

Feedforward 방식을 이용한 선형화기에 관한 연구

정 중 한, 박 천 석

성균관대학교 전기,전자,컴퓨터공학부

전화 : (031) 290-7203 / 팩스 : (031) 290-7191

The Study on the Linearizer Using Feedforward Method

Jong-Han Jeong, Cheon-Seok Park

School of Electrical and Computer Engineering SungKyunKwan University

E-mail : jjonghan@yahoo.com

Abstract

In this paper, I compared some characteristics between HPA and LPA using Feedforward method. Feedforward method is known for best IMD correction. HPA generated 46.5dBc at 45.5dBm output power. But, using feedforward linearizing method, I could improve IMD to 67.17dBc at the same output power. IMD could be improved 20.67dB at 45.5dBm output power. I measured average power, IMD, total current, and efficiency of two amplifier at many different power levels. I could get about 70dBc IMD using feedforward method.

성을 갖는 증폭기는 대단히 비싸게 된다. 이 논문의 주제는 power efficiency는 크게 떨어뜨리지 않으면서, IMD를 20dBc 이상 개선시키는 Amplifier의 제작이다.

현재까지 선형화를 위한 몇 가지 방법이 고안되었다. Predistortion을 이용한 선형화기는 선형성을 상당히 개선시킬 수 있으나, 20dBc 이상 개선시키기는 힘들다. Feedback 선형화기는 만들기는 간단하나, 안정성을 고려할 때 밴드폭과 정확성에 제한을 준다.

Feedforward 선형화기는 여러 가지 장점을 가지고 있다. 주 증폭기에서 생성된 IMD성분으로 다시 IMD를 상쇄시키기 때문에 밴드폭이 넓다. 그러나, Feedforward 방식은 신호의 크기와 위상의 정보로 상쇄를 하는 선형화기이기 때문에, 소자의 내구성과 위치변화, 파워레벨의 변화에 상당히 민감한 단점이 있다. 그러나, 이러한 변화를 보상하기 위해 적응형 Feedforward 선형화기에 관심을 불러일으킨다.[1]

I. 서론

모든 고주파 송신기는 전력증폭기나 혼합기와 같은 비선형 소자들을 사용한다. 모든 비선형 소자들은 고출력에서 IMD(Intermodulation Distortion)를 만들어 내기 마련이다. 이러한 IMD는 인접채널에 간섭을 주기 때문에 선형성이 우수한 증폭기의 사용이 중요하다. A급 증폭기를 사용하면 좋은 선형특성을 얻을 수 있으나 선형적으로 동작시키기 위해서는 back off(보통 8에서 10dB)이 필요하게 된다. 이로 인해 power efficiency가 낮아져(1%에서 2%) 열방출이 상당히 심하게 된다. 더욱이 필요한 RF신호 레벨보다 25dBc에서 30dBc 이상의 IMD 특

II. 주 증폭기

그림 1은 본 논문에서 제작한 주 증폭기의 구조이다. stanford microdevices사의 NGA-589와 MHL-19338, MRF-19060, MRF-19125를 써서 제작하였다.

이 증폭기는 출력전력을 45dBm(30W)에서의 3차 혼변조 신호는 2 tone 인가시 49.2dBc이다. 이 증폭기로 출력을 2dBm 더 올려 출력전력을 47dBm으로 만들면 3차

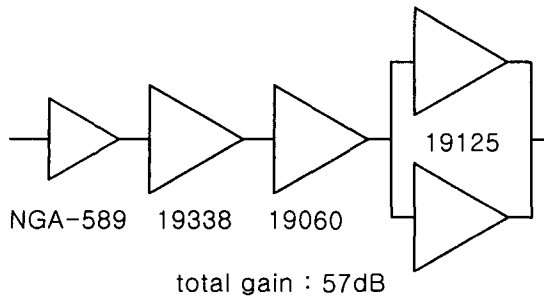


그림 1. 주 증폭기의 구성도

혼변조 신호가 38.5dBc가 된다. 보통 출력전력이 1dB 높이면 3차 혼변조 신호는 3dB 높아진다고 하나[2], 실제로는 출력전력 1dB 상승에 3차 혼변조 신호의 변화를 예상하기가 힘들어 제작한 증폭기의 경우를 가지고 실험을 하여, 그 실험 데이터를 토대로 대전력 증폭기와 선형화기를 비교하였다.

III. 선형화기

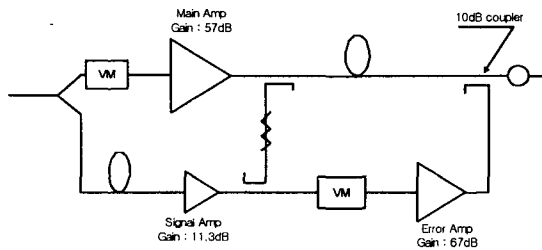


그림 2. Feedforward 선형화기의 구성도

그림 2는 본 논문에서 사용한 Feedforward의 구성도이다. 오차증폭기 이득의 부담을 줄이기 위해서 신호상쇄루프 단에 11.3dB의 이득을 갖는 신호증폭기를 설치하였다. 그리고, 신호상쇄루프에서는 주 증폭기에서 Directional Coupler를 통해 아래로 가는 주 신호의 크기를 맞추기 위해 고정감쇄기를 썼다.

여기서, 주 신호성분의 상쇄가 상당히 중요하다. 주 신호의 상쇄가 덜 됐다고 해서 최종출력단에서 주 신호의 크기에 영향을 주지는 않는다. 하지만, 본 논문에서는 고출력의 선형화기를 제작하기 때문에 오차증폭기의 출력이 상당히 높을 수밖에 없다. 따라서, 오차증폭기의 최종 출력 증폭기를 MHL19338을 썼다.(MHL19338은 P1dB가 36dBm인 A급 증폭기이다.) 하지만, 주 신호가 상쇄 안 될 경우 오차 증폭기에서 왜곡 성분이 생기게 된다. 주 신호의 감쇄를 최대한 적게 하고, 오차증폭기의 부담을 줄이기 위해, 오차상쇄루프의 최종단에 10dB 방향성결합

기를 사용했다. 10dB 방향성결합기를 사용했을 경우, 최종단에서 주 신호의 상쇄가 최대로 되었을 경우 오차 증폭기의 출력신호는 대략 33dBm 정도이다. 따라서, 주 신호의 상쇄가 잘 이루어지지 않았을 경우 오차증폭기의 출력이 P1dB이상이 되어 왜곡성분이 생길 수 있다.

주 증폭기 뒤에 있는 시간지연라인은 고출력임을 감안하여 손실과 크기를 줄이기 위하여 cavity filter를 썼다. 그 크기가 40×45×115mm, 시간지연은 10ns, 감쇄는 0.6dB이다.

주 증폭기의 보호를 위해서 시간지연라인 뒤에는 isolator를 사용하였다.

주 증폭기 후단의 cavity filter와 isolator의 손실을 합하면 약 1.5dB의 손실이 생겼다. 따라서, 47dBm의 주 증폭기의 출력은 시간지연라인과 isolator를 통과하면 Feedforward의 최종출력이 45.5dBm가 된다.

본 논문에서 사용한 가변 감쇄기와 위상 변화기는 Hybrid Coupler를 사용한 반사형 벡터변조기를 만들어 썼다. 가변감쇄기(Variable Attenuator)는 PIN diode를 써서 감쇄가 일어날 때, 위상변화가 최소가 되게 만들었고, 위상변화기(Phase shifter)는 Varactor diode를 써서 위상변화가 일어날 때 감쇄가 최소가 되게 만들었다. 그렇게 만들기 위해서는 PIN diode와 Varactor diode가 갖는 기생성분을 없애 주는 matching stub가 필요하다. matching이 잘 되었을 경우 위상변화기는 80° 위상 변화가 있을 때, 감쇄 변화는 0.1dB 이하이고, 가변감쇄기는 6dB 변화가 있을 때 위상변화는 1° 이내이다.

사실 Feedforward 선형화 방식을 증폭기에서 위상과 감쇄를 잘 맞추면 필요한 위상변화는 40° 정도면 되고, 감쇄변화는 3dB 정도면 된다.

주 신호를 최대한 상쇄시키기 위해서는 크기는 같고, 위상이 180° 차이가 나게 하여야 한다.

여기서 주 증폭기와 시간지연라인 간의 시간지연을 정확하게 맞추는 것이 중요하다. 그렇지 않으면, 한 주파수 성분의 신호만 상쇄되고 그 이외의 성분은 상쇄가 많이 일어나지 않아 불균형한 출력이 나오게 된다.[3]

IV. 측정결과

그림 3은 주 증폭기와 Feedforward 방식을 이용한 선형화기를 측정하기 위한 측정세트이다. 이 실험에 사용한 Signal Generator는 HP사의 8304B Synthesized Sweeper와 E4421B ESG Series Signal Generator를 사용하여 1.855GHz와 1.856GHz 2 tone 신호를 인가하였다. tone 간 간격은 1MHz로 하였다. Power Meter는 HP사의 EPM Series Power Meter를 사용하였다. 출력 파형은 최종 출력단에 29dB directional Coupler를 사용

하여 29dB 감소된 신호를 Spectrum Analyzer에 연결하고, 다시 GPIB 카드를 사용하여 HP-ADS를 통해 출력 신호를 얻어냈다. 최종 출력 Power는 500W 용 30dB Attenuator를 사용하여 30dB 감쇄시킨 다음 HP사의 EPM Series Power Meter를 사용하여 출력 Power를 측정했다.

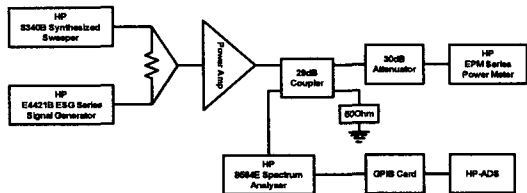


그림 3. 측정 장비 세트

그림 4는 주 증폭기의 출력이 47dBm 일 때의 출력파형이다. 이 때의 IMD가 38.5dBc이다.

그림 5는 주 신호가 상쇄된 후의 스펙트럼 파형이다. 주 신호가 50dB 정도 상쇄되어 주 신호 보다 10dB 이상 낮은 것을 볼 수 있다.

그림 6은 이 주 신호를 오차 증폭기로 증폭해서 그 신호로 최종 출력에서 왜곡신호를 상쇄시킨 파형이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 Feedforward 선형화 방식을 이용한 증폭기의 장점은 오차신호를 그대로 증폭시켜 주 증폭기의 오차를 상쇄시키기 때문에 3차 신호 뿐 만 아니라 5차, 7차 신호까지 상쇄되는 것이다. 그림 6에서 보면 선형화기를 쓰지 않았을 때보다 왜곡성분이 28.67dB 줄어들고 최종 출력도 1.5dB 줄어 든 것을 볼 수 있다. 이 두 출력신호는 서로 다르기 때문에 출력신호가 45.5dBm인 주 증폭기와 비교 해 보면, 주 증폭기가 45.5dBm의 출력일 때 IMD는 46.5dBc이다. 따라서, 똑같은 45.5dBm을 갖는 고출력증폭기와 Feedforward 선형화 방식을 이용한 증폭기를 비교해 볼 때, Feedforward 선형화 방식을 이용한 증폭기가 20.67dB의 IMD 개선 효과가 있었다.

Feedforward 방식의 선형화기를 사용하면 주 증폭기의 IMD와 상관없이 최종출력에 70dBc 정도의 IMD를 갖게 선형화 시킬 수 있었다.

그림 5와 그림 6을 비교해 보면 주 증폭기에서 생긴 47dBm(50W)의 고출력의 신호가 시간 지연기, Directional coupler, isolator를 거치면서 1.5dB의 감쇄가 생겨 Feedforward 선형화기를 사용하면 주 증폭기 보다 1.5dB 전력손실이 생긴 45.5dBm(35W)가 됨을 알 수 있다.

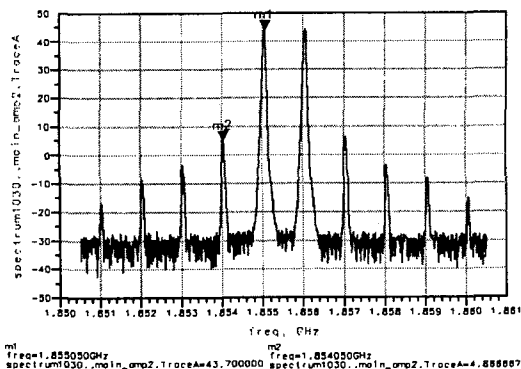


그림 4. Feedforward를 사용하지 않았을 때의 최종출력(최종출력 47dBm)

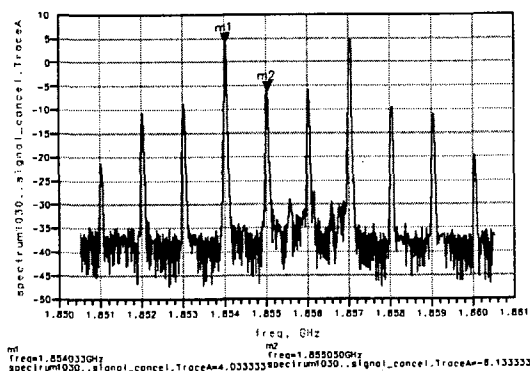


그림 5. 주 신호가 상쇄 되었을 때 파형

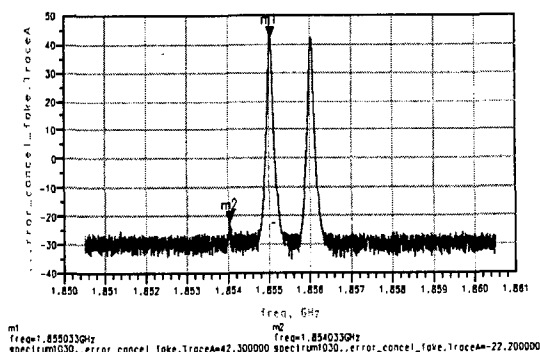


그림 6. Feedforward 선형화기를 사용하였을 때의 최종 출력(최종 출력 45.5dBm)

출력신호(dBm)	IMD(dBc)	전류(A)	효율(%)
42.17dBm	59.5dBc	7.2A	8.47%
42.66dBm	59.17dBc	7.5A	9.11%
43.21dBm	58.84dBc	7.8A	9.94%
43.77dBm	58.5dBc	8.1A	10.89%
44.31dBm	58dBc	8.5A	11.75%
44.84dBm	52.17dBc	8.9A	12.68%
45.38dBm	47.67dBc	9.1A	14.04%
45.93dBm	44.5dBc	9.8A	14.80%
46.47dBm	41.64dBc	10A	16.42%
47dBm	38.5dBc	10.2A	18.20%

표1. 주 증폭기의 출력특성

출력신호(dBm)	IMD(dBc)	전류(A)	효율(%)
40.67dBm	70.64dBc	6.5A	6.65%
41.16dBm	72.17dBc	6.9A	7.01%
41.71dBm	72.0dBc	7.2A	7.62%
42.27dBm	70.84dBc	7.9A	7.91%
42.81dBm	72.5dBc	8.4A	8.42%
43.34dBm	70.17dBc	9.0A	8.88%
43.88dBm	69.67dBc	9.8A	9.23%
44.43dBm	70.5dBc	10.5A	9.78%
44.97dBm	71.17dBc	11.5A	10.11%
45.5dBm	67.17dBc	12.3A	10.68%

표2. Feedforward 선형화기를 이용한 증폭기의 출력특성

VI. 결론 및 추후 연구

본 논문에서는 주 증폭기와 Feedforward 선형화 방식을 이용한 증폭기를 여러 가지 출력신호에 따라 분석하였다.

측정 결과 Feedforward 선형화기를 사용하면 최고 25dB 이상 선형성을 개선시킬 수 있다는 것을 볼 수 있었다. Feedforward 방식은 다른 선형화방식에 비해 복잡하지만 탁월한 선형성의 개선을 가져올 수 있다.

모든 실험에 쓰인 모듈은 케이스를 제작해서 외부의 영향을 최소화하였다. 그렇지 않으면 각각의 증폭기에서 생기는 강한 출력이 다른 미약한 신호가 지나가는 곳에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있기 때문에 서로간의 차폐가 중요하다.[4]

추후 연구목표는 모든 동작을 적응형으로 구현하는 것이다. 이 때 수동으로 조정했을 때의 파형보다 왜곡성분이 얼마나 더 생기는가를 비교하고, 왜곡성분을 최저로 하는 적응형 제어기를 만드는 것이다. 그리고, 감쇄가 최대한 적은 시간지연기와 isolator를 써서 주 증폭기의 전

력 손실을 최소한으로 하는 것이다.

참고문헌

- [1] James K. Cavers, "Adaptation Behavior of a Feedforward Amplifier" IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 44, No. 1, Feb. 1995, pp. 31-40.
- [2] Behzad Razavi, *RF Microelectronics*, Prentice Hall PTR 1998.
- [3] Nick Potheary, *Feedforward Linear Power Amplifiers*, Artech House, INC. 1999.
- [4] Barney Arntz, "Second Order Effects in Feedforward Amplifiers", Applied Microwave & Wireless, Jan. 2000, pp. 66-75