

열잡음 메모리 효과 제거기를 이용한 전력증폭기의 효율 개선

The Design of Power Amplifier using Temperature Memory Effect Compensation

고 영 은 (Ko, Young Eun)* · 이 지 영 (Lee, Ji Young)**

목 차

- I. 서론
 - II. 열잡음 왜곡 분석
 - III. 열잡음 메모리 효과 제거 알고리즘 설계
 - IV. 열잡음 메모리 효과 제거기를 적용한 전력증폭기
의 성능 평가
 - V. 결 론
-

Abstract

In this paper, we designed and manufactured the distortion-cancellation module which is able to compensate thermal-noise distortion by software. The distortion-cancellation algorithm not only bring forth system non-linear distortion by input level but also bring compensate component of distortion by thermal to get rid off distortion from now on. After TMS 320C6711 DSP to recognize our algorithm, we manufactured the module for every kinds of system. To evaluate efficiency of the distortion-cancellation module, we designed and manufactured communication system. By measured result, if system output power is -3dBm equally, 12dB of ACLR has improved in 1MHz away from a center frequency, and also gain has increased up to 0.5dB.

Key words: Power amplifier, distortion, electro thermal, memory effect, pre-distorter

* 인천시립전문대 겸임교수

** 세명대학교 컴퓨터학부 교수

I. 서론

최근 무선통신 기술의 급격한 발전으로 인해 광대역화 및 이동성을 지향한 이동통신기술, 양방향 디지털 방송 및 광대역 멀티미디어 기술 등의 다양한 매체 및 서비스가 융합된 초고속 디지털 융합 서비스에 대한 연구 개발이 진행되고 있다. 또한 범세계적 실감 대화형 이동 멀티미디어(GRIMMS: Global Realistic Interactive Mobile Multimedia Service) 서비스 구현의 일환으로 음성·데이터 통합, 유·무선 통합, 통신·방송 융합 기술이 급성장하고 있다. 대표적인 융합형 서비스로는 VoIP, 휴대인터넷, DMB 등이 있으며, 이를 기반으로 멀티미디어 영상전화, 고품질 VOD, MMoIP(Multimedia over IP), 유·무선 통합 VPN, 개인 맞춤형 방송, 콘텐츠 대화형 방송 등 다양한 응용서비스의 구현 기술의 연구 개발이 이루어지고 있으며, 이러한 융합형 서비스가 활성화되면서 전송율 또한 수백Mbps급 이상의 속도를 갖는 디지털 융합 무선 통신시스템이 요구되고 있다[1][2].

한정된 주파수 자원에서 다량의 데이터를 고속으로 전송하기 위해서는 전송효율을 반드시 고려해야 한다. 기존의 무선 통신시스템에서는 다양한 왜곡성분을 분석하여 시스템의 성능저하를 유발하는 주요 왜곡성분(타이밍, 진폭, 주파수 오프셋, 전력 등)을 부분적으로 보상하는 기기를 하드웨어로 제작하여 사용하고 있다. 그러나 디지털 융합 무선 통신시스템의 경우, 하나의 기기에서 다양한 서비스를 이용하므로 동시다발적으로 발생하는 다양한 왜곡성분을 기존의 방식으로 제거하는 것은 불가능하다[3].

본 논문에서는 전력증폭기의 왜곡 성분 중에서 성능 저하에 큰 영향을 미치는 열 잡음에 의한 왜곡을 분석하고, 전력증폭기의 성능을 개선할 수 있는 디지털 방식의 보상기법을 연구하였다. 그러므로 열잡음에 의한 메모리 효과 제거기를 포함한 전력증폭기를 설계, 제안하였다.

II. 열잡음 왜곡 분석

무선 통신시스템 내부는 여러 가지 소자로 구성되어 있다. 시스템은 내부의 반도체나 저항체 등에서 전자 등의 전하가 열에너지의 자극에 의하여 불규칙적인 교란운동으로 인하여 잡음이 발생되고, 정보신호를 왜곡시킨다. 특히 전력증폭기는 작은 입력전력을 크게 증폭시켜주므로 다른 소자보다 발열량이 크므로 무선통신시스템에서 열에 의한 왜곡을 일으키는 주요 소자이다[2][4].

메모리 효과의 전열적(electrothermal)특성을 고찰하기 위해서 트랜지스터의 접합온도를 분석하였다. 접합온도는 포락선 주파수에서 열적 임피던스와 소모되는 전력으로 구성되는데 입력 전력에 따른 접합 온도는 식 (1)과 같다.

$$T_j = T_{amb} + R_{th} * P_{dissip}(DC) + Z_{th}(\omega_1 - \omega_2) * P_{dissip}(\omega_1 - \omega_2) \tag{1}$$

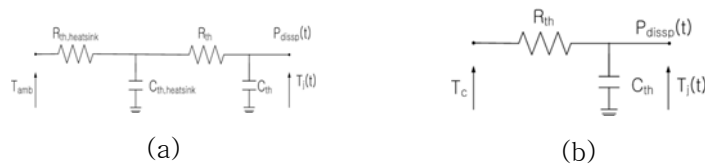
여기서 $C_{th} = R_{th} + R_{th,heatsink} + C_{heatsink}$, $P_{dissip} = P_{DC} + P_{IN} \pm P_{out}$ 이고, P_{IN} 과 P_{out} 은 입, 출력 RF 전력이다.

포락선 주파수에서 소비되는 전력은 트랜지스터의 순시적인 열 발생비율로 결정된다. 또한 트랜지스터의 물리적 크기의 제한 때문에 열적 임피던스는 커패시턴스 성분에 저항성분이 부가되어 나타나는데, 열적 저항성분은 안정영역에서 동작하고 열적 커패시턴스는 동적상태에서 동작한다. 열적 저항과 커패시턴스는 전기적 RC 시정수와 유사하게 열적 RC 시정수로 지수 함수적으로 상승시간과 하강시간을 갖는다. 트랜지스터의 순시 접합온도 관계는 열의 전달과 전기적 현상 사이에서 표 1에서 보는 바와 같은 등가성을 갖는다[4].

실리콘 칩과 패키지, 접합관계에 있는 방열판과 소모된 열에 의한 주변온도를 포함한 트랜지스터의 열적 모델은 그림 2.1과 같다. 열 상수 $R_{th,heatsink} \times R_{th,heatsink}$ 가 $R_{th} \times C_{th}$ 보다 매우 크기 때문에 그림 2.1(a)은 그림 2.1(b)과 같이 간략화 할 수 있다.

<표 1> 열과 전기적 용량사이의 등가

	Thermal parameter		Electrical parameter
P_{dissip}	Power heat flow[W]	I	Current [A]
T_j	Tempertaure [K]	V	Potential [V]
ΔT	Temperature difference[°C] = $T_1 - T_2$	U	Voltage [V] $V_1 - V_2$
R_{th}	열적저항[K/W] = $\Delta T / P_{dissip}$	R	전기적 저항 [Ω] = IR
C_{th}	열적 커패시턴스[J/K] = $Q / \Delta T$	C	전기적 커패시턴스 [F] = q / V
Q	Quantity of heat[J] = $P_{dissip} \cdot t$ (t = time)	q	Charge [C] = $I \cdot t$



<그림 2.1> 이득과 위상의 불균형 왜곡

그림 2.1(b)로부터 순시온도는 식 (2)과 같은 1차 미분방정식의 해로 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial T_j(t)}{\partial t} + \frac{1}{R_{th}C_{th}} T_j(t) = \frac{1}{R_{th}C_{th}} (R_{th}P_{dissip}(t) + T_c) \tag{2}$$

여기서,

$$P_{dissip}(t) = V_{DS,dc} \times I_{DS,dc}(t) + P_{RF,in}(t) - P_{RF,out}(t) \quad (3)$$

$$P_{dissip}(t) = (1 - \eta(t)) \times P_{RF,out}(t) \quad (4)$$

이고, $\eta(t)$ 는 순시전력효율이다.

식 (2)의 미분방정식의 일반해를 구하기 위하여 유도하면 식 (5)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} T_j(t) + a(t)T_j(t) = b(t) \quad (5)$$

여기서,

$$a(t) = \frac{1}{R_{th}C_{th}}, \quad b(t) = \frac{1}{R_{th}C_{th}}(R_{th}P_{dissip}(t) + T_c) \quad (5)$$

식 (5)의 미분방정식의 일반해를 구하면 다음과 같다.

$$T_j(t) = e^{-\int a(t)dt} \left(\int e^{\int a(t)dt} b(t)dt + K \right) \quad (6)$$

식 (6)의 식 (7)와 같이 동기화 할 수 있다.

$$T_j(t) = e^{-t/\tau} \left(\int \frac{1}{\tau} e^{t/\tau} (R_{th}P_{dissip}(t) + T_c) dt + K \right) \quad (7)$$

여기서, $\tau = R_{th}C_{th}$ 는 열 시정수이다.

식 (7)의 우변에 대한 적분은 식 (8)과 같다.

$$T_j(T) = e^{1/\tau} \left\{ \int \frac{\partial e^{(1/\tau)}(R_{th}P_{dissip}(T) + T_c)}{\partial t} dt - \int R_{th}e^{(1/\tau)} \frac{\partial P_{dissip}(t)}{\partial t} dt + K \right\} \quad (8)$$

특별한 경우, 단위계단신호가 여기 되면 순시전력은 일정하므로 순시 소비전력도 일정하게

되므로 식 (9)와 같이 된다.

$$P_{dissip}(t) = \begin{cases} P & t_0 \leq t \leq T; \\ P_0 & t \leq t_0 \end{cases}; \frac{\partial P_{dissip}(T)}{\partial t} = Q \langle T \rangle T \quad (9)$$

순시 소모전력이 식 (9)과 같은 경우 식 (8)은 식 (10)로 표현할 수 있다[3][4].

$$T_j(t) = T_{j,s} + (T_{j,0} - T_{j,s}) \times e^{-\Delta t/\tau} \quad (10)$$

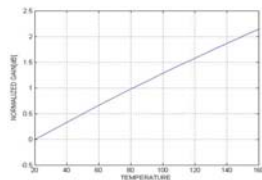
여기서, $T_{j,0} = T_c + R_{th} P_0$ 이고, $T_{j,s} = T_c + R_{th} P$ 이다.

식 (10)을 이용하여 그 온도에서의 왜곡특성을 산출하면 잡음전력은 식 (11)과 같고, 위상왜곡은 식 (12)과 같으며, 이를 정규화 하여 도시하면 그림 2.2와 같다.

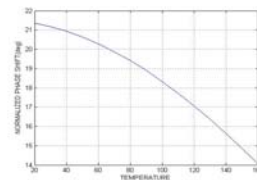
$$P = kB \{ T_o + T_{j,s} + (T_{j,0} - T_{j,s}) \times e^{-\Delta t/\tau} \} \quad (11)$$

$$\Phi = \tau(\omega_1 - \omega_2) \{ \ln(T_{j,0} - T_{j,s}) - \ln(T_{j,0} - T_{j,s}) \} \quad (12)$$

여기서 $k (= 1.38 \times 10^{-23} J/K)$ 는 Boltzmann 상수이고, B 는 주파수 대역, $T_o (= 290K)$ 는 외부의 온도, $\tau (= R_{th} C_{th})$ 는 시정수이다.



(a) 진폭특성



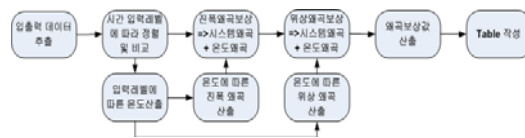
(b) 위상특성

<그림 2.2> 온도에 따른 진폭과 잡음전력과 위상왜곡

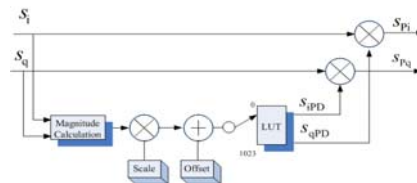
그림 2.2에서 보는 바와 같이 접합 온도가 40[K] 상승함에 따라 입력전력 1[dB]당 진폭의 잡음전력은 약 1[dB] 증가하였고, 위상왜곡은 약 2° 감소하는 것을 확인할 수 있다.

III. 열잡음 메모리 효과 제거 알고리즘 설계

본 논문에서는 열 잡음 왜곡을 제거할 수 있는 알고리즘을 소프트웨어로 설계함으로써 기저 국용 전력증폭기를 선형화할 수 있도록 하였다. 또한 실시간으로 불규칙하게 발생하는 소자 자체의 온도 변화에 따른 왜곡을 보상하는 기법을 추가함으로써 시스템을 더욱 선형화 시킬 수 있도록 하였다. 이와 같은 왜곡제거 알고리즘의 순서도와 왜곡 과정은 그림 3.1과 그림 3.2와 같다.



<그림 3.1> 메모리 효과 제거 알고리즘 블록도

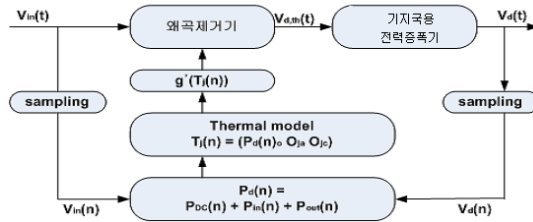


<그림 3.2> 메모리 효과 제거의 신호 처리 과정

그림 3.1에서 보는 바와 같은 메모리 효과 제거기는 왜곡에 대한 보상 값을 산출하여 사전에 LUT(Look -Up Table)로 구성하고 메모리에 저장한다. 정보신호인 입력신호(x)와 시스템 자체 비선형성과 온도 등의 잡음에 의해 왜곡된 출력신호(y)를 샘플링 한다. 샘플링 한 두 신호는 시간순으로 정렬하고 입력신호 레벨에 따른 왜곡을 산출한다. 왜곡은 진폭과 위상 왜곡으로 분류하여 시스템의 비선형 소자에 의한 왜곡과 온도에 의한 왜곡에 대한 보상값을 LUT에서 선택한다. 그러나 왜곡은 시스템의 입력레벨 변화와 구동환경에 따라 사전에 산출한 값과 차이가 발생할 수 있다. 특히 온도에 의한 왜곡은 소자의 입력레벨에 따라 실시간으로 변화하므로 변화폭이 크다. 그러므로 입력신호와 출력신호를 비교하여 실시간으로 발생한 왜곡을 추출하고, 시스템 자체 왜곡과 소자의 온도에 따른 왜곡에 대한 보상값을 산출하여 기존의 LUT에 추가한다. 이와 같은 과정으로 얻어진 보상값은 입력신호에 미리 부가함으로써 왜곡을 상쇄할 수 있도록 정보신호를 사전에 왜곡시킨다.

1. 열잡음 메모리 효과 제거 알고리즘

앞에서 분석한 전열 모델은 메모리 효과 제거기 알고리즘에 사용된다. 시스템 자체 왜곡과 열잡음에 의한 메모리 효과를 제거한 전력증폭기에 적용한 구조는 그림 2.3과 같다.



<그림 3.3> 열잡음 메모리 효과 제거기를 적용한 전력증폭기 구조

여기서 $f'(\cdot)$ 와 $g'(\cdot)$ 는 각각 $f(\cdot)$ 와 $g(\cdot)$ 의 역함수이다.

이와 같이 전력증폭기를 구성하면 열잡음에 따른 왜곡은 상쇄시킬 수 있고, 시스템 자체 비선형 왜곡도 상쇄되어 시스템 자체 이득만 남게 되어 증폭기를 선형화시킬 수 있다.

2. 진폭과 위상왜곡 보상 알고리즘 설계

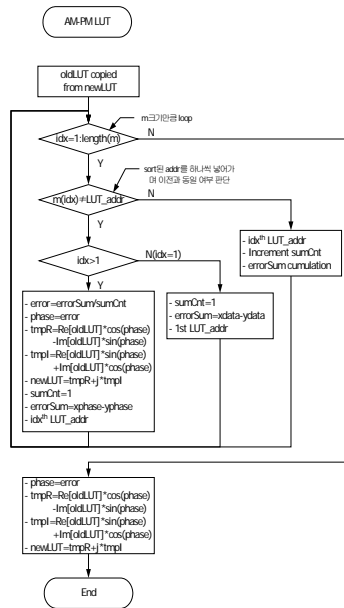
본 논문에서의 왜곡보상 알고리즘은 시스템 자체 비선형 왜곡을 진폭과 위상을 분리하여 각각의 보상값을 산출하여 LUT에 저장하고, 실제 회로에서 왜곡을 최소화하기 위해 실시간으로 왜곡의 보상값을 보정한다. 입력 신호 x 의 왜곡을 보상하기 위한 진폭과 위상 왜곡 보상의 방법은 그림 3.4와 같고, 알고리즘은 그림 3.5와 같다.



<그림 3.4> 벡터도 상의 왜곡 보상 방법

진폭왜곡 보상을 하기 위해 LUT에 저장된 사전 왜곡성분을 oldLUT로 지정하고, 위상 값 ϕ , 입력신호 x 와 Feedback 신호 y 의 차를 진폭왜곡의 크기를 error로 표시하였다. 진폭왜곡

보상 값이 산출되면 oldLUT의 신호의 크기에 error의 크기를 증가시켜 newLUT에 위치시킴으로써 실시간으로 발생하는 진폭과 위상왜곡을 능동적으로 보상한다. 이 때 보상은 디지털 프로그램으로 이루어짐으로 신호를 실수부와 허수부로 분리하여 각각 보상 값을 보정하였다.



<그림 3.5> 왜곡 보상 알고리즘

이와 같이 진폭왜곡 보상 값이 산출되면, 위상왜곡 보상 값을 산출한다. 진폭 왜곡 보상이 이루어진 LUT는 oldLUT로 지정한다. oldLUT의 위상값이 θ , 위상왜곡에 의한 왜곡 값이 ϕ 인 경우, oldLUT의 신호 크기에 error의 크기를 증가시켜 newLUT에 위치시킴으로써 실시간으로 발생하는 위상왜곡을 능동적으로 보상한다. 위상왜곡 보상은 진폭왜곡 보상과 같이 디지털 프로그램이므로 신호를 실수부와 허수부로 분리하여 각각 보상 값을 수정한다.

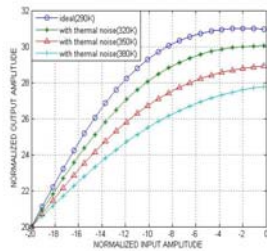
IV. 열잡음 메모리 효과 제거기를 적용한 전력증폭기의 성능 평가

1. 알고리즘 성능 평가 모의 실험

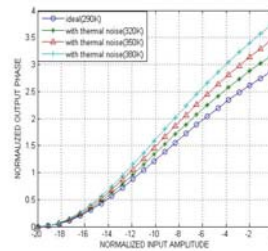
본 논문에서 제안한 열잡음 메모리 효과 제거 알고리즘의 성능을 알아보기 위해 Saleh의 고풍력 증폭기 모델을 사용하여 Matlab으로 컴퓨터 모의실험을 하였다. 모의실험의 Saleh 증폭기 모델은 이득이 40dB이고, P1dB가 29dB이고, IMD3를 살펴보기 위해 중심주파수 2.14GHz

인 UMTS 신호를 샘플링하여 인가하였다.

열잡음에 따른 왜곡정도를 알아보기 위해 Saleh의 고풍력 증폭기 모델의 자체 온도 특성을 실험 하였는데, 시뮬레이션 한 결과는 그림 4.1과 같다.



(a) 진폭왜곡 특성

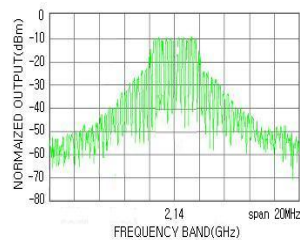


(b) 위상왜곡 특성

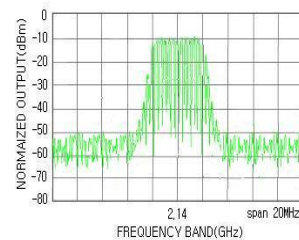
<그림 4.1> 열잡음에 따른 증폭기의 정규화된 응답특성

그림 4.1에서 보는 바와 같이 온도가 증가함에 따라 비선형 왜곡이 점진적으로 증가하였음을 알 수 있다. 그림 4.1(a)에서 보는 바와 같이 진폭왜곡 특성은 온도가 30K씩 증가할 때 마다 1dB가 1dBm씩 감소하였고, 위상왜곡 특성은 그림 4.1(b)에서 보는 바와 같이 온도가 30K씩 증가 할 때 마다 정규화된 위상이 약 0.4° 씩 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

또한 열잡음 메모리 효과 제거기를 적용한 고풍력 증폭기 모델에 UMTS신호를 인가한 결과는 그림 4.2와 같다.



(a) 알고리즘 삽입 전



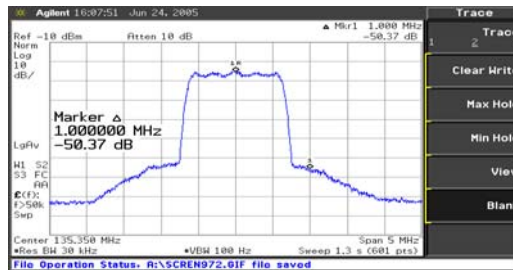
(b) 알고리즘 삽입

<그림 4.2> UMTS 신호 인가 모의실험 결과

그림 4.2에서 보는 바와 같이 제안한 열잡음 메모리 효과 제거 알고리즘을 적용한 경우 IMD 성분은 제거된 것을 볼 수 있다. 그림 4.2(a)와 같은 경우 IMD3는 -21dBm이나, (b)에서와 같이 열잡음 메모리 효과를 적용한 경우에는 IMD3는 -40dBm으로 왜곡제거 알고리즘이 적용되지 않았을 때보다 19dBm 감소하였다.

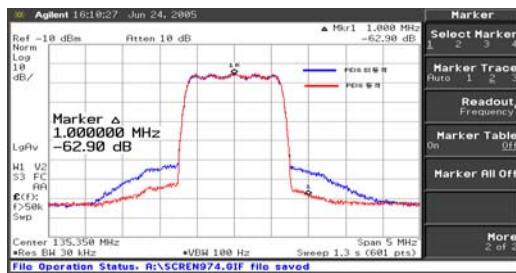
2. 메모리 효과 제거기를 적용한 전력 증폭기의 제작과 성능평가

전력증폭기의 특성 테스트를 위한 입력신호는 중심주파수가 23MHz이고, 대역폭이 1.25MHz인 신호를 사용하였다. 이와 같은 입력신호는 주파수 상향 변환기를 통하여 중심주파수 135.35MHz로 상향 변조하여 테스트 신호를 생성하였다. 이 신호를 스펙트럼 분석기로 측정하면 그림 4.3과 같다.

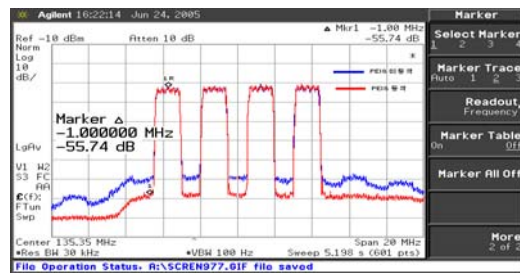


<그림 4.3> 전력 증폭기의 테스트 입력신호

메모리 효과 제거기를 적용한 전력증폭기의 성능을 평가하기 위하여 동일 출력전력일 경우, 왜곡 보상기가 동작하지 않을 때와 동작할 때의 파형과 출력 값을 측정하여 효율개선 효과를 분석하였다. 이와 같이 동일 출력전력에 대한 열잡음 메모리 효과 제거기의 동작여부에 따른 출력파형은 그림 4.3과 같다.



(a) 1FA 인가



(b) 4FA인 경우

<그림 4.3> 열잡음 메모리 효과 제거기 동작여부에 따른 측정 결과

그림 54.3에서 보는 바와 같이 열잡음 메모리 효과 제거기가 동작하는 경우 시스템의 선형성 및 효율이 우수한 것을 확인 할 수 있었다. 이와 같은 결과를 정량적으로 표현하면 표 2와 같다.

<표 2> 열잡음 메모리 효과 제거기 동작여부에 따른 결과

항 목	입 력	보상기 비동작	보상기 동작	비 고
ACLR	1FA	-50.37 [dBc]	-62.90 [dBc]	@ 1MHz
	4FA	-46.85 [dBc]	-55.74 [dBc]	@ 1MHz
입력 전력	1FA	-9.57 [dBm]	-9.0 [dBm]	
	4FA	0.110[mW]	0.125 [mW]	
출력 전력	1FA	-3.41 [dBm]	-2.89 [dBm]	ADC 입력 전력
	4FA	0.457 [mW]	0.514 [mW]	
이득	1FA/4FA	6.16 [dB]	6.11 [dB]	
전류	1FA/4FA	0.6[A]/2.1[A]	0.6[A]/2.3[A]	전압 : 8[V] / 5[V]

표 2에서 보는 바와 같이 증폭기의 출력전력이 -3dBm으로 동일할 경우, 제안한 열잡음 메모리 효과 제거기를 적용하면 중심주파수에서 1MHz 떨어진 지점에서 왜곡성분인 ACLR이 12dB 개선되었다. 그러나 이득은 열잡음 메모리 효과 제거기를 적용하는 경우에 0.05dB 감소함으로써 소폭의 이득 감쇄가 있었음을 확인 하였다.

즉 출력파형 비교를 통해 동일 출력전력에서 비선형 왜곡제거 모듈 적용 시 ACLR이 개선되어 주파수효율이 증가되었고, 전력효율 비교를 통해 동일 ACLR에서 비선형 왜곡제거 모듈 적용 시 전력효율이 증가됨을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 설계, 제안한 열잡음 메모리 효과 제거기를 적용한 기지국용 전력증폭기가 왜곡을 억제하고, 효율을 증가시키는 것을 확인할 수 있었다.

V. 결론

본 논문에서는 광대역 멀티미디어 시스템이나 양방향 디지털 방송 등의 기지국에서 사용하는 전력증폭기의 전송효율 및 서비스 품질을 향상시킬 수 있는 열잡음 메모리 효과 제거기의 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 열잡음 메모리 효과 제거기를 적용한 전력증폭기를 제작하였다.

열잡음 메모리 효과 제거기의 성능을 평가하기 위해 실제 사용되고 있는 130~140[MHz]의 IF 주파수를 갖는 기지국용 전력증폭기를 제작하여 열잡음 메모리 효과 제거기를 탑재하였고, 효율 개선 정도를 측정하였다. 측정 결과분석은 열잡음 메모리 효과 제거기를 적용한 경우와 적용하지 않은 경우를 비교하였다. 측정 결과, 전력증폭기의 출력전력이 -3dBm으로 동일할 경우, 중심주파수에서 1MHz 떨어진 지점에서 이득이 0.05 dB 감소하였으나, ACLR이 12dB 개선되어 비선형 영향이 감소한 것을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 제안한 열잡음 메모리 효과 제거기를 적용한 기지국용 전력증폭기는 베이스 밴드 영역에서 정보신호를 사전에 왜곡시키는 방식으로써 탑재 시스템에 따른 하드웨어의 변경 없이 소프트웨어로 제어할 수 있다. 특히 디지털 방식의 알고리즘으로 고속처리가 가능하며, 열잡음과 같은 불규칙하게 실시간으로 발생하는 메모리 효과에 의한 왜곡도 보상함으로써 시스템의 선형성을 증가하였다. 향후 열잡음 메모리 효과 제거기의 구조를 범용적으로 적용할 수 있는 알고리즘을 개발하여 융합적인 디지털 통신망에 적용할 수 있도록 연구할 계획이다.

참고문헌

- [1] Vuolevi, Joel, *Analysis, Measurement And Cancellation of The Bandwidth and Amplitude Dependence of Intermodulation Distortion in Rf Power Amplifiers*, Oulu University Press, 2001.
- [2] Cavers, J.K. & Liao, M., "Adaptive Compensation for Imbalance and Offset Losses in Dirac Conversion Transceivers," *IEEE Trans Vehicle Technology*, vol.42, no.4, 1993, pp.581-588.
- [3] Razavi, Behzad, *RF Microelectronics*, Prentice Hall, 1998.
- [4] Mass, S.A., *Nonlinear Microwave Circuit*, Artech House, 1988.