http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2011.22.12.1172

다중 톤 신호의 통계적 특성 확보를 통한 광대역 신호 증폭기의 인접 채널 간섭 분석

Analysis of Adjacent-Channel Leakage-Ratio of Wide-Band Power Amplifiers through Multi-Tone Signals with Statistical Similarity

박 영 철

Youngcheol Park

요 약

본 논문에서는 광대역 무선 신호를 증폭하는 전력증폭기의 성능 테스트 시 인접 채널 간섭(ACLR) 특성을 측정하는 데 있어서, 효과적인 다중 톤 생성을 활용한 테스트 방안에 관하여 연구하였다. 그 동안 단일 주파수 정현파 신호를 테스트에 활용하는 경우 신호가 복잡해짐에 따라 오차가 증가하는 문제점이 있기에, 실제 변조 신호와의 측정 오차를 최소화하도록 다중 톤 신호를 설계하는 방식을 제안하였다. 제안된 다중 톤은 시간 축에서의 유사성을 확보하는 방식으로 설계되어 기존의 다중 톤 생성 방식 대비 더욱 적은 수의 톤으로 정확한 결과를 얻을 수 있다. 이의 검증을 위하여 802.11a 규격의 기저 대역 복소 신호를 다중 톤 신호로 대체하였으며, 이를 전력증폭기 성능 검증에 활용하였다. 그 결과, N=10 이상의 톤 수를 확보하는 경우 3차, 5차 비선형성에 의한 ACLR 특성이 실제 신호 활용한 경우와 1 dB 이하의 오차를 나타내었다.

Abstract

In this paper, a design method of multi-tone signals for the measurement of adjacent-channel power-ratios on power amplifiers is suggested. Because most tests for power amplifiers in production are performed with single-tone signals, its testing accuracy is not guaranteed as the signal complexity increases. Therefore, the application of multi-tone signals to the testing is suggested by optimized complex coefficients of each tones for the best statistical similarity to the original modulated signal. From the verification, a 802.11a signal was replaced with a multi-tone signal of N=10, with the complex coefficients generated by the suggested method. The resulting measurements on the ACLR of 2.4 GHz power amplifier showed successful accuracy of less than 1 dB discrepancy.

Key words : Adjacent-Channel Power-Ratio, Power Amplifier

Ⅰ. 서 론

최근의 급증하는 무선 통신 데이터 수요로 인하여 M-QAM OFDM 등과 같이 복소 신호를 활용하여 정보 집적도를 향상시키거나 무선 환경에서의 전달 성능을 개선시키는 기술이 주목받고 있다. 그러나 이러한 신호들은 전력증폭기 등의 전송 장치에 필연적으로 매우 높은 선형성을 요구하며, 이러한 선형성을 파악하는 중요한 방법으로 ACLR(Adjacent-Channel Leakage-Ratio)를 활용한 판단이 많은 수를 차지

「이 연구는 한국외국어대학교 교내학술연구비의 지원에 의하여 이루어졌음.」

한국외국어대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Hankuk University of Foreign Studies)

· 논 문 번 호 : 20110929-111

· 교 신 저 자 : 박영철(e-mail : ycpark@hufs.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 11월 21일

하고 있다. 그러나 이러한 측정 방식은 신호의 규격에 따라 측정에 사용되는 신호가 변경되어야 하기에 지속적으로 시간적, 경제적 손실이 수반된다. 따라서, 무선 통신기기 생산 테스트에서는 단순 정현파를 활용하여 기본 성능만을 테스트하고 있으나, 신호의 특성이 복잡화됨에 따라 테스트 정확도가 떨어지고 있는 추세이다[1]. 이를 극복하기 위해 실제 복조 신호와 유사한 특성을 나타내는 다중 톤 등의 신호를 설정하여 테스팅에 적용하는 시도가 활발히 이루어지고 있다[2],[3]. 여기에 원 신호의 특성을 근접하게 만들어 측정 정확도를 향상시키는 방법으로, 변조 신호의 주파수 특성을 샘플링하는 DFT(Discrete Fourier Transform) 활용 방식이 주목을 받고 있다[4],[5]. 그러나 이러한 방식은 변조 신호 크기 분포에 따른 정렬 및 다중 톤 신호의 재배치 등 일련의 복잡한 과정을 거쳐야 신호를 설계할 수 있으며, 일반적으로 톤 수가 20 개 이상으로 실제 변조 신호를 효율적으로 대체하고자 하는 목적에 부합하지 않는 단점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 기술적 제한을 극복하기 위하여 다중 톤의 생성에 있어 변조 신호의 통계적 분포를 시공간에서 최적화하고 평균 전력을 보정하는 방식을 활용함으로써 기존 DFT 방식 대비 간소화한 절차를 통하여, 다중 톤을 활용한 효율적인 테스트 방안에 대하여 제시하였다.

Ⅱ. 다중 톤 신호

다중 톤 신호는 반송주파수 f_o를 중심으로 아래위 주파수 대역에 걸쳐 일정 간격으로 분포된 정현파 신호의 집합으로 정의되며, 이를 기저 대역에서 표현할 경우 다음 식으로 정의된다.

$$x_c(t) = Re\left\{\sum_{k=0}^{N-1} A_k e^{j2\pi[f_0+\triangle f(k-(N-1)/2)]t+j\phi_k}\right\} \quad (1)$$

여기서 A_k와 ϕ_k는 각 톤의 크기 및 위상을 나타내며, $\triangle f$는 각 톤의 주파수 간격을 나타낸다. 이러한 $\triangle f$는 다시 톤 수와 신호대역폭 BW로 표현될 수 있다.

$$\triangle f = BW/(N-1) \quad (2)$$

이들은 모두 독립 변수로서 상호 복합적으로 신호의 통계적 특성을 결정하며, 증폭기의 출력 비선형성을 가늠할 수 있는 주요 파라미터이다. 이 중 BW는 변조 신호의 대역폭에 의해 결정되어지므로, 나머지 변수인 N, A_k, ϕ_k를 활용하여 변조된 신호와 유사한 특성을 갖도록 설정한다. 그럼으로써 전력증폭기의 주요 측정 항목인 ACLR, 채널 파워, 점유 대역폭 등을 효율적으로 측정할 수 있다. 특히 위상의 경우 신호의 통계적 분포, 즉 PAPR 혹은 CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function) 등을 제어할 수 있는 주요 인자이다. 그림 1은 N=10인 다중 톤 신호의 위상 조절만으로 변화할 수 있는 PAPR 분포를 802.11a 변조 신호와 비교한 그림이다. 위 그림에서와 같이 위상 변화만으로 약 4.5 dB의 PAPR 분포를 변화시킬 수 있음을 알 수 있다.

따라서, N개의 다중 톤 신호를 설정하는 작업은 각각 위상과 크기를 나타내는 $2N$개의 미지수를 설정하여 변조 신호의 특성과 유사하게 표현하는 과정이라고 할 수 있다. 이와 같이, 무한 개의 변수 조합으로부터 최적화된 해를 찾기 위한 또 하나의 조건으로써 신호의 통계적 분포 함수인 P.D.F.(Probability Distribution Funcion)가 활용되며, 이 때 다중 톤 신호는 메모리 효과가 없는 비선형 시스템의 전력과 ACLR 등을 표현할 수 있다[5]. 이에 더하여 일반화된 비선형 시스템의 경우, 전력 밀도 함수 $S_{xx}(\omega)$는 테스팅 규격 신호 $x(t)$의 자기 상관 함수 $R_{xx}(\tau)$의 푸리에 변환을 통하여 얻을 수 있다.

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau)e^{-j\omega\tau}d\tau, \quad (3)$$

$$R_{xx}(\tau) \equiv E[x(t)x(t+\tau)] \quad (4)$$

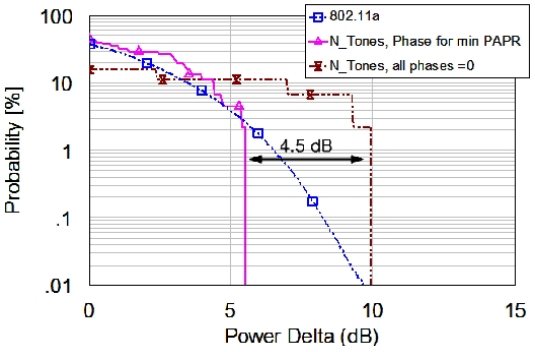

그림 1. N=10 다중 톤의 위상 변화에 의한 전력 분포 함수 변화 예시

Fig. 1. PAPR variation of N=10 multi-tone signal with different phase distributions.

또한, 이러한 전력 밀도 함수는 $x(t)$의 푸리에 변환 함수인 $X(\omega)$를 활용한 통계적인 평균치로부터 산출될 수 있다.

$$S_{xx}(\omega) = E[X(\omega)X(\omega)^*] \tag{5}$$

한편, 다중 톤의 복소 신호 $x_c(t)$는 다음과 같은 이산 푸리에 변환(DFT)으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} x_c(t) &= \sum_{k=0}^{N-1} A_k e^{j2\pi(f_0 - BW/2 + k\triangle f)t + j\phi_k} \\ &= \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{j2\pi(f_0 - BW/2 + k\triangle f)t} \end{aligned} \tag{6}$$

따라서, DFT 계수 C_k는 개별 톤 주파수 $f_k = f_0 - BW/2 + k\triangle f$에서 $X(\omega)$의 크기와 위상을 의미하므로 C_k의 ensemble 평균으로써 위 식 (5)에서의 전력 밀도 함수를 표현할 수 있다[5]. 그러나, 이와 같은 다중톤 생성 방식을 활용한 테스팅은 단지 특정 주파수에서의 원 신호 $X(\omega)$의 크기와 위상, 즉, 주파수적인 특성만을 표현하기에 신호의 전체적인 통계 분포를 나타내지 못하며, 결과적으로 ACPR의 정확한 예측에는 한계가 있다고 볼 수 있다. 따라서 좀 더 정밀한 테스팅을 위하여 신호 특성을 정밀하게 표현하면서 생성이 간단한 방법을 도출하는 것이 테스팅 신호 생성의 핵심이다.

여기서, 만일 식 (6)을 변형하여, 일정 오차를 가지는 유사함수 $\hat{x_c}(t)$로써 표현한다면, C_k에서의 자유도를 확보할 수 있으며, 아래 식과 같은 유사 DFT 변환을 통하여 주파수 특성과 통계적 분포를 최적화하도록 설정할 수 있다. 이를 위하여, 시간 축에서 최소 자승 오차법(least squares method)를 활용하여 원 신호 $x(t)$로부터 개별 톤의 복소 계수를 C_k'를 추출한다.

$$\hat{x_c}(t) = \sum_{k=-N/2}^{N/2} C_k' e^{j2\pi(f_0 + k\triangle f)t}, \tag{7}$$

$$x(t) = \hat{x_c}(t) + \epsilon_{\min}(t), \tag{8}$$

$$C_k' \text{ for } \epsilon_{\min}^2(t) = \min\left[\sum_{t=0}^{L} |x(t) - \hat{x_c}(t)|^2\right] \tag{9}$$

Ⅱ. 다중 톤의 설계 및 검증

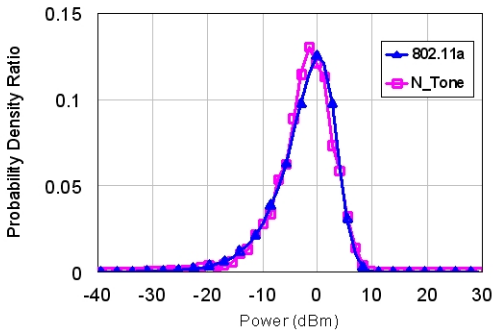

그림 2. 설계된 N=10 다중 톤과 802.11a 복조 신호의 확률 분포

Fig. 2. Probability distribution of the designed N=10 multitone v.s. 802.11a signal.

다중 톤의 복소 계수 C_k' 추출에 있어서, 제안된 시간 축에서의 최소 자승법을 적용한 경우의 성능을 검증하였다. 이를 위하여 802.11a 변조 신호를 대상으로 톤 수 N=10의 다중 톤 신호를 설계하였다. 그림 2는 802.11a 변조 신호와 설계된 다중 톤 신호의 확률 분포 함수를 나타내었으며, 그림에서와 같이 시간 축에서 설계된 다중 톤 신호는 원 신호와 거의 유사한 확률 분포를 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 동 신호의 주파수 분포는 BW로 제한된 초기 설정값에 의하여 원 신호와 유사한 대역 제한 특성을 나타내고 있다. 다만, 식 (9)의 오차로 인하여 대역 내의 주파수 분포는 약간의 차이가 존재하는데, 이는 계수 설정 조건을 추가함으로써 일정 수준 이하로 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

위와 같이 설계된 다중 톤 신호 측정 성능을 검증하기 위하여 2.4 GHz 대역에서 1 watt급의 802.11a 전력증폭기에 적용하여 시뮬레이션 하였으며, 802.11a 규격의 변조 신호 측정 결과와 비교하였다. 그림 3는 N=10 다중 톤 신호의 spectral regrowth를 원 변조 신호의 결과와 비교한 결과이다. 그림 3에서 다중 톤 신호의 스펙트럼 전력의 경우, 대역 내 평균 전력값을 기준으로 offset을 주어 변조 신호의 ACLR 결과와 비교를 원활히 할 수 있도록 표현하였다. 결과적으로, 그림에서 알 수 있듯이 3차 및 5차 비선형 영역에서 매우 근접한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

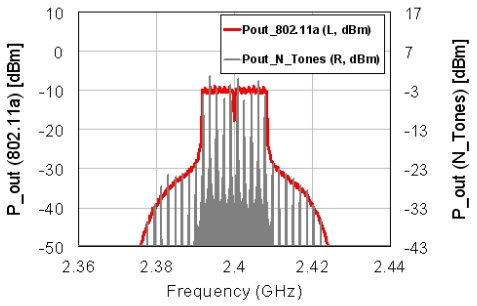

그림 3. 제안된 방법으로 설계된 N=10 다중 톤과 802.11a 신호에 의한 전력증폭기 ACLR 테스트 결과 비교(다중 톤의 경우 대역 내 평균 전력 기준으로 offset 적용(오른쪽 축))

Fig. 3. ACLR test results with N=10 multitone v.s. 802.11a signal(offset is given on the right axis to compare the multitone test result to the 802.11a signal's).

표 1. 다중 톤의 수에 의한 ACLR 측정 정확도

Table 1. ACLR accuracy of multi-tones.

ACLR / 측정 신호	$f_{offset} = 10$ MHz (dBc)	$f_{offset} = 15$ MHz (dBc)
802.11a	−20.3	−30.3
N-tone(N=10)	−20.9	−30.2
N-tone(N=40)	−20.1	−29.5

위의 결과를 확장하여 N=40의 다중 톤 신호를 설계하여 전력증폭기에 적용한 ACLR 결과를 표 1에 나타내었으며, 모든 경우 오차 1 dB 이내의 매우 정확한 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Ⅲ. 결 론

본 논문에서는 무선 전송 시스템의 ACLR 성능 테스팅에 있어 변조된 통신 신호를 다중 톤으로 대체하여 효율적인 테스트가 가능하도록 효과적인 다중 톤 생성 방안에 관하여 연구하였다. 제안된 다중 톤은 기존의 DFT 활용 방법을 보완하여, 주어진 주파수 대역 조건에 더하여 시간 축에서의 통계적 유사성을 확보하는 방식으로 설계하였다. 이의 검증을 위하여 802.11a 규격 신호를 다중 톤 신호로 대체하여 전력증폭기 성능 검증에 활용하였고, N=10 다중 톤의 ACLR 특성이 실제 신호를 활용한 경우와 비교하여 1 dB 이하의 오차로 매우 정밀한 테스팅이 가능함을 입증하였다.

참 고 문 헌

[1] K. B. Schaub, J. Kelly, *Production Testing of RF and System-on-a-Chip Devices for Wireless Communications*, Norwood, MA: Artech, 2004.

[2] A. Halder, et al., "Automatic multitone alternate test generation for RF circuits using behavioral models", *Proc. 2003 Int. Test Conf.*, pp. 665-673, 2003.

[3] W. Chen, et al., "ACPR and IM3R correlation of broadband signals in microwave and millimeter wave frequencies", *Proc. Int. Workshop on Radio-Frequency Integration Technology*, Singapore, pp. 665-673, Dec. 2005.

[4] Kate A. Remley, "Multisine excitation for ACPR measurements", *2003 IEEE Int. Microwave Symp. Dig.*, 2003, Philadelphia, PA, pp. 2141-2144, Dec. 2003.

[5] J. C. Pedro, N. B. Carvalho, "Designing multisine excitations for nonlinear model testing", *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, vol. 53, no. 1, pp. 45-54, Jan. 2005.