pHEMT 전력 증폭기의 IMD_3 비대칭성과 ACPR 특성 해석

*이 강 전, 박 찬 혁, 구 경 헌
인천대학교 전자공학과
e-mail : *lkj1879@hanmail.net*

Analysis of Asymmetrical IMD_3 And ACPR Characteristics for pHEMT Power Amplifier

*Kang Jun Lee, Chan Hyuck Park, and Kyung Heon Koo
Dept. of Electronics Eng., University of Incheon,
Incheon, 402-749, Korea

Abstract

This paper discribes the nonlinear distortion of a pHEMT power amplifier. In the paper, we have used some commercially available power amplifiers for analyzing the relationship between the IMD_3 and ACPR for wireless LAN. And the IMD_3 results using two-tone test have been compared with ACPR to satisfy the required 802.11g standard ACPR value. Measurement result shows that IMD_3 of 20MHz tone-spacing need to be more than 18.45dBc for power amplifiers. The WCDMA signal is fed into the power amplifier, for analyzing relationship between the asymmetrical IMD_3 and ACLR. With measurement result, the asymmetrical IMD_3 characteristic has increased with the increase of two-tone spacing. IMD_3 measurement result with maximum 20MHz of the two-tone spacing, shows that the difference between IMD_3(lower) and IMD_3(upper) is about 7dB. And the measured ACLR shows 5dB difference at -4MHz and +4MHz offset from center frequency.

Ⅰ. 서론

현재 다양한 이동통신 시스템에 사용되고 있는 전력증폭기는 고선형성 특성과 더불어 수십 MHz의 대역폭을 커버하는 광대역 특성이 요구되어진다. 이러한 통신 시스템 환경에서 사용되는 전력증폭기는 최대 전력효율을 얻기 위하여 포화영역 근처까지 증폭기를 동작시키게 되며, 이렇게 포화영역까지 동작하는 증폭기는 비선형왜곡으로 인해 IMD(Inter-Modulation Distortion) 신호가 발생하게 된다. 특히 전력증폭기는 시스템의 선형성을 좌우하는 중요한 부품으로서, 전력증폭기의 비선형성 특성에 의한 신호왜곡은 스펙트럼 재성장(spectrum regrowth)을 발생시키고, 이는 인접한 채널에 간섭을 주고 시스템의 선형성을 저하시키는 요인이 된다.

디지털 통신용 전력 증폭기의 선형성은 ACPR (Adjacent Channel Power Ratio) 측정을 통하여 이루어진다. 이 광대역 신호를 이용하는 ACPR 측정은 2-tone test를 통하여 얻어지는 IMD(Inter Modulation Distortion) 측정결과와 밀접한 관계를 가지고 있다. 따라서 ACPR과 IMD의 관계에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1~2].

또한 기존의 선형화 기법은 광대역 신호를 인가한 전력증폭기의 ACLR(Adjacent Channel Leakage Ratio) 또는 IMD가 대칭적으로 발생한다고 가정하여 선형화 기법을 적용하므로, 선형화개선 정도가 낮다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 전력증폭기에 무선 LAN 신호를 인가하여 요구 ACPR을 만족하는 IMD_3값을 제시하였고, 또한 WCDMA 신호를 이용하여 주파수차 증가에 따라 비대칭적으로 발생하는 IMD_3를 분석하였으며, WCDMA신호 인가시 전력증폭기의 ACLR을 측정하여 IMD_3와 비교 분석하였다.

Ⅱ. 2-tone IMD와 ACPR의 상관관계

증폭기의 multitone 혹은 복잡하게 변조된 신호의 비선형성 측정은 2-tone을 이용한 측정의 결과로 근사시

킬 수 있는 방법이 개발되고 있다. 이는 역으로 2-tone을 이용한 측정 결과로 ACPR 특성을 유추할 수 있음을 의미한다.

증폭기에 2-tone의 신호 $v_i(t)=v_m(\cos\omega_1 t+\cos\omega_2 t)$ ($\omega_1=2\pi f_1, \omega 2=2\pi f_2$)가 입력될 때, 증폭기의 출력신호는 일반적으로 식(1)과 같이 나타나고, 이중 3차 항의 출력신호는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{out}=k_1 v_i+k_2 v_i^2+k_3 v_i^3 \qquad (1)$$

$$\begin{aligned} v_{out,3}(t) &= k_3[(v_m\cos w_1 t+v_2\cos w_2 t)]^3 \\ &= \frac{v_m^3}{4}(\cos 3w_1 t+\cos 3w_2 t) \\ &+ \frac{3v_m^3}{4}\{\cos(2w_1+w_2)t+\cos(2w_1-w_2)t \\ &+ \cos(2w_2+w_1)t+\cos(2w_2-w_1)t\} \\ &+ \frac{9v_m^3}{4}(\cos w_1 t+\cos w_2 t) \end{aligned} \qquad (2)$$

위에서 구한 2-tone 해석 결과식에서 계산상의 편의를 위해 입력된 두 신호의 크기를 $x_1=x_2=X$, 계수를 K라 하면, 입력된 두 신호에 의해 발생하는 3차 IMD 성분 중, $2f_1-f_2$(또는 $2f_2-f_1$)의 주파수 성분에 의한 출력 전력을 P_D라 하고, 입력된 주파수 성분인 f_1(또는 f_2)에 의한 선형적인 출력 전력을 P_L이라 하면, ACPR은 다음과 같이 유도 될 수 있다[3~4].

$$ACPR_{dbc}=\left(\frac{P_L}{P_D}\right)_{db} \qquad (3)$$

$$=\left(\frac{\frac{k_1^2}{2}\frac{X^2}{K}K}{\frac{k_3^2}{32}\frac{X^6}{K^3}\times 9\times 4\left(4\sum_{r=1}^{K-1}N_1+\sum_{r=1}^{K-1}M_1\right)}\right)_{db}$$

$$=IMR_{2(dbc)}+10\log\left(\frac{K^3}{16N_4+4M_4}\right)+21$$

N_4, M_4는 다음과 같다.

$$N_4=\sum_{r=1}^{n-1}N_1 \qquad (4)$$

$$=\sum_{r=1}^{K-1}\left[\left(\frac{K-r}{2}\right)^2-\frac{\varepsilon_1}{4}\right]$$

$$=\frac{2K^3-3K^2-2K}{24}+\frac{\varepsilon}{8}$$

$$M_4=\sum_{r=1}^{n-1}M_1 \qquad (5)$$

$$=\sum_{r=1}^{K-1}\left[\left(\frac{K-r}{2}\right)^2-\frac{\varepsilon_1}{4}\right]$$

$$=\frac{K^2-\varepsilon}{4}$$

ε, ε_1은 다음과 같다.

$$\varepsilon=\mathrm{mod}\left(\frac{K}{2}\right),\ \varepsilon_1=\mathrm{mod}\left(\frac{K+r}{2}\right) \qquad (6)$$

mod(x/y)는 x를 y로 나눈 나머지를 말한다.

Ⅲ. 증폭기의 메모리 효과

일반적으로 증폭기의 입출력 관계는 식(1)과 같이 메모리효과를 고려하지 않은 일반 다항식으로 표현된다. 그리고 이 증폭기에 앞에서 말한 2개의 주파수 신호를 인가하였을 때 IMD_3 (third-order intermodulation distortion) 의 USB와 LSB의 진폭은 식(7)과 같이 나타나게 된다.

$$IMD_3=\frac{3}{4}k_3 v_m^3 \qquad (7)$$

그러나 실제의 전력증폭기 동작은 식(7)에서 나타낸 것처럼 IMD_3 입력진폭의 정확히 세제곱에 비례하여 증가하는 것은 아니다.

2개 주파수 신호가 3차 다항식으로 모델링된 협대역 증폭기에 적용된다면 우선 출력에서 IMD_3 신호는 2개 주파수 간격에 관한 식이 아니고, 이 IMD_3 의 진폭은 정확하게 입력의 진폭에 비해 3배씩 증가 할 것이다. 일반 다항식으로 모델링된 것과 실제 위상 특성을 고려한 것을 비교하여 그림1과 같이 나타내었다. 2개 신호의 주파수 간격에 따라 IMD_3항의 위상이 변화하는 것을 그림1에 나타내었다.

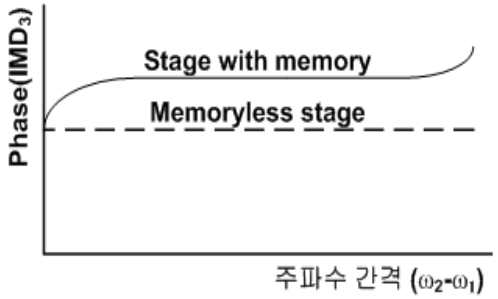

그림 1. 주파수 간격에 따른 위상의 변화

점선은 식(7)에서 주파수 간격에 따른 위상(또는 진폭)의 변화가 없는 것을 나타낸 것이고 실제 전력증폭기 동작은 주파수 간격에 따라 위상이 변하는 것을 실선 그래프로 나타내었다.

식(1)은 비선형적으로 동작하는 전력 증폭기를 모델링하기에 다음과 같은 이유로 불충분하다. 첫번째 이유로 식(1)은 단순히 입력과 출력과의 관계만 나타내고 다른 왜곡성분을 고려하지 않았다. 예를 들면 바이폴라 트랜지스터에서 베이스-이미터의 저항성분은 트랜지스터의 베이스에서 비선형적인 응답의 원인이 되며, 이러한 것들은 다른 비선형적인 왜곡으로 나타난다. 두번째는 트랜지스터에는 한 개 이상의 비선형적인 구조가 있기 때문에 식(1)처럼 항상 일정한 값을 가지고 있지 않는다. 그래서 왜곡이 만들어지는 구조를 이해하기 위해서는 두 개의 다항식을 종속 연결된 구조로 트랜지스터 증폭기를 분석해야 된다.

두 개의 다항식으로 구성되어 있는 구조를 생각하여

볼 때 2개 주파수 신호가 처음 블록을 거쳐 출력에 나온 신호는 그림 2와 같은 multi tone 신호가 될 것이고 이 multi tone 신호는 다음 블록의 입력으로 들어가게 될 것이다. 이 과정에서 출력된 IMD_3는 여러 다른 주파수 소자들과 혼합되어질 것이다. 예를 들면 $\omega_2-\omega_1$과 ω_2가 두 번째 블록에서 믹싱되어 IMD_3가 나올 것이다. 또한 입력신호의 하모닉인 $2\omega_2$와 $-\omega_1$에 의해서도 IMD_3가 생성될 것이다.

그림 2처럼 $\omega_2-\omega_1$ 주파수뿐만 아니라 하모닉 성분인 $2\omega_2$, $2\omega_1$ 주파수에 의해 IMD_3가 영향을 받게 된다. 회로에서의 비선형성은 전류 성분으로 볼 수 있기 때문에 envelope 신호($\omega_2-\omega_1$)와 2차 하모닉 신호($2\omega_2$, $2\omega_1$)의 임피던스에 의해 전압이 생겨나고 바이어스회로에 반사되어 들어오게 된다. 이때 $\omega_2-\omega_1$성분은 주 신호성분과 차이가 많이 나기 때문에 이전 성분에서 발생된 $\omega_2-\omega_1$에 의해 현 신호가 영향을 받게 되어 출력에 나타나게 된다.[5]

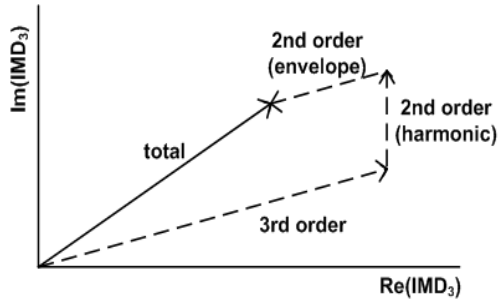

그림 2. IMD_3의 구성요소

Ⅳ. 측정 결과 및 분석

4.1 ACPR(20MHz offset)과 출력전력

본 연구에서는 입력전력에 따른 출력전력과 ACPR 특성을 측정하기 위하여 무선랜 신호를 크기를 변화시키며 증폭기에 인가 하였다.

측정 결과를 그림 3에 제시 하였으며 입력 전력이 증가함에 따라 ACPR은 P_1dB에서 -28.3dBc의 값을 가진다.

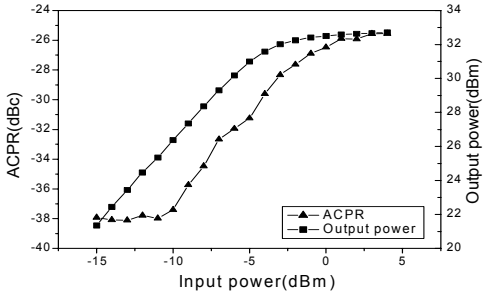

그림 3. 전력 증폭기의 ACPR과 출력 전력

4.2 ACPR(20MHz offset)과 IMD_3의 관계

ACPR과 IMD_3의 관계를 파악하기 위해 증폭기의 입력전력을 증가시킨 결과를 그림 4에 제시 하였다.

입력 전력이 -15dBm일때 20MHz떨어진 지점에서의 ACPR은 -37.9dBc, 이때 IMD_3는 주파수 간격이 10MHz일 때와 20MHz일 때 각각 -41.8dBc, -42.6dBc이고, 입력 전력이 0dBm일때는 ACPR은 -26.4dBc, IMD_3는 각각 -16.6dBc, -16.2dBc이다.

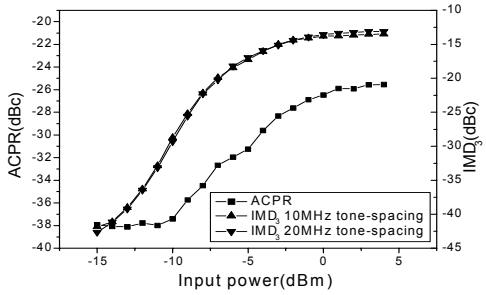

그림 4. ZHL-42 전력증폭기에서 입력 전력에 따른 ACPR과 IMD_3의 관계

4.3 IMD_3의 비대칭성

주파수 간격에 따른 IMD_3의 비대칭성을 분석하기 위해 전력 증폭기에 2개 신호를 인가한 후 입력 전력과 주파수 간격을 증가시키면서 스펙트럼 분석기를 통해 IMD_3를 측정하였다. 주파수 간격은 각각 1MHz, 2.5MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz, 그리고 20MHz 간격에 따라 각각의 IMD_3를 측정하여 그 변화를 알아보았다.

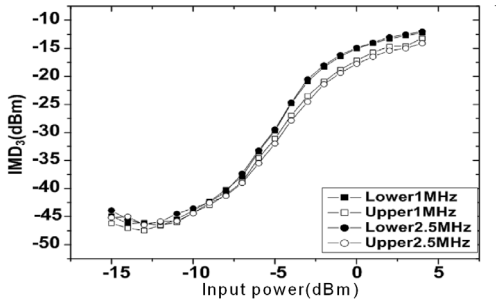

그림 5. 주파수 간격 (1MHz, 2.5MHz)에 따른 IMD_3

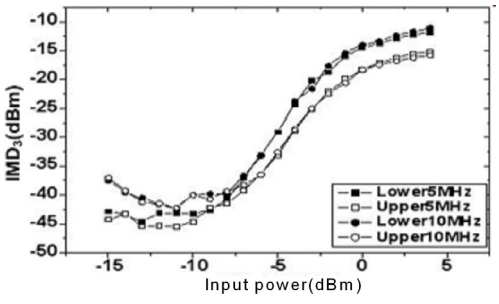

그림 6. 주파수 간격 (5MHz, 10MHz)에 따른 IMD_3

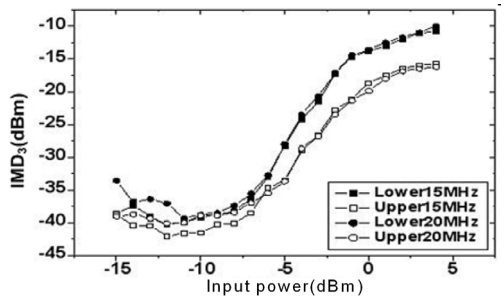

그림 7. 주파수 간격(15MHz, 20MHz)에 따른 IMD_3

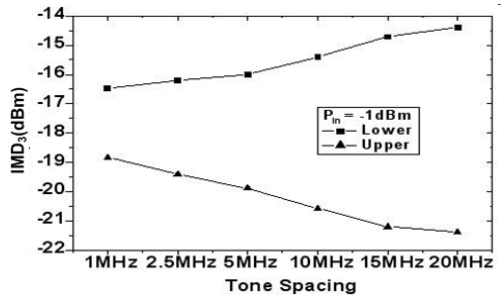

그림 8. P_{in} = -1dBm 일 때 tone spacing에 따른 IMD_3

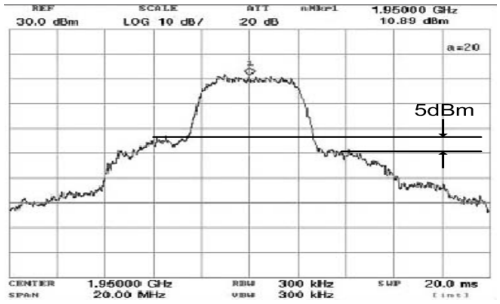

그림 9. 전력 증폭기의 ACLR 측정 (P_{in} = -1dBm)

그림 5, 6, 7 은 입력전력 -15dBm 에서 4dBm까지의 입력 전력에 대한 IMD_3 LSB와 USB성분의 크기를 보여주고 있다. 측정 결과 전력 증폭기의 IMD_3의 비대칭성은 주파수 간격이 20MHz 이고, 입력전력이 -1dBm 일 때 약 7dB로 제일 큰 값을 나타내고 있다.

측정결과에서 1MHz에서 20MHz로 주파수 간격이 증가함에 따라 IMD_3의 비대칭성이 커지는 것을 측정 결과를 통해 알 수 있었다. 그림 8은 IMD_3 크기가 가장 큰 비대칭성을 갖는 입력 전력 -1dBm에서 주파수 간격에 따른 IMD_3 값이다.

그림 8을 통해서 IMD_3의 비대칭성이 일정 입력전력 레벨에서 주파수 간격에 따라 증가하는 것을 볼 수 있으며 20MHz의 주파수 간격에서 IMD_3의 LSB 및 USB 특성이 약 7dB의 비대칭성을 갖는다.

WCDMA 신호를 인가 시 ACLR의 비대칭성을 분석하기 위해서 입력 전력 -1dBm에서 WCDMA 1FA를 인가하여 출력스펙트럼을 측정하여 그림 9와 같이 중심주파수 1.95GHz에서 +4MHz와 -4MHz offset에서 약 5dB의 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

Ⅴ. 결론

본 논문에서는 pHEMT 전력 증폭기를 사용하여 전력 증폭기의 비선형 왜곡 특성인 IMD_3의 비대칭성과 ACPR 특성에 대해서 분석하고자 하였다.

측정결과 주파수 차이가 증가함에 따라 IMD_3의 비대칭성이 커지는 것을 볼 수 있었으며, 최대 20MHz의 주파수 간격에 대하여 IMD_3(Lower)와 IMD_3(Upper)는 약 7dB의 차이를 보였고, 이때 무선 LAN 마스크 규격을 만족하기 위한 IMD_3는 18.45dBc이상이어야 한다는 것을 알 수 있었다. 또한 ACLR을 분석한 결과 중심주파수 1.95GHz에서 +4MHz offset 과 -4MHz offset에서 5dB의 차이를 확인하였다.

본 논문의 결과는 pHEMT 전력 증폭기에 요구되는 선형 특성 분석에 활용 가능한 것이다.

참고 문헌

[1] R.A.Minasian, "Intermodulation Distortion Analysis of MESFET Amplifier Using Volterra Series Representation," IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol.28, pp.1-8, Jan.1980.

[2] J.Sevic, K.Burger, and M.Steer, "A Novel Envelope Termination LoadPull Method for ACPR Optimization of RF/Microwave Power Amplifiers," IEEE MTT-s Int. Microwave Symp. Dig. pp.723-726, 1988

[3] N.B. Carvalho and J.C. Pedro, "Compact Formulas to Relate ACPR and NPR to two-tone IMR and IP3", Microwave Journal vol. 42,. no.12, pp.70-84. Dec. 1999.

[4] 정계영, 채규성, 김창우, "무선 통신용 RF 전력 모듈의 IMD 특성 측정에 관한 연구" 2002년 춘계 마이크로파 및 전파학술 대회 논문집, vol.25, No.1, 2002. pp.299-302.

[5] J. Vuolevi, T. Rahkonen, and J. Manninen, "Measurement Technique For Characterizing Memory Effects In RF Power Amplifiers," IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. 49, no. 8, pp.1383-1389, Aug. 2001.