

Cascade 전력 증폭기용 2차 저주파 혼변조 신호주입 전치왜곡 선형화기 설계

최홍재^o, 정희영, 정용채, 김영*, 김철동**

전북대학교 정보통신공학과 및 IDEC WG, *금오공과대학, **세원텔레텍㈜

전화:063-270-2458, 팩스:063-270-2461

A Design of the Second Low Frequency Intermodulation Signal Injection Predistortive Linearizer for Cascade Power Amplifier

Heung-Jae Choi^o, Hee-Young Jeong, Yong-Chae Jeong, Young Kim*, Chul D. Kim**

Dept. of Electronics & Information Engineering, IDEC WG, Chonbuk National Univ.,

* Kumoh National Institute of Technology, **Sewon Teletech Inc.

E-mail: ycjeong@mail.chonbuk.ac.kr

Abstract-This paper presents a new predistortion method, injects the second order low frequency inter modulation signal(LFIM₂) of RF signal into the input bias line of the cascade power amplifier. We show the suppression of IM₃ and IM₅ apparently by adjusting a phase and amplitude and confirmed the verification of mathematical analysis. And we design the linearizer to show the optimal performance without additional circuits or controls for the operating range. When the input signal the CW 2-tone is applied, IM₃ improvement is 35dB and IM₅ improvemet is 6dB. Also, when the input signal CDMA IS-95 1FA is applied, we show the ACPR improvement over 18dB in the operation band.

I. 서론

최근 사용되고 있는 이동 통신 시스템은 주파수 자원의 효율적 사용을 위해 CDMA, QAM, QPSK 같은 선형 변조 방식 등을 사용한다. 그러나, 이런 변조 방식들은 RF 신호의 최대 전력 대 평균 전력이 높고, 포락선 변동이 심한 단점을 가지고 있으며, 선형성이 좋은 전력 증폭기를 필요로 한다. 한편, 전력 증폭기를 통해 높은 효율과 최대 출력을 얻기 위해,

트랜지스터를 비선형 특성이 강한 포화 영역에서 동작시키게 되는데, 이때 이득과 위상의 왜곡이 발생한다. 따라서, 이러한 비선형 특성을 보상하는 선형화기가 필요하게 된다. 전치 왜곡 선형화는 입력 RF 신호에 의해 증폭기에서 만들어질 왜곡 성분의 역 왜곡 특성을 갖는 회로를 미리 전력 증폭기의 앞 단에 부가하여 전력 증폭기의 왜곡 성분을 상쇄시키는 선형화 방식이다.

본 논문에서는 증폭기에 입력된 RF 신호의 2차 저주파 혼변조 신호(LFIM₂)를 검출한 후, Cascade 전력 증폭기의 입력 바이어스 선로에 다시 주입시키는 방법으로 증폭기에서 만들어지는 왜곡 성분의 역의 왜곡 특성을 구동 증폭기와 전력 증폭기에서 생성할 수 있도록 한 선형화 방식이다. 또한, 본 논문에서는 Cascade 전력 증폭기의 입력 바이어스 단에 LFIM₂를 주입하는 여러 방법을 시험하였고, 혼변조 왜곡 성분을 가장 효과적으로 제거할 수 있는 방법을 제안하였다.

II. 이론

그림 1은 본 논문에서 제안한 2차 저주파 혼변조 신호 주입 전치 왜곡 선형화기를 이용한 Cascade 전력 증폭기를 보여주고 있다. 제안된 전치 왜곡 선형화기는 전력 분배기, LFIM₂ 검출기, 가변 이득 조정기(VGA), 트랜스포머, 입력 바이어스 선로, 지연 선로 및

증폭기로 이루어진다. 입력된 주 신호는 전력 분배기를 통해서 RF 경로와 LFIM₂ 검출기 경로로 나누어진다. LFIM₂ 검출기 경로의 신호는 범용 소신호 증폭기를 통과하면서 동작 대역의 출력 신호들 이외에 LFIM₂를 얻을 수 있다. 동작 대역의 출력 신호들은 λ/4 결합 선로를 통과하여 종단 부하에서 소모된다. 그러나 LFIM₂는 λ/4 결합 선로의 저주파 반사 특성에 의하여 인덕터를 통하여 얻을 수 있게 된다. LFIM₂는 소신호 증폭기 및 VGA를 통과하면서 진폭 제어가 된다. 역위상 제어는 트랜지스터의 입력 단 트랜스포머를 통해 얻어진다. RF 경로로 인가된 주 신호와 LFIM₂는 구동 증폭기에 동시에 인가되어 증폭을 하게 된다.

구동 증폭기의 출력 신호와 LFIM₂ 신호가 최종 단의 전력 증폭기에도 인가된다. 이러한 선형화 방식을 통해서 그림 1의 Cascade 전력 증폭기에서 생성되는 비선형 성분을 제거하도록 하였다.

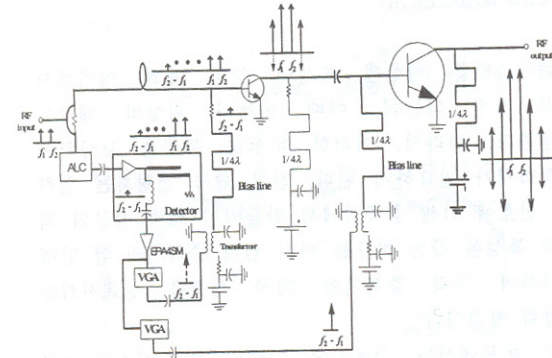


그림 1 제안된 Cascade 전치 왜곡 선형화기

일반적으로, 비선형 증폭기의 전달 특성은 식 (1)과 같은 Power series로 표현이 가능하다. 약한 비선형성을 갖는 증폭기는 보통 3차 항 정도까지만 고려하여도 그 비선형 특성을 표현할 수 있다.

$$v_{out}(t) = k_1 v_{in}(t) + k_2 v_{in}^2(t) + k_3 v_{in}^3(t) \quad (1)$$

입력 신호가 $v_{in}(t) = a(\cos\omega_1 t + \cos\omega_2 t)$ 라면, LFIM₂는 식 (1)의 2차 항에서 얻어지며 $C_1 \cos(\omega_2 - \omega_1)t$ 로 표현할 수 있다. 여기서 C_1 은 상수이다. LFIM₂의 진폭을 조절하여 증폭기의 바이어스 선로에 주입하게 되면, 입력 바이어스에 영향을 주게 되어 증폭기 출력의 이득 변화를 준다. 이는 진폭(AM) 변조로 분석이 가능하므로 식 (2)와 같은 표현이 가능해진다.

$$v_{in}(t) = \{1 + b \cos \Delta\omega t\} \times a \{ \cos(\omega_1 t - \theta_1) + \cos(\omega_2 t - \theta_2) \} \quad (2)$$

여기서, $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$, $\theta_2 \neq \theta_1$ 이다. 또한, a 는 입력 신호의 진폭, θ_1 와 θ_2 는 RF 신호의 위상 성분 값이다. b 는 VGA에 의해서 조절된 LFIM₂의 진폭이다. 식 (2)를 식 (1)에 대입 후, 주 신호에 의해 생성되는 3차 혼변조 신호(IM₃)와 LFIM₂에 의해 생성되는 IM₃로 구분이 가능하다.

일반적으로, Power series에서는 $k_1 \gg k_3$ 이고, $a \gg b$ 인 가정을 이용하여 IM₃을 고려해 보면, 주 신호에 의한 IM₃과 LFIM₂에 의해서 생성되는 IM₃은 각각 식 (3)과 (4)로 표현할 수 있다.

$$0.75k_3 a^3 \cos\{(2\omega_2 - \omega_1)t - (2\theta_2 - \theta_1)\} \quad (3)$$

$$0.5k_1 a b \cos\{(\omega_2 + \Delta\omega)t - (\theta_2 - \Delta\theta')\} \quad (4)$$

여기서, $\Delta\theta'$ 는 LFIM₂의 위상 변화를 의미한다. 식 (3)과 (4)에서 진폭은 같고 위상은 180° 차이가 나게 한다면, 증폭기의 3차 혼변조 왜곡 신호를 제거할 수 있다. 즉, b 의 크기가 $1.5k_3 a^2 (k_3/k_1)$ 이며, $\Delta\theta' = \pm 180^\circ$ 이면 주 신호에 의한 혼변조 왜곡 신호들을 제거할 수 있다. 같은 방법으로 5차 혼변조 왜곡 신호(IM₅)의 제거도 가능하다. 식 (5)와 식 (6)은 각각 주 신호에 의한 IM₅과 LFIM₂에 의해서 생성되는 IM₅를 나타내고 있다.

$$k_5 C_2 \cos\{(3\omega_1 - 2\omega_2)t - (3\theta_1 - 2\theta_2)\} \quad (5)$$

$$(2/32)k_3 a^3 b^3 \cos\{(3\Delta\omega - \omega_2)t - (3\Delta\theta' - \theta_2)\} \quad (6)$$

여기서 C_2 는 상수이다.

III. 실험 결과

제안된 선형화 방법의 타당성을 입증하기 위해서 2단 Cascade 증폭기를 제작하였으며, 구동 단과 전력 단의 트랜지스터는 모토로라 사의 MRF581과 MRF891을 사용하였다. 제작된 Cascade 전력 증폭기의 이득은 18.8dB이고, P_{1dB}는 20.51dBm/1tone 이며, 동작 주파수 대역은 869~894MHz 이다. 사용된 CW 2-tone 신호의 주파수는 각각 879.5MHz, 880.5MHz 이다.

본 논문에서는 2단 Cascade 증폭기에 네 종류의 바이어스를 인가하고 최종 출력 단에서 (C/I) 측정을 보았다. 첫 번째는 트랜지스터의 입력 바이어스 단에 LFIM₂를 전혀 인가하지 않은 경우이다. 두 번째는

구동 증폭기의 바이어스에만 LFIM₂를 인가하여 구동 증폭기를 최대한 선형화 후 최종 출력 단에서 (C/I)를 측정 한 경우이다. 세 번째는 구동 증폭기에 LFIM₂를 인가하되 구동 증폭기를 전력 증폭기의 전치 왜곡 단으로 사용한 경우이다. 네 번째는 구동 및 전력 증폭기의 입력 단 바이어스에 모두 LFIM₂를 인가하여 최종 출력 단에서 (C/I)를 측정한 경우이다.

그림 2는 위의 4가지 실험에서 IM₃의 개선 정도의 추세를 보여주고 있다. 낮은 입력 전력에서는 구동 증폭기를 전치 왜곡기로 사용한 경우가, 높은 입력 전력에서는 구동 및 전력 증폭기를 모두 선형화 한 경우가 (C/I) 개선 정도가 우수하다.

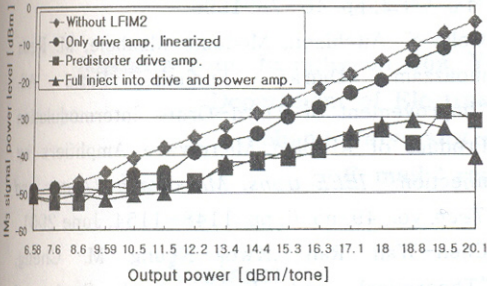


그림 2 출력 신호에 따른 IM₃의 전력 레벨

그림 3은 IM₅의 개선 정도 추세를 보여주고 있다. 대체로 IM₅의 개선 정도는 구동 및 전력 증폭기를 모두 선형화 한 경우가 (C/I) 개선 정도가 우수하다.

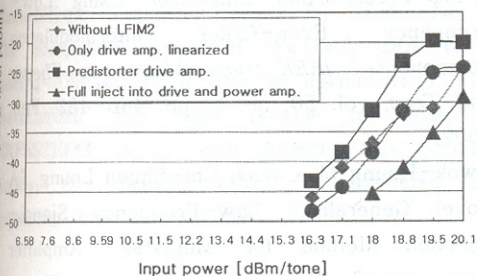


그림 3 출력 신호에 따른 IM₅의 전력 레벨

그림 4는 구동 및 전력 증폭기의 입력 단 바이어스에 LFIM₂를 인가하여 선형화 한 결과이다. 출력이 1 dB 지점인 20.59dBm/tonne에서 IM₃과 IM₅이 각각 5dB, 6dB 개선되었다.

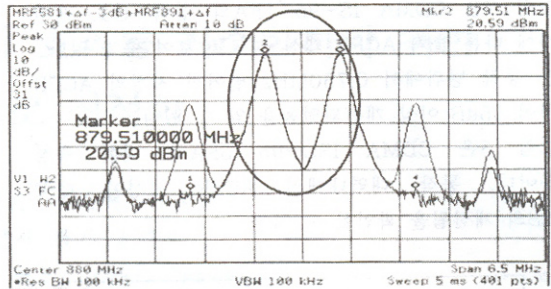


그림 4 Cascade 전력 증폭기 선형화 스펙트럼 (@P₀=20.59dBm/tonne)

그림 5은 입력 동작 영역에 따른 Cascade 전력 증폭기의 IMD 개선량을 보여주고 있다. 15dB의 동작 영역에서 IM₃는 최대 35dB, IM₅는 최대 10dB의 개선을 나타내주고 있다.

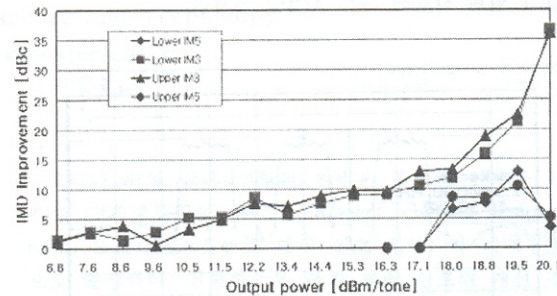


그림 5 입력 신호에 따른 IMD 개선량

그림 6은 CDMA IS-95 1FA 신호에 대한 인접 채널 전력비(ACPR) 개선 특성을 보이고 있다. 이때, 출력은 20.35dBm이며, 중심 주파수에서 0.750MHz 떨어진 지점에서 18dB, 1.98MHz 떨어진 지점에서 10dB의 개선 특성을 보이고 있다.

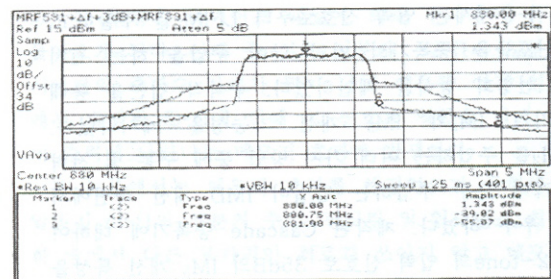


그림 6 CDMA IS-95 1FA ACPR 개선량 (@P₀=20.37dBm, avg.)

그림 7은 CDMA IS-95 1FA의 입력 신호 레벨 변화에 따른 출력 ACPR 개선 정도를 보여 주고 있다. 넓은 동작 범위에서 0.750MHz 떨어진 지점의 ACPR 특성이 15dB 이상 개선되었음을 알 수 있다.

그림 8은 CDMA ISD-95 3FA에 대한 측정 결과이다. 동작 대역내에서 ACPR 특성이 대략 10dB의 개선됨을 확인할 수 있다.

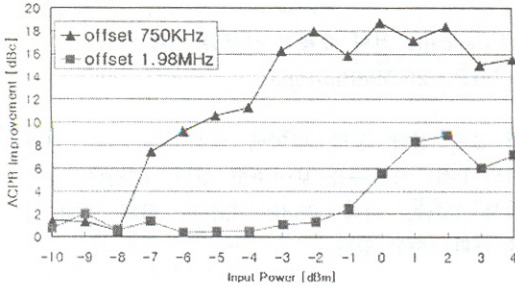


그림 7 입력 신호에 따른 ACPR 개선량

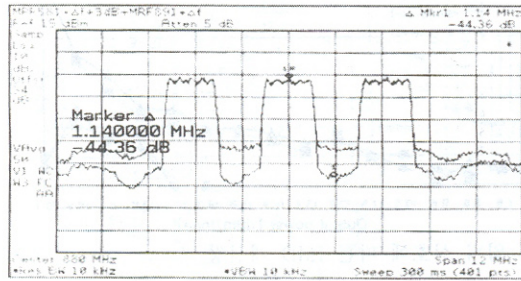


그림 8 CDMA IS-95 3FA ACPR 개선 특성 (@ $P_0 = 20.35\text{dBm}$)

IV. 결론

본 논문에서는 입력 신호로부터 LFIM₂를 추출하고, 이 신호들을 증폭기의 입력 단에 주입을 하는 전치 왜곡 선형화 방식을 제안하였다. 수식적 접근을 통해 증폭기의 IM₃와 IM₅ 개선 가능성을 제시하였다. LFIM₂를 주입하는 여러 가지 방법 중에 구동 및 전력 증폭기에 모두 주입하는 방법이 IMD 개선 측면에서 가장 우수 하였다. 제작된 Cascade 증폭기에 대하여 CW 2-tone의 입력 신호로 35dB의 IM₃ 개선 특성을 확인하였다. 또한 CDMA IS-95 1FA의 신호를 입력하여 18dB이상의 ACPR 개선 특성을 얻었다.

제안된 방식은 구조가 다른 선형화기 구조보다 간단하며, 선형화 효과가 매우 우수하다. 또한, 대전력

증폭기를 Cascade 형태로 구현할 경우에 쉽게 적용이 가능하다.

참고 문헌

- [1] Peter B. Kenington, "High Linearity RF Design," Artech House, 2000.
- [2] D. L. Tatterstall, "Feed Forward Amplifier Network with Frequency Swept Pilot Tone," U.S Patent. no. 5,130,663, 1992.
- [3] 정용채, " 혼변조 신호의 개별 차수 조정 Predistortion 선형화기 설계," 박사학위논문, 서강대학교, pp. 40-78, 1996.
- [4] Colin S. Aitchison, Modeste Mbabele, M. Reza moazzam, Djuradi Fudimir, Fazal Ali, "Improvement of Third-Order Intermodulation Product of RF and Microwave Amplifiers by injection," *IEEE trans. Microwave Theory and Tech*, vol. 49, no. 6, pp. 1148-1154, June 2001.
- [5] Chun-Wah Ran, Kwok-Keung M. Cheng, "Theoretical and Experimental Study of Amplifier Linearization Based on Harmonic and Baseband Signal Injection Technique," *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech*, vol. 50, no.7, pp. 1801 - 1806, July 2002.
- [6] Youngoo Yang, Young Yun Woo, Bummam Kim, "New Predistortion Linearizer Using Low-Frequency Even-Order Intermodulation Components," *IEEE trans. Microwave Theory and Tech*, vol. 50, no. 2, pp. 446-452, Feb. 2002.
- [7] Kwok-Keung M, Cheng, Chi-Shuen Leung, "A Novel Generalized Low-Frequency Signal-Injection Method for Multistage Amplifier Linearization" *IEEE trans. Microwave Theory and Tech*, vol. 51, no. 2, pp. 553-559, Feb. 2003.
- [8] Steve C. Cripps, "RF Power Amplifier for Wireless Communications." Artech house, pp.4-6, 1999.