워드 방식을 이용한 광 송신기를 제안하였다. 제작된 피드포워드 선형화 아날로그 광 송신기는 2.1 GHz 투톤 실험에서 38 dB의 IMD 개선 효과를 보였다. 여기에서 위상 천이기와 전압 가변 감쇄기는 신호 크기 허용오차를 0.1 dB, 위상 허용오차 1°범위 내에서 설계하였다. 이를 위해서 세밀한 위상과 크기의 조정이 가능한 위상 천이기와 전압 가변 감쇄기를 제작하였고, 측정된 결과, 전압 가변에 따른 위상 변화량과 크기 변화량은 각각 위상 천이기는 90°, 전압 가변 감쇄기는 14 dB를 기록하였다

진 RF 입력신호가 임의의 인가전류 조건에 의하여 주 발광부에서 출력된 비선형 왜곡 성분을 포함한 광 신호를 광 커플링한 후 RF 신호를 변환한 주 신호와 주 발광부에 입력되기 전의 RF 신호와 벡터적으로 결합함으로써 주 발광부로 인하여 발생한 성분들 중 비선형 왜곡 성분만을 추출하는 즉, 신호 상쇄 루프이다. 두 번째 루프에서는 신호 상쇄 루프를 거친 비선형 왜곡 성분만을 보조 발광부를 이용하여 광 변환한 신호와 주 발광부에서 출력된 비선형 왜곡 성분을 포함한 광 신호를 광 커플링을 통해 결합하여 송신하는 2차 루프, 즉 여러 상쇄 루프로 구성되어 있다. 이 실험에서 최대의 IMD 개선 효과를 보이기 위해서는 레이저 다이오드로부터 발생한 비선형 왜곡 성분과 출력된 선형화 보상을 위한 여러 신호 성분이 같은 크기와 180°의 위상 차이를 가져야 하고, 두 신호가 벡터적으로 합성되어 비로소 비선형 왜곡 성분을 감소 혹은 제거할 수 있게 된다. 또한 제안된 회로에서는 레이저 다이오드 고유의 잡음 성분도 제거된다.

1. 서 론

시스템의 선형성을 개선하기 위한 방법으로 백오프(back-off), 전치왜곡(predistortion), 그리고 피드포워드(feedforward)같은 다양한 방식들이 사용되었다. 이들 방식 중에서, 피드포워드 보상 기법은 좋은 선형성과 더 안정된 광대역 동작특성을 보인다. 피드포워드의 형태는 하이(high)파워 증폭기와 함께 발전해왔고, 광 피드포워드 기법은 이미 여러 문헌에 소개된 바 있다. [1] [2] [3] [5] 과거의 연구에서 CATV 시스템의 선형성을 개선하였고, F-P 레이저 다이오드의 잡음을 줄였음이 보고된 바 있다. 하지만 광 피드포워드 기법의 발전은 조정의 어려움과 시스템의 복잡성 때문에 제한을 받아왔다. 광 피드포워드 기법은 상쇄되는 두 신호 성분의 크기와 위상차이가 허용오차 범위내이어야만 왜곡 성분을 제거할 수 있는데 이는 위상 천이기와 전압 가변 감쇄기의 성능이 좌우한다. 현재의 좁은 대역폭과 단거리의 광 파이버 마이크로 셀룰라 시스템에 조정된 피드포워드 광 송신기를 적용한다면 높은 선형성을 얻을 수 있다. [4] 본 논문은 광 송신기의 선형성을 개선하는 방식인 광 피드포워드 보상 기법에 대한 연구 결과이다.

2.2 위상 천이기와 전압 가변 감쇄기

신호 상쇄 루프에서 완벽히 제거되지 않은 주 신호가 보조 발광부의 광변조 증가 때문에 오히려 추출된 IMD 신호의 증가를 초래할 수가 있고, 여러 상쇄 루프에서의 IMD 성분도 정확한 위상과 크기의 조정이 이루어지지 않으면 비선형 왜곡 성분이 남게 된다. 이상적인 신호 상쇄는 억제된 신호가 억제되기 전의 신호에 비해서 $-\infty$ dB의 크기를 가지는 것을 의미한다. 하지만 현실적으로는 불가능하므로, 비선형 왜곡 성분의 상쇄량(Suppression)을 30 dB 혹은 40 dB 정도 수준의 어떤 정해진 목표량의 억제를 위해서 상쇄 신호가 갖춰야 할 조건을 구해야 한다.

이제부터는 상쇄량에 대해서 도식적으로 계산하여 본다. 그림 2는 두 신호의 벡터 합을 보여준다. 크기 1, 위상 0°를 가진 기준 신호와 크기 $1+\delta A$, 위상 $180^\circ+\phi$ 를 가진 비이상적 상쇄 신호를 코사인법칙(the law of cosine)을 사용하여, 상쇄신호와 같은 주파수를 가진 합성벡터 r 은 식 1과 같이 계산될 수 있다. 이때, 상쇄 혹은 억제된 신호의 수준은 크기 부정합 δA 와 위상 부정합 ϕ , 두 변수의 함수이다. 식 1을 억제량 R (dB)과 크기 부정합 δA , 위상 부정합 ϕ 로 표현하면 아래 식 2와 같다. 식 1과 2에서 원하는 상쇄량을 얻기 위해서는 위상과 크기가 적절히 조정되어야 함을 알 수 있다

2. 본 론

2.1 광 피드포워드 방식

그림 1은 광 피드포워드 방식의 블록도이다. 피드포워드 선형화 보상기법을 적용한 광 송신기는 그림 1에서와 같이 2가지의 상쇄 루프를 가지고 있다. 첫 번째 루프는 신호 상쇄 루프이고, 두 번째 루프는 여러 상쇄 루프이다. 첫 번째 루프는 임의의 크기를 가

$$(1) r^2 = (1 + \delta A)^2 + 1 - 2 \cdot (1 + \delta A) \cdot \cos(\phi)$$

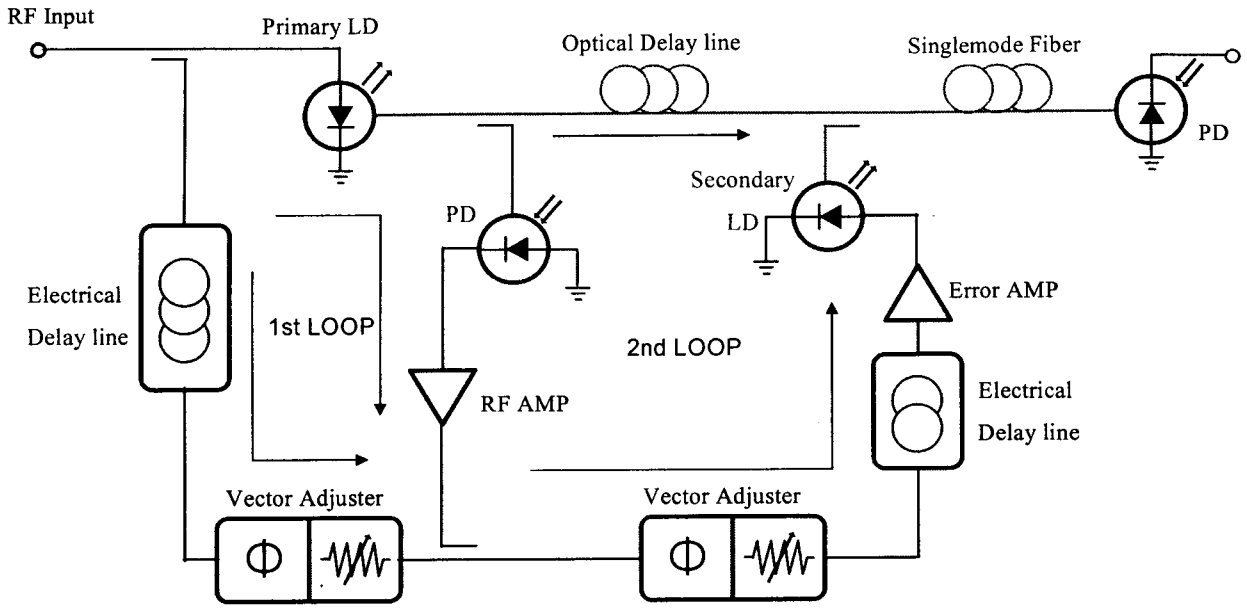


그림 1. 피드포워드 선형화 아날로그 광 송신기의 블록다이아그램

$$(2) R(dB) = 10 \cdot \log \left(10^{\frac{\Delta A(dB)}{10}} + 1 - 2 \cdot 10^{\frac{\Delta A(dB)}{20}} \cdot \cos(\phi) \right)$$

그림 3은 신호의 억제량을 크기와 위상 부정함에 따른 시뮬레이션 결과이다. 억제 수준이 $-\infty$ dB로 근접함에 따라 크기와 위상 부정함의 범위는 점진적으로 더 작아지는 것을 알 수 있다. 일반적인 피드포워드의 억제수준인 30 dB~40 dB를 얻기 위해서는 그림 3에서 나타나 있듯이 신호의 위상에 대한 허용 오차와 크기에 대한 허용 오차가 각각 1°와 0.1 dB 정도의 수준이어야 한다.

2.2.1 위상 천이기

실제 제작된 피드포워드 선형화 광 송신기에서 각 경로별 정확한 위상의 값을 예측하기는 매우 어렵다. 특히 능동소자들을 통과하는 신호에 대해서는 인가전류의 조건에 따라 위상이 바뀌므로 정확한 예측이 어렵다. 그리고 제어 간격이 1°이므로 아날로그 위상 천이기를 설계하는 것이 효과적이다. 위상 천이기의 구체적인 동작원리는 잘 알려진 사실이므로 본 논문에서는 특별히 언급하지 않는다. 그림 4는 제작된 위상 천이기의 조정 전압에 따른 위상의 변화를 보여준다. 측정된 위상 변화량은 90°이며, 동작 주파수는 0.5~2.5 GHz이다. 0~12 V사이의 모든 영역에서 위상이 선형적으로 변하는 것을 볼 수 있다. 그림 5와 표 1은 각각 제작된 위상 천이기의 회로도 및 규격이다.

2.2.2 전압 가변 감쇄기

그림 2와 3에서도 나타나 있듯이 최상의 상쇄량을 얻기 위해서는 위상의 정합과 동시에 크기의 정합도 중요하다. 0.1 dB간격으로 제어 가능한 아날로그 전압 가변 감쇄기를 설계하는 것이 효과적이다. 실제 시스템 구현 후 이득 조정시 미세한 값까지 구현하여야 한다. 구체적인 동작 원리는 본 논문에서는 언급하지 않는다. 그림 6은 제작된 전압 가변 감쇄기의

조정 전압에 따른 감쇄량의 변화를 나타낸다. 측정된 감쇄량은 14 dB이며, 동작 주파수는 0.5~2.5 GHz이다. 0~6 V사이에서 약 13 dB의 선형적인 감쇄량의 변화를 볼 수 있다. 그림 6과 표 2는 제작된 전압 가변 감쇄기의 회로도와 규격이다.

3. 결 론

광 피드포워드 방식에서 최상의 효율은 그림 2와 그림 3의 시뮬레이션 결과에서도 알 수 있듯이 두 루프에서 각각 상쇄되는 주 신호와 에러신호의 상쇄량이 결정한다. 결과적으로 본 논문에서는, 그림 3의 시뮬레이션 결과에도 나타나 있듯이, 일반적인 억제수준인 30 dB~40 dB를 얻기 위해서는 위상 천이기는 1°, 전압 가변 감쇄기는 0.1 dB간격으로 제어하였을 때, 최상의 선형성을 가질 수 있다. 피드포워드 선형화 보상기법은 정밀한 조정기술이 사용되었기 때문에 두 발광소자의 특성이 동일하지 않았음에도 불구하고 충분히 비선형 왜곡 성분을 감소시킬 수 있었고, 레이저 다이오드의 선형성을 개선할 수 있었다. 이는 RF 입력 신호가 상대적으로 큰 광 송신기에 적용할 수 있고, 고출력의 레이저 다이오드가 필요한 광 송신기에 대신하여 저출력 레이저 다이오드를 이용하여 넓은 동적 영역(Dynamic Range) 및 양호한 상호 변조 왜곡을 가짐으로써 선형성을 개선하는 효과가 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [2] 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.

- [3] B.Buxton and R. Vahldieck, "Noise and Intermodulation Distortion Reduction in an optical feedforward Transmitter," IEEE MTT-S, pp. 1105-1108, 1997.
- [4] J.C.Daly, "Fiber Optic Intermodulation Distortion," IEEE Trans. On Communications, Vol. COM-30, No. 8, pp.1954-1958, Aug. 1982.
- [5] T. S. Chu, "Fiber Optic Microcellular Radio", IEEE Trans. On Vehicular Tech., Vol. 40, pp 599-606, AUG. 1991.

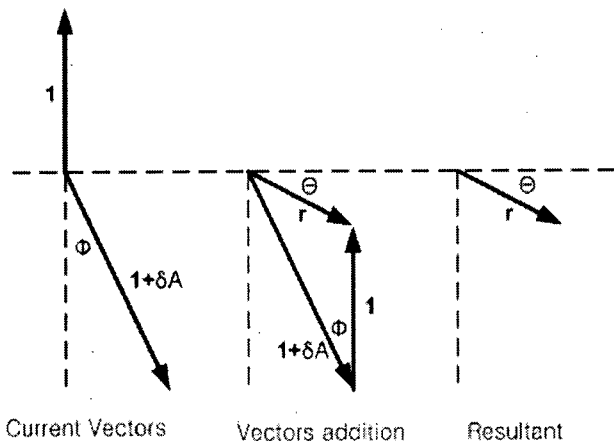


그림 2. 두 신호의 코사인법칙을 이용한 벡터의 합

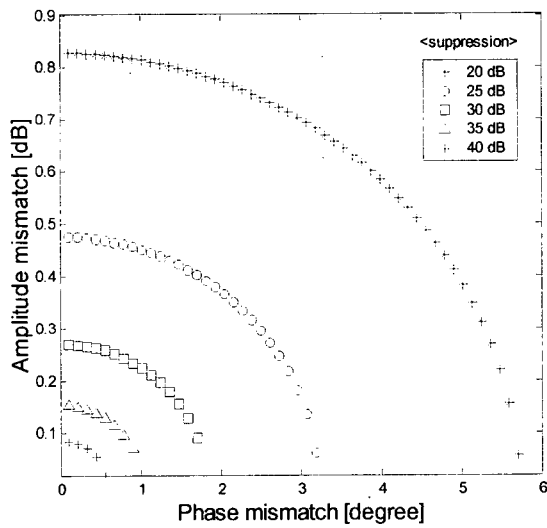


그림 3. 위상 부정합과 크기 부정합에 따른 신호의 억제량

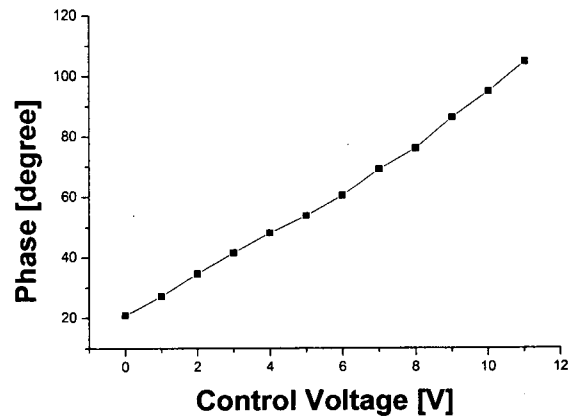


그림 4. 제작된 위상 천이기의 위상의 변화

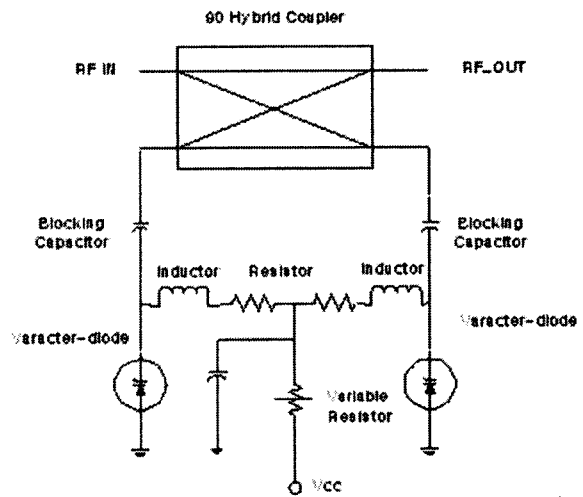


그림 5. 제작된 위상 천이기의 회로도

표 1. 제작된 위상 천이기의 규격

변수(Parameter)	값(Value)	단위(Unit)
삽입손실	0.3	dB
VSWR	1.2~2.0	
위상변화량	90	degree
대역내 평탄도	0.2	dB
동작 주파수	0.5~2.5	GHz
DC 공급 전압	12	V
커넥터 종류	SMA(F)	

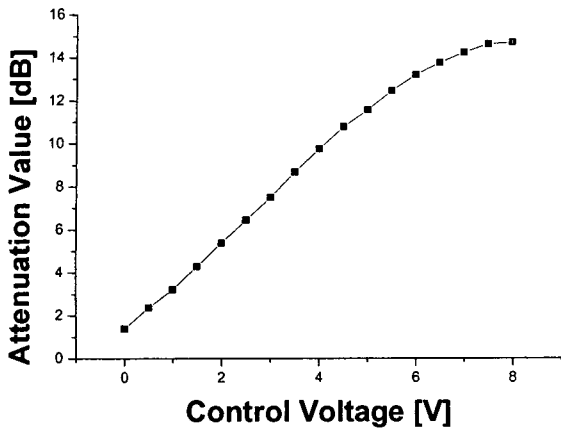


그림 6. 제작된 전압 가변 감쇄기의 감쇄량의 변화

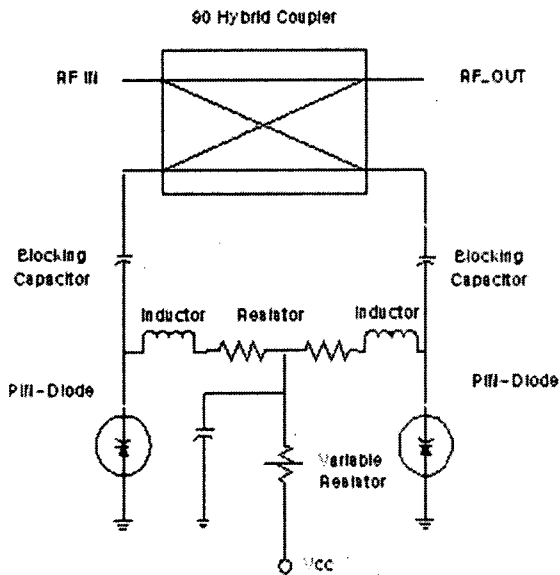


그림 7. 제작된 전압 가변 감쇄기의 회로도

표 2. 제작된 전압 가변 감쇄기의 규격

변수(Parameter)	값(Value)	단위(Unit)
삽입손실	0.3	dB
VSWR	1.2~2.0	'
감쇄량	14	dB
대역내 평탄도	0.2	dB
동작 주파수	0.5~2.5	GHz
DC 공급 전압	12	V
커넥터 종류	SMA(F)	