

논문 2012-49TC-1-6

GaN Doherty 증폭기의 메모리 효과 보상을 통한 성능개선

(The Improvement of GaN Doherty Amplifier with Memory Effect Compensation)

이 석 회*, 조 갑 제*, 방 성 일**

(Sukhui Lee, Gapje Cho, and Sungil Bang)

전력증폭기는 기지국의 효율을 결정하는 중요한 요소이며, 효율성 제고를 위하여 GaN증폭소자를 사용한 Doherty 전력증폭기 구조에 대한 연구가 지속되고 있다. Doherty 전력증폭기의 메모리 효과는 선형성과 효율특성과 연관된 동작특성에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 GaN Doherty 전력증폭기의 전열적인 비선형성 모델링과 전열적 메모리 효과가 GaN Doherty 증폭기의 왜곡형성과 보상에 대하여 연구하였다. GaN Doherty 증폭기의 전열적 메모리 특성을 모델링하기 위하여 순시적으로 소모되는 전력과 순시 집합온도의 정확한 관계식을 정립하였다. 제안된 모델의 파라미터로부터 GaN Doherty 전력증폭기의 비선형왜곡과 전열적 메모리 효과를 보상할 수 있는 전치왜곡선형화기 모델을 설계하였다. 제안된 모델의 성능평가는 37dBm GaN Doherty 전력증폭기와 ADS Tool을 사용하여 왜곡특성 성능개선정도를 검증하였다. 선형화된 GaN 전력증폭기의 2-tone 출력스펙트럼에서 약 16 dB의 왜곡개선효과를 보였다.

Abstract

A power amplifier is one of important factors for basestation's efficiency and the researches for efficiency enhancement focus Doherty amplifier structure with GaN power devices in these days. A memory effect of Doherty amplifier affect operation characteristics for linearity and efficiency. This paper reports on electrothermal nonlinearity modeling and compensation for GaN Doherty amplifier's distortion. Also this paper reports on the dynamic expression of the instantaneous junction temperature as a function of the instantaneous dissipated power. We design distortion model for GaN Doherty amplifier and predistortion compensator for electrothermal memory effect from the proposed behavior model parameters. The simulations was evaluated by ADS Tools and GaN Doherty amplifier with 37dBm. The GaN Doherty amplifier with compensator enhanced about 16dB than without electrothermal memory effect compensator in 2-tone output spectrum.

Keywords : Behavior model, distortion, memory effect, GaN, Doherty amplifier

I. 서 론

최근 이동통신 서비스는 방송, 멀티미디어 영상, e-mail, 멀티미디어 메시지 등 다양한 서비스를 제공하면서 진화적인 서비스 가능성을 시험하고 있다. IMT-2000으로 불리는 3G 시스템은 국제적인 로밍이

가능하고, 데이터 전송 속도를 고속 이동할 때 144[Kbps], 보행할 때 384[Kbps], 정지할 때 2[Mbps]까지 제공하며, 음성 서비스, 고속 데이터 서비스 및 동영상 서비스를 제공하는 미래 지향적 이동통신 시스템의 실현을 목적으로 하고 있다.

음성 및 각종 미디어 데이터의 수요가 증가함에 따라 데이터 스트림 용량을 증가시켜야 하며, 더 높은 출력을 필요로 하는 3G 및 4G 시스템에서는 더 복잡한 신호변조가 요구된다. 복잡한 변조신호는 기지국 출력의 증대가 요구되며 이는 기지국의 에너지 효율성 저하를 야기한다.

전력증폭기는 기지국의 효율의 결정하는 중요한 요

* 학생회원, ** 정회원-교신저자, 단국대학교 (Dankook University)

※ 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업융합원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음. [10039067, IMT-Advanced를 위한 다중빔 제어 및 MIMO 지원 기지국용 고효율/초소형 능동위상배열 안테나 집적형 RF 시스템 개발]
접수일자: 2011년10월17일, 수정완료일: 2012년1월17일

소이다. 전력증폭기의 효율을 증대시키기 위하여 증폭 소자의 고효율성과 전력증폭기 구조에 대한 효율성 제고에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.

현재 사용되는 전력증폭기 소자로는 GaAs(Gallium Arsenide) FET, LDMOS(Lateral Double diffused MOS)가 주류를 이루고 있다. GaAs FET는 주로 구동 증폭기로 사용되며, LDMOS는 종단의 고출력 증폭기로 사용되었다. LDMOS는 효율이 20%정도에 불과하여 현재는 LDMOS보다 높은 전압을 사용하여 소모전류를 줄인 GaN(Gallium nitride) 소자로 바뀌어가고 있다. GaN 소자는 크기는 절반으로 줄일 수 있고 전력소모는 30%이상 절감할 수 있어 WiMAX, 롱텀에벌루션(LTE) 표준 속도 구현에도 유리하다. 최근에는 기존 고효율 전력증폭기 구조로 각광받은 Doherty 구조에 GaN 증폭소자를 접목한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

GaN Doherty 전력증폭기의 동작모드와 정합회로의 구성방법을 선택하는 것은 선형성과 효율특성 결정에 매우 중요한 요소이다. 기존의 전력증폭기에 비해 고효율 고선형성을 가지는 GaN Doherty 증폭기의 설계에 있어서 고려되지 않은 여러 요인들에 의해서 증폭기의 정확한 성분분석과 동작특성이 제한된다^[1~3]. 이와 같은 성능저하의 주요 요소들은 증폭소자의 구성과 구조적 형태에 따라 다르게 나타난다. 또한 전력 증폭기의 동작특성을 좌우하는 메모리 효과(memory effect)에 대한 분석이 요구된다. 메모리 효과에 대한 정확한 해석과 그 효과를 정확하게 측정하고 정량화하는 것은 GaN Doherty 전력증폭기를 설계하기 위한 중요한 단계이다.

이와 같은 메모리 효과는 크게 전기적인 것과 열전 메모리 효과로 구분된다[4-8]. 그 중에서 우선적인 전기적 메모리 효과(electrical memory effect)는 기저대역의 주파수뿐만 아니라 반송파 주파수 및 고조파 성분에서 입력신호 대역에 걸쳐 바이어스와 정합회로 임피던스의 변화에 의해 발생한다. 그러므로 전력증폭기에서는 정합회로와 바이어스 회로의 설계를 매우 중요하게 고려하여야 한다. 그러나 이와 같은 경우에도 증폭소자의 온도 변화에 따른 전기적 변수에 의해 발생하는 이득변화로 인한 전열적인 메모리 효과(electrothermal memory effect)는 피할 수 없다.

앞에서 설명한 바와 같이 메모리 효과는 변조 대역폭에 걸친 위상과 진폭왜곡으로 정의되며, 설계과정에서 이를 최소화하거나 선형화기를 추가하여야 한다. 선형화기에 의한 보상특성은 위상특성보다는 진폭특성에 보

다 큰 영향을 미치므로, 혼변조 왜곡성분이 위상에 영향을 주는 경우는 생략하고 왜곡성분의 크기에 영향을 주는 메모리 효과에 국한한다.

본 논문에서는 GaN Doherty 증폭기의 왜곡 형성에 영향을 주는 전기적 비선형성과 전열적 메모리 효과를 정확하게 분석하고 모델링하여 메모리 효과를 보상한 GaN Doherty 전력증폭기를 제안한다. 그리고 GaN Doherty 증폭기에서 입력신호레벨과 순시적으로 소모되는 전력과 트랜지스터의 순시 접합온도의 관계를 적용하여 GaN Doherty 증폭기의 정확한 전열적 메모리 효과 모델을 구현하였다.

II. 메모리 효과의 전열적 특성

메모리 효과의 전열적(electrothermal) 특성을 고찰하기 위해서는 우선 증폭소자의 접합온도를 정확하게 분석하여야 한다. Vuolevi et al[4]은 구동신호의 동적변화를 설명하기 위하여 증폭소자의 접합온도를 식(1)과 같이 나타내었다. 식 (1)은 포락선 주파수에서 열적 임피던스와 이들 소모되는 전력으로 구성된다.

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

포락선 주파수에서 소비되는 전력은 증폭소자의 순시적인 열 발생비율로 결정된다. 더욱이 증폭소자의 물리적 크기의 제한 때문에 열적 임피던스는 커패시턴스 성분에 저항성분이 추가되어 나타나는데, 열적 저항성분은 안정사애에서 동작하고 열적 커패시턴스는 동적상태에서 동작한다. 열적 저항과 커패시턴스는 전기적 RC 시정수와 유사하게 열적 RC 시정수로 지수함수적으로 상승시간과 하강시간을 갖는다. 증폭소자의 순시 접합온도 관계는 열의 전달과 전기적 현상 사이에 표 1에서 보는 바와 같은 등가성을 갖는다.

표 1. 열과 전기적 용량사이의 등가
Table 1. Thermal and Electrical quantities equivalence.

구 분	열적 용량		전기적 용량
P_{dissip}	전력에 의한 열(W)	I	전류(A)
T_j	온도(K)	V	전압(V)
R_{th}	열적저항(K/W)	R	전기적 저항(Ω)
C_{th}	열적 커패시턴스(J/K)	C	전기적 커패시턴스(F)

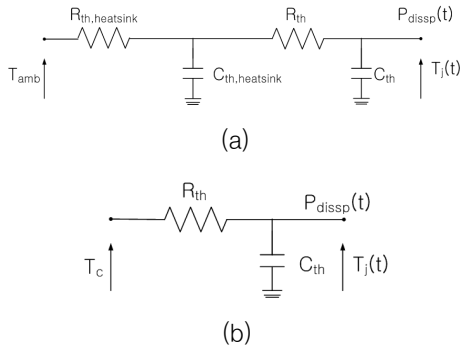


그림 1. 증폭소자의 열적 모델
Fig. 1. The thermal model of amplifying device.

증폭소자와 접합관계에 있는 방열판과 소모된 열에 의한 주변온도를 포함한 증폭소자의 열적 모델은 그림 1과 같다. 열 상수 $R_{th,heatsink} \times R_{th,heatsink}$ 가 $R_{th} \times C_{th}$ 보다 매우 크기 때문에 그림 1(a)는 그림 1(b)와 같이 간략화 할 수 있다.

그림 1(b)로부터 순시온도는 다음과 같은 1차 미분방정식의 해로 표현할 수 있음을 보였다.

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

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 다시 쓰면 다음과 같다.

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

여기서,

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

식 (5)의 미분방정식의 일반해를 구하면 다음과 같다.

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

이 방정식은 다음과 같이 등가화 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 우변의 적분은 다음과 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 여기되면 순시전력은 일정하다. 즉, 순시 소비전력도 일정하게 되므로 다음과 같이 된다.

$$P_{dissip}(t) = \begin{cases} P & t_0 \leq t \leq T \\ P_0 & t \leq t_0 \end{cases}; \frac{\partial P_{dissip}(T)}{\partial t} = 0, \quad (9) \\ \text{with } \tau \gg T$$

순시 소모전력이 식 (9)와 같은 경우 식 (8)은 다음과 같이 된다.

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

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

펄스신호를 인가하는 경우 접합온도의 시간변화는 식 (1)에 의해 각각 그림 2와 그림 3과 같다.

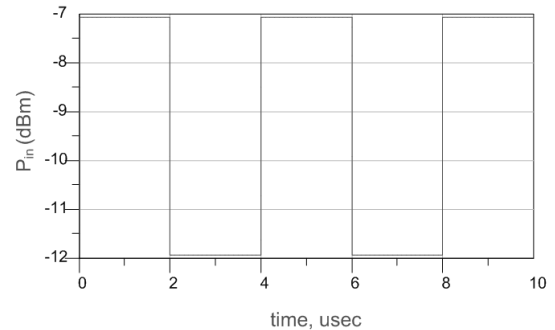


그림 2. 입력 펄스신호의 포락선
Fig. 2. The envelope of input pulse.

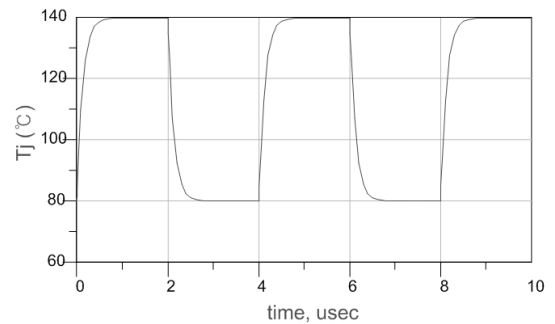


그림 3. 펄스입력신호에 대한 접합온도의 시간변화
Fig. 3. The junction temperature variation versus input pulse.

III. GaN Doherty 증폭기의 메모리 효과 모델링

II장에서 정의한 순시 접합온도 관계식은 그림 4와 같이 Doherty 증폭기의 발열모델에 적용할 수 있다. 본 연구에서는 포화전력에서 7dB back-off하여 37dBm 출력을 갖는 GaN Doherty 전력증폭기를 사용하였다.

접합온도에 따른 Doherty 증폭기의 출력특성은 그림 5에서 보는 바와 같다.

Doherty 증폭기의 이득 감소현상은 접합온도의 변화에 많은 영향을 받지만 증폭기의 전기적 비선형성에는 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 이득 및 위상변화 특성은 접합온도의 함수로써 입력 전

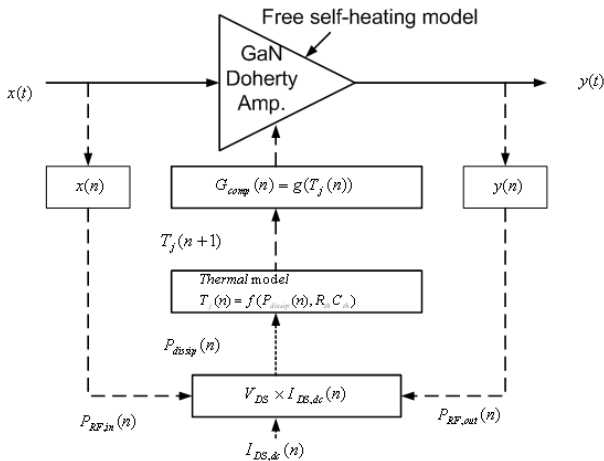


그림 4. Doherty 증폭기의 발열모델
Fig. 4. The heating model of Doherty amplifier.

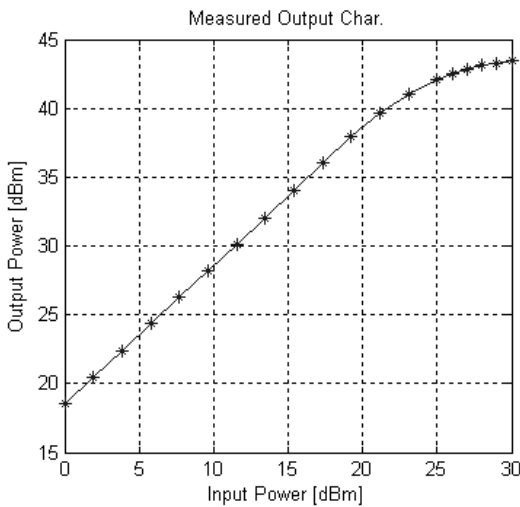


그림 5. 접합온도에 대한 GaN Doherty 증폭기의 이득변화
Fig. 5. The gain compression versus junction temperature of GaN Doherty amplifier.

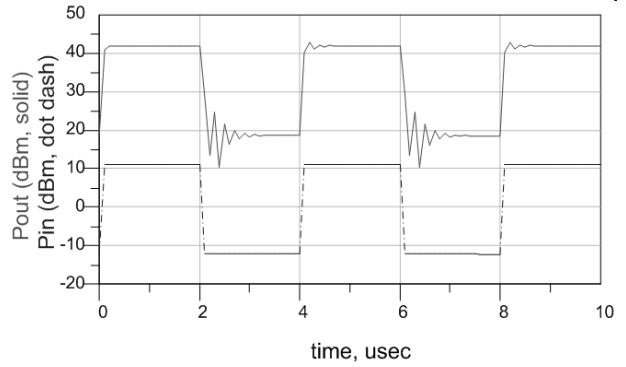


그림 6. 모의실험의 출력 포락선 파형
Fig. 6. The simulated output envelope waveform.

력레벨에 따른 GaN Doherty 증폭기의 복소 이득감소 특성을 모델링하는데 적용할 수 있다.

50%의 duty cycle을 갖는 구형파를 GaN Doherty 증폭기에 인가하여 얻은 출력파형의 모의실험 결과는 그림 6에서 보는 바와 같다. 이와 같은 출력파형의 포락선은 식 (10)으로부터 예측할 수 있듯이 접합온도의 지수 형태의 변화에 지수형태로 증가하거나 감소함을 보인다. 이는 GaN Doherty 증폭기의 전열적 모델링이 적합함을 알 수 있다.

온도의 변화는 전력증폭기 특성에 영향을 주는 증폭소자의 전기적 파라미터의 영향으로 볼 수 있다. 증폭소자의 순시 접합온도의 변화는 순시 소모전력과 입력신호의 시간변화에 의존한다. 결과적으로 GaN Doherty 전력증폭기의 복소이득은 접합온도에 의존하므로 이를 비선형성의 원인으로 간주할 수 있다. 열에 의한 IMD3 성분은 일정한 주파수 이상이 되면 미치는 영향이 미미함으로, 전기적 비기억 비선형성에 의한 IMD3 성분의 크기는 두 톤 신호의 간격과 무관하다고 할 수 있다.

IV. 전치왜곡 선형화기 설계 및 결과 고찰

본 장에서는 앞에서 설명한 GaN Doherty 증폭기의 전열적 모델을 토대로 메모리효과를 개선할 수 있는 전치왜곡 선형화기를 설계하였다. 전치왜곡 선형화기를 포함한 GaN Doherty 증폭기는 그림 7에서 보는 바와

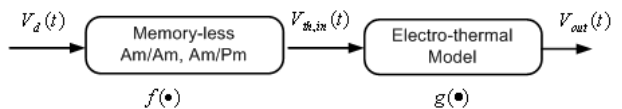


그림 7. GaN Doherty 전력증폭기 모델
Fig. 7. The model of GaN Doherty amplifier.

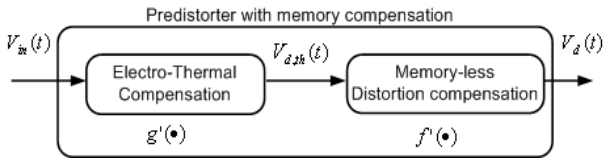


그림 8. Memory 효과를 보상하는 사전 왜곡기
Fig. 8. A predistorter with memory effect compensation.

같다. 여기서 함수 $f(\cdot)$ 와 $g(\cdot)$ 는 각각 비기억 비선형의 복소이득(AM/AM과 PM/PM)과 GaN Doherty 전력증폭기의 전열적 모델 함수이다.

그림 7에 보인 Doherty 증폭기의 전열적 모델의 출력은 다음과 같다.

$$V_{out} = g(V_{th,in}) * V_{th,in} \quad (11)$$

여기서, $V_{th,in} = f(|V_d|) * V_d$ 이고 V_d 는 GaN Doherty 증폭기의 입력 전압이다.

그림 7에 보인 GaN Doherty 증폭기 모델의 비선형 왜곡과 전열적 메모리 효과를 보상하기 위한 전치왜곡 선형화기는 그림 8에서 보는 바와 같다. 여기서 $f'(\cdot)$ 와 $g'(\cdot)$ 는 각각 $f(\cdot)$ 와 $g(\cdot)$ 의 역함수이다.

$$f(|V_d|) * V_d(t) = f(|f'(v_{d,in})|) * f'(V_{d,th}) * V_{d,th} \quad (12)$$

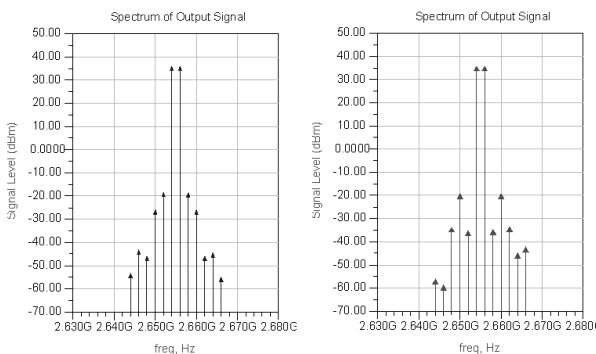
$$= K$$

$$g(V_{th,in}) * V_{th,in} = g(v_{d,th}) * V_{d,th}$$

$$= g(g'(v_{in}) * V_{in}) * g'(V_{in}) * V_{in} \quad (13)$$

$$= 1$$

여기서 K는 전력증폭기의 소신호 이득이며, V_{in} 은 선형화기 입력신호이며, $V_{d,th}$ 는 메모리 효과 보상 후 비메모리 왜곡특성 보상될 입력신호이다.



(a) 증폭기 출력특성 (b) 선형화된 출력특성

그림 9. GaN Doherty 전력증폭기의 출력개선 특성
Fig. 9. The compensated output of GaN Doherty amplifier.

GaN Doherty 증폭기의 출력에서 메모리 효과에 의한 비선형성을 보상하는 선형화기의 성능을 평가하기 위하여 2-Tone 신호를 사용하였다. 그림 9는 GaN Doherty 전력증폭기의 단독 출력특성과 선형화기를 거친 GaN Doherty 전력증폭기의 출력특성이다.

그림 9에서 보는 바와 같이 GaN Doherty 전력증폭기의 3차 혼변조 왜곡신호는 -18.703 dBm이나, 메모리 효과를 보상하는 전치왜곡기를 사용한 GaN Doherty 전력증폭기의 3차 혼변조 신호는 -34.671 dBm으로 나타난다. 즉, 메모리효과 보상기능을 가진 선형화기를 적용하여 15.968dB의 왜곡개선특성을 보였다.

V. 결론

본 논문에서는 GaN Doherty 전력증폭기를 위한 전열적인 메모리 효과를 분석하고 동작모델 파라미터를 검증하였다. 메모리효과를 적용한 전력증폭기 모델은 ADS 모의실험에서 펄스신호를 인가했을 때 만족할 만한 결과를 얻었다. 그리고 포화전력에서 7dB back-off 하여 37dBm 전력을 갖는 GaN Doherty 전력증폭기로 전열적 메모리 효과 모델링을 통하여 제안된 모델이 GaN Doherty 증폭기의 왜곡생성에 어떤 영향을 미치는지를 확인하였다.

본 논문에서 제안한 GaN Doherty 증폭기의 전열적 메모리 효과 모델에 왜곡특성을 개선하기 위하여 전치왜곡 선형화기를 설계하여 적용하였다. GaN Doherty 전력증폭기에 전치왜곡 선형화기를 사용한 경우, GaN Doherty 전력증폭기의 3차 혼변조 왜곡신호 특성이 개선됨을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] J.S .Kenny, W. Woo, L. Ding, R. Raich, and T. Zhou “The impact of memory effects on predistortion linearization of RF power amplifier” in 8th *Int Microwave and Optical Technology Symp.*, Montreal, QC, Canada, June 2001, pp. 189-193
- [2] S. Boumaiza and F. M. Ghannouchi, “Realistic power-amplifiers characterization with application to baseband digital predistortion for 3G base stations,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.50, pp.3016-3021, Dec. 2002.
- [3] 손길영, 이석희, 방성일 “효율개선을 위한 Gate 제

- 어 Hybrid Doherty 증폭기 구현,” 전자공학회논문지, 제42권 TC편, 제3호, 217-224쪽, 2005년 3월
- [4] J. H. K. Vuolevi, T. Rahkonen, and J. P. A. Manninen, “Measurement technique for characterizing memory effects in RF power amplifiers,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, col. 49, pp. 1383-1389, Aug. 2001.
- [5] W. Bosch and G. Gatti, “Measurement and simulation of memory effects in predistortion linearizers,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 37, pp. 1885-1890, Dec. 1989.
- [6] Y. Youngoo, Y. Jaehyok, N. Joongjin, K. Bumman, and P. Myungkyu, “Measurement of two-tone transfer characteristics of high-power amplifiers,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 49, pp. 568-571, Mar. 2001.
- [7] 고영은, 방성일 “온도보상 기법을 적용한 디지털 방식의 사전 왜곡제거기 알고리즘,” 전자공학회논문지, 제42권 TC편, 제9호, 571-580쪽, 2005년 9월
- [8] A. Rabany, L. Nguyen, and D. Rice, “Memory effect reduction for LDMOS bias circuits,” *Microwave J.*, pp. 124-130, Feb. 2003.

 저 자 소 개



이 석 희(학생회원)
 2004년 단국대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 2006년 단국대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 2008년 단국대학교 전자공학과
 박사과정 수료.

<주관심분야 : RF Amplifier, 디지털 이동통신,
 선형화기, LTE>



조 갑 제(학생회원)
 1995년 경상대학교 전자재료
 공학과 학사 졸업.
 2005년 단국대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 2011년~현재 단국대학교 전자
 공학과 박사과정 재학.

2004년~2008년 하이온시스템즈 연구소 팀장
 2008년~현재 성산전자통신 연구소 부장.
 <주관심분야 : RF Amplifier, 선형화기>



방 성 일(평생회원)
 1984년 단국대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1986년 단국대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 1992년 단국대학교 전자공학과
 박사 졸업.

1994년~1997년 (주)엘씨텍 연구소장
 1994년~현재 단국대학교 전자전기공학부 교수
 <주관심분야 : RF Amplifier, OFDM, 디지털 이
 동통신, LTE >