

전력 증폭기의 왜곡해석 및 개선에 관한 연구

정회원 하성재*, 홍의석**

A study on the high power amplifier Distortion analysis and Improving

Sung-Jae Ha*, Ui-Seok Hong** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 전력증폭기의 선형성을 개선하기위해서 전력증폭기에서 발생하는 왜곡을 해석하여 전력 증폭기의 선형성 개선 개념을 제시하고 검증하였다. 연구에서는 전력증폭기를 구동 증폭기와 종단 증폭기로 구분하여 종단 증폭기에서 발생하는 비선형 왜곡 성분을 구동증폭기의 왜곡성분으로 상쇄시키는 개념이 제시된다. 본 논문에서 전력증폭기의 AM to AM은 Power Series로 해석하였으며, AM to PM 왜곡은 Bessel 함수를 이용하여 해석하였다. 본 개념을 검증하기위하여 셀룰라 대역의 30W 전력 증폭기를 구현하여 검증하였다. 실제 및 제작된 전력 증폭기는z대역에서 30W@20FA 출력할 경우 스퓨리어스 특성이 51dBc @ 1FA,20FA ±1.98 MHz의 특성을 나타내었다. 이러한 결과는 10dB의 스퓨리어스 특성 개선을 보였다.

Key Words : HPA, Linearity, AM to AM, AM to PM

ABSTRACT

In this paper, a power amplifier intermodulation distortion has been analyzed to improve linearity and the analysis results are used to minimize the distortion for linear power amplifier design. The proposed design technique is which the intermodulation distortions of the final amplifier are removed by driver intermodulation distortions. This proposed technique is based on AM to AM distortion analysis using power series, and AM to PM distortion analysis results using Bessel function. To verify this technique implement a cellular HPA(High Power Amplifier) 30W. From the results of the implementation and measurement for the linear power amplifier, the spurious characteristic is shown as 50 dBc at 1.98 MHz with 30 W with 20FA. These results show that distortion characteristics are improved as much as 10 dB in spurious characteristic compared with conventional design method.

1. 서론

현대의 통신은 다양한 멀티미디어 및 정보서비스 제공을 궁극적인 목표로 하고 있다. 이러한 예로 기존의 IS-95방식의 2세대 통신서비스에서 3GPP의 3세대 그리고 지금의 Wi-bro, Wi-MAX 서비스까지 유틸리티의 실현을 위한 기술진보는 급격한 속도

로 가속화되고 있는 현실이다. 이러한 기술 진보는 통신 분야뿐만 아니라 방송 분야에서도 진행되고 있으며, 서비스를 시작한 위성 DMB (Digital Multimedia Broadcasting)와 지상파 DMB를 시작으로 방송 통신 융합 기술 분야의 새로운 서비스가 시작 되었다. 이러한 시대적 배경에서 다양한 방송 통신 서비스의 발달과 더불어 기존의 통신 장비 분

* 삼성탈레스(sungjae.ha@samsung.com), ** 광운대학교 전자공학과 초고주파연구실(ushong@daisy.kwangwoon.ac.kr)
 논문번호 : KICS2007-04-173, 접수일자 : 2007년 4월 2일, 최종논문접수일자 : 2007년 9월 28일

야 또한 발전되고 있으며, 지금의 2세대, 3세대, 그리고 Wi-bro 와 같은 서비스를 효율적으로 통합 운용 및 관리하기 위해서 기존의 통신 장비의 선형성 및 효율 그리고 가격이 중요한 경쟁 요소로 대두되었다.

기존의 이동 통신 장비에서 가장 중요한 요소로서 고출력 증폭기는 이러한 경쟁력을 확보하는데 핵심이 되는 부품이다^{[1],[2],[3]}. 본 논문은 이러한 시대적 경쟁력 확보를 위해서 전력증폭기의 선형성을 개선하고자 연구되었다.

II. 전력증폭기의 왜곡

2.1 AM to AM 왜곡 해석

2단자 망에서 가장 일반적인 비선형 특성중 하나는 신호의 진폭 왜곡이다. 만약, 2단자 망에 기억성이 없다고 가정하고 출력 전압이 입력 전압에 대해 동시성을 갖는다면 출력 전압 $v_o(t)$ 는 입력 전압 $v_i(t)$ 의 Power series로 표현될 수 있다. 식 (1)은 이러한 관계식을 나타낸 것이다.

$$v_o(t) = k_1 v_i(t) + k_3 v_i^3(t) + k_5 v_i^5(t) + \dots \quad (1)$$

여기에서 k_1, k_3, k_5 은 전력 증폭기의 이득과 왜곡을 나타내는 복소 계수이다. 또한, 주파수, 바이어스, 그리고 정합 회로의 조건에 관한 변수이며, 입력 전력의 크기에 관한 변수이다. 그리고 $v_i(t)$ 는 식 (2)와 같다.

$$v_i(t) = A(\cos w_1 t + \cos w_2 t) \quad (2)$$

여기서, A는 크기이며 w_1, w_2 기본 각주파수이다. 식 (2)을 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (3)에서 식 (5)와 같다[1].

$$v_o(t)_{fund} = (k_1 A + \frac{9}{4} k_3 A^3 + \frac{25}{8} k_5 A^5) (\cos w_1 t + \cos w_2 t) \quad (3)$$

$$v_o(t)_{IMB} = (\frac{3}{4} k_3 A^3 + \frac{25}{8} k_5 A^5) \{ \cos(2w_1 t - w_2 t) + \cos(2w_2 t - w_1 t) \} \quad (4)$$

$$v_o(t)_{IM5} = (\frac{5}{8} k_5 A^5) \{ \cos(3w_1 t - 2w_2 t) + \cos(3w_2 t - 2w_1 t) \} \quad (5)$$

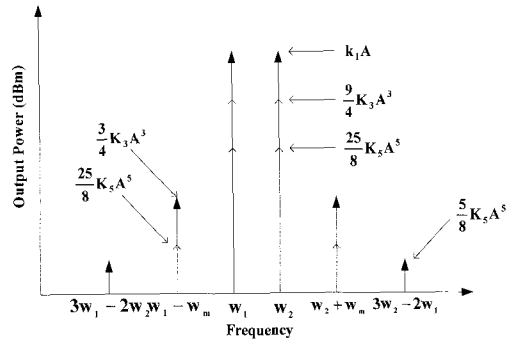


그림 1. AM to AM 왜곡의 성분들

식 (3)에서는 기본 주파수 w_1, w_2 인 입력신호에 대해 출력 신호를 나타내주고 있으며, 식 (4)는 3차 혼변조 성분, 식 (5)는 5차 혼변조 신호의 출력을 보여주고 있다. 특히 3차 혼변조 성분은 3차 비선형뿐만 아니라 5차 비선형성이 결합되어 있다.

식 (3)에서 식 (5)까지의 결과로 증폭기의 AM to AM 왜곡 성분은 서로 종속적인 관계를 가지고 있다는 것을 확인할 수 있다. 그림 1은 식 (2)와 같은 신호가 인가된 증폭기의 출력 주파수 스펙트럼으로 식 (3)에서 식 (5)에 나타난 주파수 성분을 보이고 있다.

2.2. 2 AM to PM 왜곡 해석

위상왜곡 해석은 수정된 Minkoff 위상 왜곡 모델과 Bessel 함수를 적용하여 전력 증폭기의 비선형 특성에 의한 위상 왜곡을 해석하였다^{[4],[5]}. 기존의 연구에서는 위상왜곡이 충분히 작다고 가정하여 복잡한 수식을 간소화 하여 전개 하였으므로 제시된 수식은 위상 왜곡이 작지 않은 증폭기에서는 적용할 수 없는 해석이 될 수 있는 단점이 있다. 그러나 Bessel 함수를 이용하여 AM to PM 왜곡을 해석한 결과는 이러한 해석 한계를 극복 할 수 있으며, AM to AM 위상 왜곡과 동일한 그림 1과 같은 주파수 스펙트럼을 도출 할 수 있어 전력증폭기 왜곡 해석에 유용하다.

본 절에서는 AM to AM 왜곡은 존재하지 않는 증폭기라 가정하고 해석하였다. 이러한 가정은 결론적으로 AM to AM과 AM to PM이 독립적으로 발생됨을 보여주게 된다. 해석에서 2-tone 입력 신호는 각 주파수 w_1, w_2 와 크기 A로 구성되었다고 가정하면 전력 증폭기의 입력 신호는 식 (6)과 같이 표현 할 수 있다.

$$v_i(t) = A(\cos w_1 t + \cos w_2 t) \tag{6}$$

$$= 2A \cos \frac{w_1 - w_2}{2} t \cos \frac{w_1 + w_2}{2} t$$

식 (6)은 첫 번째 $\cos \frac{w_1 - w_2}{2} t$ 항의 포락선에 따라서 $\frac{w_1 + w_2}{2}$ 의 주파수로 진폭 변조된 형태로 간주할 수 있다. 본 장에서는 전력 증폭기의 진폭 왜곡이 없다고 가정하였으므로 전력 증폭기의 출력에서는 위상 왜곡의 특성을 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{out} = 2AG \cos \frac{w_1 - w_2}{2} t \cos \left(\frac{w_1 + w_2}{2} t + \beta \cos w_m t \right) \tag{7}$$

여기서 $w_m = |w_2 - w_1|$ 이며 β 는 위상 편차이며 G 는 전력 증폭기의 이득이다. $\beta \cos w_m t$ 는 전력 증폭기에서 위상 변조된 수학적 표현이다. 식 (7)은 $v_{out} = 2AG \cos \frac{w_1 - w_2}{2} t$ 의 Envelope 신호를 갖고 $\cos \left(\frac{w_1 + w_2}{2} t + \beta \cos w_m t \right)$ 로 위상 변조된 신호로 간주 할 수 있다. 식 (7)을 Bessel 함수를 이용하여 해석하면 식 (8)과 같은 수학식으로 표현 된다.

$$v_{out} = 2AG \cos \frac{w_1 - w_2}{2} t \left\{ \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \cos \left(\frac{w_1 + w_2}{2} t + n w_m t + \frac{\pi}{2} n \right) \right\} \tag{8}$$

식 (8)에서 $J_n(\beta)$ 는 n 차 Bessel 함수이다. 식 (8)에서 3차 및 5차 혼변조 성분을 나타낼 수 있는 값만 선택하여 계산하기 위해서 $n = -2, -1, 0, 1, 2$ 를 대입하여 정리하면 식 (9), (10), (11)과 같다.

$$v_{outfund.}(t) = AGJ_0(\beta)(\cos w_1 t + \cos w_2 t) - AGJ_1(\beta)(\sin w_1 t + \sin w_2 t) \tag{9}$$

$$v_{outIM3}(t) = -AGJ_1(\beta)[\sin(w_2 + w_m)t + \sin(w_1 - w_m)t] - AGJ_2(\beta)[\cos(w_1 + w_2)t + \cos(w_1 - w_m)t] \tag{10}$$

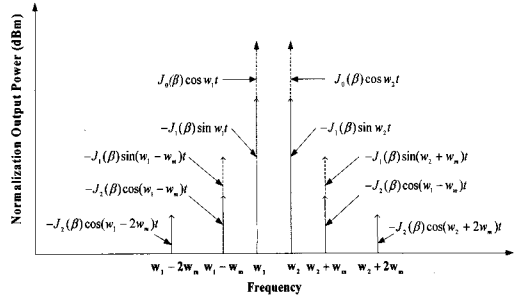


그림 2. AM to PM 왜곡의 성분들

$$v_{outIM3}(t) = -AGJ_2(\beta)[\cos(w_1 - 2w_m)t + \cos(w_2 + 2w_m)t] \tag{11}$$

식 (9)에서는 입력된 두 신호가 증폭기 이득만큼 증폭되어 출력되는 것을 나타낸다. 식 (9)를 살펴보면 증폭기의 출력에는 기본 주파수 특성에 3차 위상 혼변조 신호가 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이것은 AM to AM 왜곡 특성과 동일한 특성을 보이고 있다. 식 (10)에서는 3차 혼변조 성분을 보인 것이다. 식(10)에서는 5차 혼 변조 성분과 3차 혼변조 성분이 존재함을 보여주고 있다. AM to AM 왜곡에서와 같이 5차 성분은 3차 왜곡 성분에도 영향을 주고 있다. AM to PM 왜곡에서 동일하게 3차 왜곡 성능을 개선하기 위해서는 5차 성분도 함께 고려하여야 한다. 식 (11)에서는 5차 혼변조 성분을 보인 것이다.

그림 2는 Bessel 함수를 이용한 위상 왜곡 성분의 주파수 스펙트럼을 보인 것이다. 그림 2의 AM to PM 스펙트럼은 그림 1의 AM to AM 스펙트럼과 독립적으로 작성된 것이며 서로 동일하게 도시되었다.

III. 전력증폭기 선형화 설계

본 논문에서 제시한 전력 증폭기의 선형화 설계 기법은 앞장에서 해석한 AM to AM 왜곡 및 AM to PM 왜곡 결과를 이용하여 설명 되어 진다. 먼저 종단 증폭기와 구동 증폭기의 AM to AM 및 AM to PM 왜곡 특성을 각각 도출한 후 구동 증폭기의 왜곡 특성과 종단 증폭기의 왜곡 결과가 서로 크기는 같고 위상은 반대가 되어 결합하게 되면 종단 증폭기의 최종 출력에서는 종단 증폭기의 왜곡이 상쇄되어진 결과가 나타나게 된다. 그림 3은 이러한 구동 증폭기와 종단 증폭기를 구분하여 설계하는

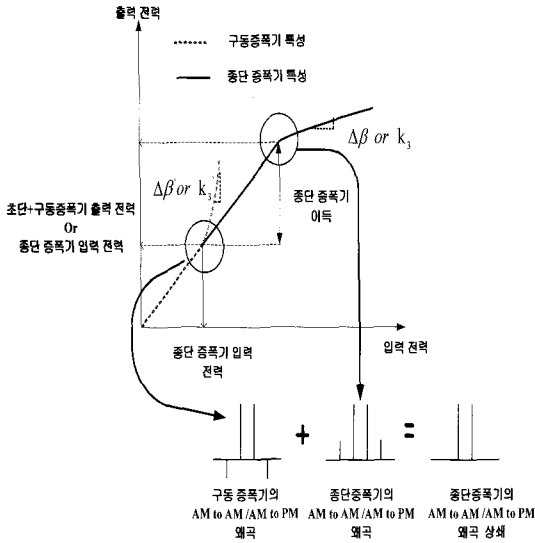


그림 3. 전력 증폭기의 왜곡 상쇄 원리

경우에 왜곡 성분이 상쇄되는 개념을 설명한 것이다. 중단 증폭기의 AM to AM 와 AM to PM 왜곡 신호는 식 (4)와 식 (10) 과 같다. 중단증폭기의 이러한 왜곡을 제거하기 위해서는 구동 증폭기는 식 (12)와 식 (13) 과 같이 표현 되어 질수 있다.

$$v_{out}(t)_{Drive\ amp.\ IMB} = \left(\frac{3}{4}k_3A^3\right)\{\cos(2w_1t - w_2t) + \cos(2w_2t - w_1t)\} \quad (12)$$

여기에서,

$$|Gk_3'| = |k_3| \text{이며 } \angle k_3' + n\pi = \angle k_3 \text{ 이다.}$$

$$v_o(t)_{Drive\ amp.\ IMB} = -J_1(\beta) \{\sin(w_2t + w_m t) + \sin(w_1t - w_m t)\} \quad (13)$$

여기에서,

$$|GJ_1(\beta)| = |J_1(\beta)| \text{이며 } \angle J_1(\beta) + n\pi = \angle J_1(\beta) \text{ 이다.}$$

식 (12)와 식 (13)에서 사용된 G 는 중단 증폭기의 이득이며 n 은 정수이다.

결과적으로 구동 증폭기는 중단 증폭기에 대해서 전치왜곡기의 특성을 나타낸다. 구동 증폭기가 중단 증폭기의 전치 왜곡 특성을 갖도록 구성할 수 있는 이유는 사용되어 지는 LDMOS의 전달 특성이 Bias 와 정합구조에 따라서 서로 다른 전달 함수 특성을 나타내기 때문이다^[6]. 표1. 은 본 연구의 해석을

표 1. 전력 증폭기 설계 사양

| 구 분 | 설계 사양 |
|-----------------------------------|--------------------------------|
| 주파수 | 869~894 MHz |
| 이 득 | 60 dB |
| 평균 출력 전력 | 30 W |
| Spurious Emission IS-95CDMA(20FA) | 47 dB이상 1FA,20FA @±1.98 MHz |

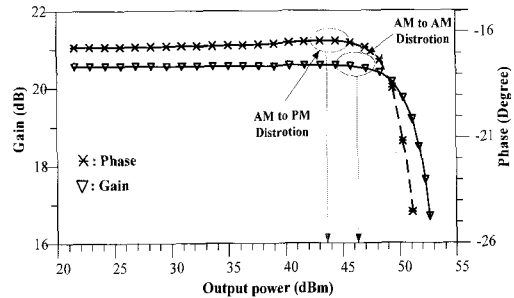


그림 4. 중단 전력 증폭기의 왜곡 특성

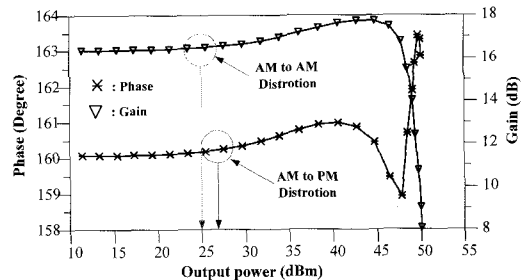


그림 5. 구동 증폭기의 왜곡 특성

검증하고자 제작된 전력증폭기의 설계 사양을 보인 것이다.

그림 4는 이러한 설계 사양을 만족하기위하여 설계된 중단 증폭기의 AM to PM 및 AM to AM 의 설계 특성을 보인 것 이다. 본 설계는 Agilent 사의 ADS2004를 이용하여 설계하였다.

그림 4에서 보인 왜곡 특성은 AM to AM 과 AM to PM 이 출력 전력이 증가함에 따라서 이득 특성이 하강하는 특성을 보이고 있다. 이러한 특성을 보상하기 위하여 본 연구에서는 앞서 해석한 결과개념을 이용하여 구동 증폭기의 왜곡 특성을 중단증폭기의 특성과 반대가 되도록 그림 5와 같이 설계하였다.

그림 5는 구동 증폭기의 AM to AM 과 AM to PM 특성이 출력 전력이 증가함에 따라서 이득 및

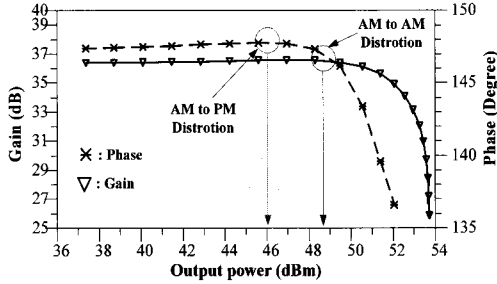


그림 6. 설계된 선형화 전력 증폭기 왜곡 특성

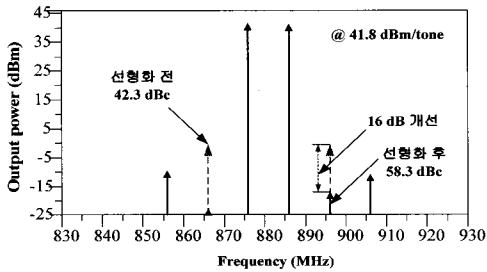


그림 7. 설계된 선형화 전력 증폭기 혼변조 왜곡 특성

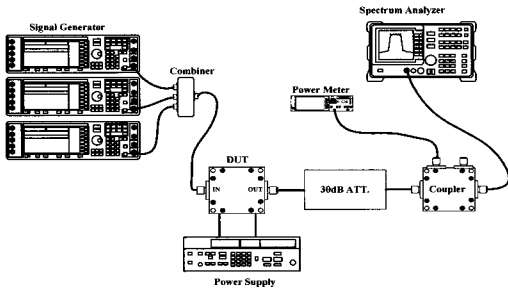


그림 8. 측정 장비 구성도

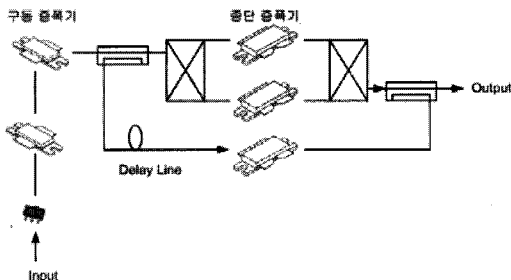


그림 9. 제작된 선형화 전력 증폭기 블록

위상 특성이 증가하는 특성을 보이고 있다. LDMOS 로 구성된 구동 증폭기는 Bias 및 출력 정합특성에 따라서 이러한 특성을 갖도록 할 수 있다⁷⁾. 그림 4의 중단 증폭기의 특성과 그림 5의 구동 증폭기의 특

성이 결합하면 그림 6과 같은 특성이 나타나게 된다.

그림 6에서는 선형화 전력 증폭기의 AM to AM 왜곡과 AM to PM 왜곡 특성을 보인 것이다. 설계된 결과에서 확인할 수 있듯이 앞에서 설계된 중단 증폭기의 AM to AM 왜곡 발생 전력점이 3-4 dB 정도 상승하여 중단 증폭기의 왜곡 성능을 보강한 효과를 보이고 있으며, AM to PM 왜곡 특성도 2-3 dB의 선형화 특성을 보이고 있다.

그림 7은 선형화 전력 증폭기의 혼변조 왜곡 특성을 나타낸 것이다. 선형화 전과 선형화 후의 왜곡 특성이 16 dB 정도 개선된 특성을 보여 58.3 dBc의 특성을 나타내고 있다. 그림 7에서는 5차 성분이 상쇄 되지 않은 이유는 구동증폭기에서 발생된 왜곡 성분이 3차 성분만 존재하기 때문이다. 설계에서는 구동 증폭기의 5차 성분까지 고려하지 않았으며, 단지 본 연구의 개념의 구현성만을 검증하였다.

IV. 제작 및 측정

그림 8은 전력증폭기를 측정하는 측정 장비 구성도이다. 전력 증폭기를 측정하기 위한 장비로는 IS-95 신호원 Agilent사의 ESG4438C 3대를 이용하여 20FA CDMA 신호를 발생 시켰다.

그림 9는 본 연구에서 제작된 선형화 증폭기의 구성 블록도이며 그림 10은 실물 사진이다. 전체 크기는 250 × 200 mm 이며 높이는 30 mm이다. 그림 11은 구동 증폭기와 중단 증폭기를 결합하여 AM to AM 과 AM to PM 왜곡 특성을 측정한 결과 이다. 구동 증폭기와 결합하여 AM to AM 왜곡은 4 dB, AM to PM 왜곡은 4 dB 정도의 선형성이 개선되었음을 확인할 수 있다. 그림 12는 중단 전력 증폭기의 특성과 구동증폭기와 결합된 중단 증폭기의 특성을 나타낸 것이다. 중단 증폭기의 선형성이 10 dB 정도 개선되었음을 보이고 있다.

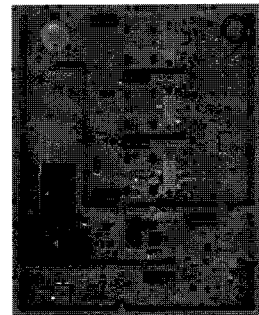


그림 10. 제작된 선형화 전력 증폭기 실물 사진

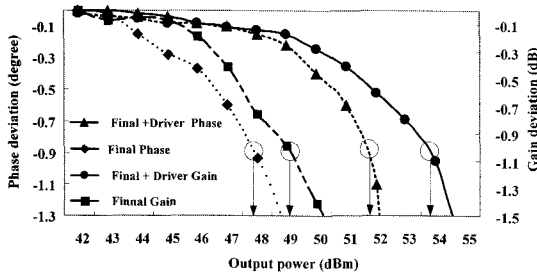


그림 11. 선형 증폭기의 왜곡 특성 측정 결과

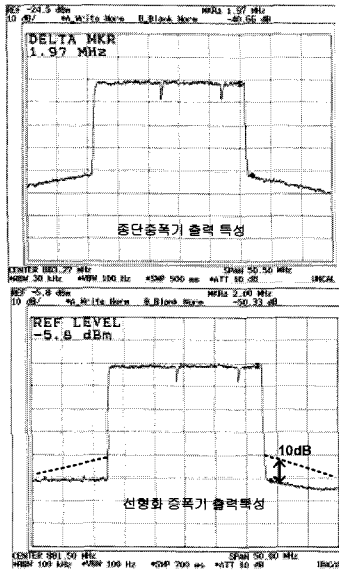


그림 12. 선형성 특성 측정결과 (44.8 dBm/20FA)

V. 결론

본 논문은 전력증폭기의 왜곡특성을 해석하여 이를 이용하여 혼변조(Inter-modulation distortion) 왜곡의 원인을 분석하고 이를 최소화하고자 전력 증폭기 설계 개념을 제시하고 검증하였다.

해석된 전력증폭기의 AM to AM 왜곡 특성과 AM to PM 왜곡 특성은 서로 독립적으로 발생되며 두 왜곡특성이 결합하여 최종적인 전력증폭기의 왜곡 특성이 보여 짐을 확인하였다. 이러한 왜곡성분을 최소화 하고자 새롭게 전력증폭기의 설계 방법을 제시하였으며 제작한 결과 IS-95 20FA 신호 30 W 출력 전력에서 50dBc (1FA, 20FA@± 1.98MHz)의 스퓨리어스 특성을 보였다. 이러한 특성은 중단 전력 증폭기의 스퓨리어스 특성을 10 dB 개선된 성능을 보인 것이다.

향후 연구의 과제로 전력 증폭기의 효율 개선 방

법을 구체적으로 해석하고 응용하는 것과 선형성을 최적화 하는 과정에서 중단 증폭기와 구동증폭기를 제어하기위한 제어 알고리즘 및 하드웨어 구현이 연구 과제로 남는다.

참고 문헌

- [1] F. H. Raab, P. Abeck, S. Cripps, P. B. Kenington, Z. B. Popvic et al., "Power amplifier and transmitters for RF and microwave," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 50, no. 3, pp. 814-826, Mar. 2002.
- [2] F. H. Raab, P. Abeck, S. Cripps, P. B. Kenington, Z. B. Popvic et al., "RF and microwave power amplifier and transmitters technologies-Part 1," *High Frequency Electronics*, 2003.
- [3] F. H. Raab, P. Abeck, S. Cripps, P. B. Kenington, Z. B. Popvic et al., "RF and microwave power amplifier and transmitters technologies-Part 2," *High Frequency Electronics*, 2003.
- [4] B. Kenington, *High-linearity RF Amplifier Design*, Artech House, 1999.
- [5] 하성재, "전력증폭기의 선형성 개선을 위한 왜곡 해석과 응용", 광운대학교 박사학위논문, 2006.
- [6] Freescale, LDMOS Data Book, 2005

하성재 (Sung-Jac Ha)

정희원



1999년 2월 광운대학교 제어계측공학과 졸업

2001년 2월 광운대학교 전파공학과 석사졸업

2006년 2월 광운대학교 전파공학과 박사졸업

2005년 12월~현재 삼성탈레스 책임

연구원

<주관심분야> Radar H/W 시스템 설계, SSPA

홍의석 (Ui-Seok Hong)

정희원

"한국통신학회논문지 제31권 10A, 참조"