

이동 통신 중계기용 선형 전력 증폭기 효율 개선에 관한 연구

A Study on the Efficiency Improvement of Linear Power Amplifier for Mobile Communication Repeater Applications

安正植*, 李鍾岳*

(Jeong-Sig An* and Jong-Arc Lee*)

요 약

본 논문에서는 feedforward의 주 증폭기 전단에 predistorter를 사용하여 주 증폭기에서 만들어지는 이득과 위상 왜곡을 억제함으로써 넓은 대역에 걸쳐 좋은 IMD를 얻을 수 있도록 하였다. 이때 주 증폭기에서 만들어진 IMD는 저 출력 에러 증폭기의 사용을 가능하게 하므로 선형 전력 증폭기의 전체효율을 개선시킬 수 있다.

제작된 선형 전력 증폭기에서 주 증폭기(출력전력 10W/1톤, 중심 주파수는 850MHz, 2톤 채널 폭은 1MHz)의 IM3는 10.61dBc, predistorter와 feedforward를 결합한 LPA의 IM3는 32.50dBc이므로 약 22dB 개선된 결과를 얻었다. 그리고 주 증폭기의 효율이 30%, predistorter를 사용하지 않는 경우 효율은 20%, 그리고 사용한 경우의 효율이 27.4%이므로 약 7.4%의 개선된 결과를 얻었다.

Abstract

In fabricated linear power amplifier(LPA), the third-order inter-modulation distortion(IMD) for main amplifier alone is 10.61dBc, and the IMD for LPA with predistorter and feedforward loop combined is 32.50dBc. Therefore, the IMD characteristic results an improvement of approximately 22dB. The main amplifier efficiency with single tone input is close to 30%, and the efficiency of the overall LPA with predistorter is 27.4% and predicted feedforward loop efficiency without predistorter is about 20%. Therefore, LPA with predistorter and feedforward loop combined is improved by 7.4%.

I. 서 론

일반적으로 단일-채널 응용은 협대역이므로 수십 kHz 정도의 채널 대역폭을 가지며, 그러한 시스템에서 선형 증폭은 adaptive baseband predistortion 이나

cartesian loop feedback의 사용으로 가능하다[1]-[3]. 그러나, 그러한 기술은 근본적으로 대역폭이 제한되기 때문에 수십 kHz 이상의 대역폭은 쉽게 선형화할 수 없다. CDMA와 같이 좀더 넓은 대역의 단일-채널이나 위성 시스템과 셀룰라 기지국에서와 같이 다중반송파(multicarrier) 응용에서는 feedforward 나 predistortion과 같은 광대역 선형화 방법이 필요하다.

Feedforward 선형화 방식은 우수한 선형성을 갖는

* 建國大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Eng., Konkuk Univ.)

接受日: 1999年7月26日, 修正完了日: 1999年11月12日

증폭기를 생산하기 위해 적용해 왔으나, 그것은 에러 증폭기와 위상보상용 지연선로의 사용으로 전력효율을 제한한다[4][5]. Predistortion 방식은 위성 시스템에서와 같이, 적당한 선형성 만을 필요로 하는 광대역 응용에 사용되어 왔으며, 근본적으로 전력효율을 떨어뜨리지 않는 특징을 갖는다[6][7].

본 논문에서는 주 증폭기의 전단에 Predistortion 방식을 적용한 Predistorter를 사용하여 주 증폭기에 의해 만들어지는 이득과 위상 왜곡을 억제함으로써 넓은 대역에 걸쳐 좋은 IMD를 얻을 수 있도록 하였다. 그리고 이때 전단의 Predistortion 방식에 의해 작아진 왜곡성분을 증폭하기 위한 저 출력 에러 증폭기의 사용으로 효율을 높일 수 있다. 따라서, 기존의 LPA에 비해 두 선형화기에 의해 우수한 IMD 특성뿐만 아니라 높은 효율을 얻을 수 있다.

II. 전력증폭기의 왜곡 특성

디지털 무선 통신 시스템에서 높은 출력 전력을 얻기 위한 전력 증폭기는 낮은 왜곡과 고 효율 특성을 필요로 하며, 동시에 두 가지 모듈을 얻기 위하여 여러 가지 형태의 선형화 기술이 연구되었다[8]. 특히, pre-distortion 방식의 선형화기는 HPA의 입력포트에 연결되고 반송파와 반대 위상으로 왜곡 성분(주로 IM3)을 더해준다.

비선형 증폭기는 그림 1과 같이, AM-PM 변환과 AM-AM 변환을 나타내는 비선형 소자의 직렬합된 형태로 모델링 할 수 있다.

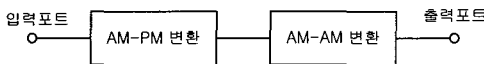


그림 1. 비선형 증폭기의 모델

Fig. 1. Model of a nonlinear amplifier.

2-톤의 신호를 입력한 경우, 반송파($\omega_x = \omega_1$) 성분의 출력은

$$(v_{out})_{\omega = \omega_1} = (a_1 A' + \frac{9}{4} A'^3 + \dots)$$

$$\cos\left\{\omega_1 t + \varphi\left[\frac{e(t)^2}{2}\right]\right\} \tag{1}$$

IM3($\omega_x = 2\omega_2 - \omega_1$) 성분의 출력은

$$(v_{out})_{\omega = 2\omega_2 - \omega_1} = \left(\frac{3}{4} a_3 A'^3 + \dots\right) \cos\left\{(2\omega_2 - \omega_1)t + \varphi\left[\frac{e(t)^2}{2}\right]\right\} \tag{2}$$

여기서, A' 은 각 입력 신호(ω_1, ω_2)의 진압 진폭이고, $e(t) = 2A' \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t$ 이다.

만약 AM-PM 변환에 의해 만들어진 상호변조를 무시할 수 있다면, $\cos\left\{\omega_x t + \varphi\left[\frac{e(t)^2}{2}\right]\right\}$ 은 어떠한 상호변조 왜곡도 만들지 않는다. 그러므로, 식(1)과 (2)에서, AM-PM에 의해 만들어진 IM3의 발생이 AM-AM에 의해 발생된 것과 비교하여 무시할 만큼 작을 때, 반송파와 IM3는 거의 같은 상대 위상 특성을 갖는다. 따라서, 전력증폭기가 약한 비선형 영역에서 동작할 경우 AM-AM이 지배적이고, 반면 전력증폭기가 포화 영역 근처에서 동작하는 경우 AM-PM 변환에 기인하는 IM3의 발생이 강하게 나타남을 알 수 있다. 위상 왜곡이 주 관심인 통신 시스템에서는 전력 급수 표현식이 부적당하며, 이러한 비 선형성 분석을 위해 제시된 것이 볼테라 시리즈이다[9].

$$x(t) = \sum_{k=1}^K |A_k| \cos(\omega_k t + \angle A_k) = \sum_{k=-K(k \neq 0)}^K \frac{A_k}{2} \exp(j\omega_k t) \tag{3}$$

입력신호가 식(3)과 같은 경우 식 (4)는 선형 독립적인 주파수($\omega_0 = m_1 \omega_1 + m_2 \omega_2 + m_3 \omega_3$)를 갖는 특경 고조파 신호의 비선형 전달 함수의 합을 나타낸다.

$$y_{\omega_0}(t) = n! \left[\prod_{k=-K(k \neq 0)}^K \frac{(A_k/2)^{m_k}}{m_k!} \right] m_1 H_n(m_k[j\omega_{-k}], \dots, m_{-1}[j\omega_{-1}]) \tag{4}$$

III. 선형 전력 증폭기의 효율

Predistortion 방식의 선형화기는 대전력 증폭기의 출력에서 만들어지는 왜곡 성분을 미리 예측하여 이것에 대한 역의 왜곡 성분을 갖는 predistorter를 대전력 증폭기의 입력측에 부가하여 출력으로부터 왜곡 성분을 상쇄시키는 방식이다. 그리고 Feedforward 선형화 방식은 증폭기의 출력에서 상변조왜곡 신호만을 추출하여 다시 출력에 역위상으로 결합시킴으로써 C/I 비를 개선하는 것이다.

본 논문에서는 predistortion과 feedforward 방식을 결합하여 feedforward 선형화기의 여러 증폭기가 저전력을 출력함으로써 선형전력 증폭기의 전체 효율을 감소시키지 않도록 하였다. 그림 2와3에서는 선형 전력 증폭기에서 결합기와 지연선로가 효율에 미치는 영향을 그래프적으로 분석하였다.

그림 2는 본 논문에서 설계한 방향성 결합기의 결합계수와 지연선로의 삽입손실에 대한 선형 전력 증폭기의 효율의 변화를 나타낸 그래프이다. 그림과 같이, 최적의 결합계수는 -12dB이고, 지연선로의 삽입손실이 증가함에 따라 효율이 급속히 감소함을 알 수 있다.

그림 3은 지연선로의 삽입손실 따른 선형 전력 증폭기의 효율을 나타낸 것으로 지연선로의 삽입손실이 1dB~2dB 정도의 적은 양이 변화해도 선형 전력

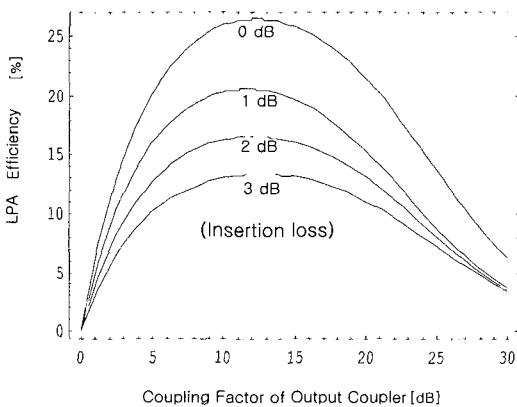


그림 2. 결합 계수와 지연선로에 따른 효율

Fig. 2. LPA's efficiency with coupling coefficient and delay line.

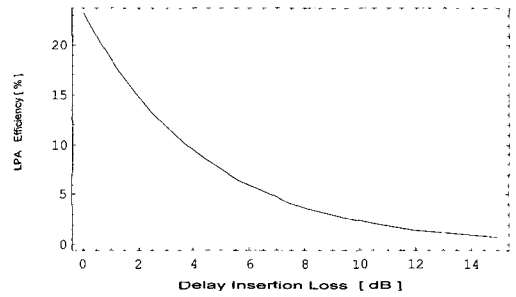


그림 3. 지연선로의 삽입손실에 따른 선형 전력 증폭기의 효율

Fig. 3. LPA's efficiency with delay line.

증폭기의 효율은 크게 감소함을 볼 수 있다.

그러므로 부적당한 지연선로의 설계는 심각한 출력 전력의 감소로 시스템 효율을 크게 낮출 것이며, 이는 주 증폭기의 피크 전력비율, 크게 증가시키게 된다. 따라서, 지연 소자의 삽입손실 감소는 전체적인 효율을 개선하는 결과를 가져 올 것이다.

IV. 실험 및 고찰

그림 4는 실제 제작한 predistorter를 나타냈으며, 게이트에 연결한 튜닝 인덕터와 게이트 바이어스를 변화시킴으로써 쉽게 보상 신호를 만들 수 있도록 하였다.

그림 5는 feedforward 시스템의 주 증폭기에 대한 블록 다이어그램을 나타냈으며, 주 증폭기의 초기 설계는 선형 파라미터를 사용하였으며, 실제 제작과정에

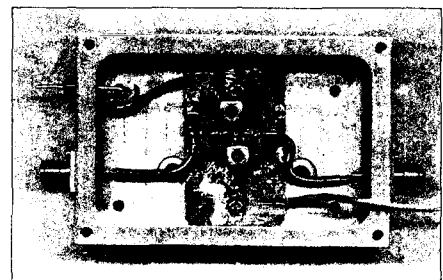


그림 4. 제작한 Predistorter

Fig. 4. Fabricated predistorter.

서 충분한 튜닝을 통해 10W 이상의 전력이 출력되도록 하였다.

그리고 주 증폭기의 측정 조건은 바이어스 전압 24V, 전류 1.4A이며, 이때 효율은 약 30%이고, 이득은 35dB를 얻었다. 또한 두 경우 모두 입력 신호의 중심 주파수는 850MHz를 사용하였고, 2톤에 대한 간격은 1MHz이다.

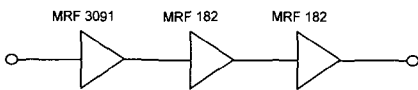


그림 5. 주 증폭기의 블록다이아그램

Fig. 5. Block diagram of fabricated main amplifier.

그림 6은 3단 주 증폭기의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

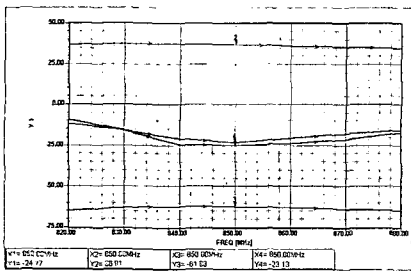
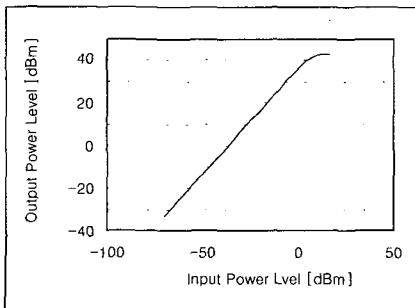


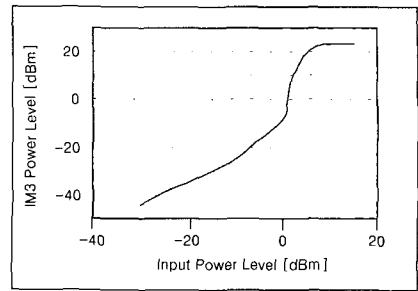
그림 6. 주 증폭기의 시뮬레이션 결과

Fig. 6. Simulation results of main amplifier.



(a) 입력 전력에 대한 출력 전력의 변화

(a) Output power Vs. Input power.



(b) 입력 전력에 대한 3차 IMD 변화

(b) 3rd IMD Vs. Input power.

그림 7. 주 증폭기의 출력 특성

Fig. 7. Output characteristics of main amplifier.

그림과 같이 중심 주파수 대역에서 36dB의 이득과 1.15 정도의 입·출력 정재파비를 나타내고 있다.

그림 7(a)는 증폭기의 입력에 대한 출력전력을 측정하는 것으로 입력 전력이 5dBm 근처일 때 출력이 포화됨을 볼 수 있고, 최대 출력은 약 40dBm(10W), 이득은 35dB이다. (b)는 입력에 대한 3차 IMD 성분을 측정하는 그래프로 입력전력이 약 5dBm 근처에서 급격히 상승함을 볼 수 있다.

그림 8은 주 증폭기에 2-톤을 입력하여 출력 스펙트럼을 측정하는 그래프이다. 그림 (a)에서 톤당 출력 전력은 약 35.32dBm이고, 2톤에 의한 3차 상호변조 성분의 절대 값은 24.71dBm을 나타내고 있다. 따라서, predistorter를 연결하지 않은 주 증폭기의 3차 IMD 특성은 10.61dBc를 나타내고 있다. 또한, (b)에서 2톤 입력에 의한 출력 3차 상호변조 성분의 절대 값은 약 12.93dBm이며, 이것의 IMD는 21.91dBc를 나타내고 있다. 따라서, predistorter를 연결한 주 증폭기의 3차 IMD는 연결하지 않은 경우에 비해 약 11dB 개선되었음을 알 수 있다.

그림 9는 선형 전력 증폭기의 블록다이아그램을 나타내고 있다.

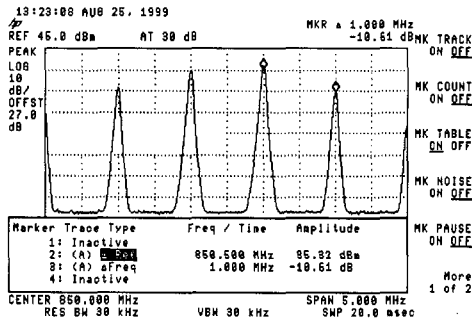
그림에서와 같이, predistorter, feedforward의 주 증폭기, 방향성 결합기, 전력 분배기, 가변 감쇄기, 위상 변환기 등으로 구성하였다.

그림 10은 선형 전력 증폭기의 3차 왜곡 성분을

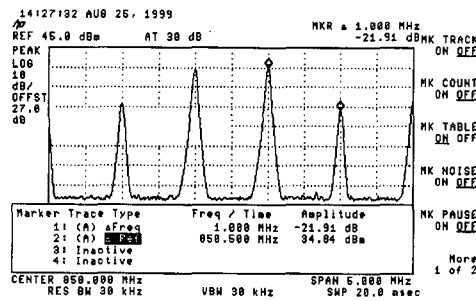
측정한 그래프이다. 그림과 같이, 3차 성분 IMD가 32.50dBc로 주 증폭기의 10.61dBc보다 약 22dB 개선된 결과를 나타내고 있다.

V. 결 론

설계 · 제작한 선형 전력 증전력에서, Feedforward



(a) Predistorter가 없는 경우
(a) Without predistorter.



(b) Predistorter가 있는 경우
(b) With predistorter.

그림 8. 주 증폭기의 IMD 특성

Fig. 8. IMD characteristics of only main amplifier.

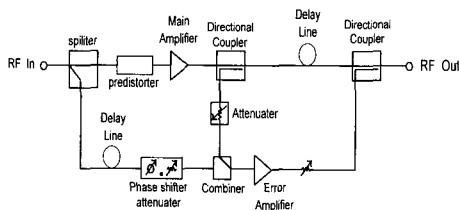


그림 9. 선형 전력 증폭기의 블록 다이어그램
Fig. 9. Block diagram of linear power amplifier.

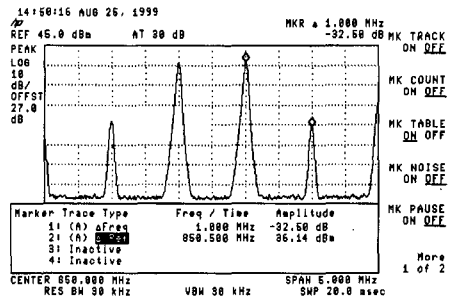


그림 10. 선형 전력 증폭기의 IMD 특성

Fig. 10. IMD characteristics of linear power amplifier.

선형화기는 10W의 출력 전력, 35dB의 이득, 약 30%의 효율을 얻었다. 또한, predistorter를 연결하지 않은 주 증폭기의 3차 IMD 특성은 37dBm의 2톤 신호를 입력하여 10.61dBc를 나타내며, 주 증폭기의 전단에 predistorter를 연결한 상태에서 3차 IMD는 21.91dBc를 얻었다. 따라서, predistorter에 의해서 개선된 3차 IMD 특성은 약 11dB이며 결국, feedforward 선형화기에서 사용하게 될 에러 증폭기의 최대 전력 능력은 11dB 낮아지므로 그만큼 개선된 효율을 예측할 수 있다. 따라서, 선형 전력 증폭기는 predistorter와 feedforward의 사용으로 약 7.4%의 개선된 효율을 나타냈으며, 3차 IMD 성분이 32.50dBc로 약 22dB이상 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] A. Wright and W. Durtler, "Experimental Performance of an Adaptive Digital Linearized Power Amplifier," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. VT-34, pp. 395-400, Nov. 1985.

[2] A. Batemau and D. Haines, "Direct Conversion Transceiver Design for Compact Low-Cost Portable Mobile Radio Terminals," in *IEEE 39th Vehicular Technology Conference*, pp. 1/57 - 1/ 62, May 1989.

[3] M. Johansson and T. Mattson, "Transmitter Linearization Using Cartesian Feedback for Linear TDMA Modulation," in *IEEE 41st Vehicular*

- Technology Conf.*, pp. 439-444, May 1991.
- [4] R. Stewart and F. Tusubira, "Feed Forward Linearization of 950MHz Amplifier," *IEE Proceedings*, vol. 135, pp. 347-350, Oct. 1988.
- [5] T. Bennett and R. Clements, "Feed Forward an Alternative Approach to Amplifier Linearization," *The Radio and Electronic Engineer*, vol. 44, pp. 257-262, May 1974.
- [6] M. Kumar, J. Whartenby, and H. Wolkstein, "Perdistortion Linear using GaAs Dual-Gate MESFET for TWTA and SSPA used in Satellite Transponders" *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. MTT-33, pp. 1479-1488, Dec. 1985.
- [7] M. Horn and A. Egger, "Design and Performance of Microwave Predistortion Network using Digital Circuits," in *14th European Microwave Conference*, pp. 549-554, Sep. 1984.
- [8] K. Yamauchi, .K. Mori, M. Nakayama, Y Itoh, Y. Mitsui, and O. Ishida, "A Novel Series Diode Linearizer for Mobile Radio Power Amplifiers," in *IEEE MTT-S Dig.*, pp. 831-834
- [9] Tri T. Ha, *Solid-State Microwave Amplifier Design*, John Wiley & Sons Inc., pp. 202-278, 1981.

— 저 자 소 개 —



安正植 (正會員)

1997. 3~1998. 7 (주) CTI 중앙연구소 과장, 1997. 3~현재 동서울대학 전자통신과 겸임 전임 강사, 1997. 3~현재 건국대학교 일반 대학원 전자공학과 박사과정, 1998. 9~현재 (주)웨이브 컴 부설 정보

통신 연구소 실장.



李鍾岳 (正會員)

1966년 한양대학교 전기과 공학사, 1970년 연세대학교 전기과 공학석사, 1974년 연세대학교 전기과 공학박사, 1976년~현재 건국대학교 전자·정보통신공학과 교수.