

비대칭 Doherty 구조를 이용한 전력 증폭기의 선형성 개선과 효율 보상에 관한 연구

강 동 진*, 한 기 관*, 이 호 응**

A Study on Improvement of Linearity and Efficiency Compensation in a Power Amplifier Using Asymmetrical Doherty Structure

Dong-Jin Kang*, Ki-Kwan Han*, Ho-Woong Lee**

요 약

본 논문은 높은 선형성을 얻기 위하여 기존의 Doherty 구조에서 주 증폭기와 피킹 증폭기를 비대칭적으로 구성하고, 증폭기의 바이어스 점을 변화시켜 선형성을 개선하는 방법을 제안하였다. 주 증폭기와 피킹 증폭기의 구동 전력을 비대칭으로 주입하기 위하여 비균등 wilkinson 분배기를 추가하였다. 또한 전체적으로는 3-stage 구조를 이용으로써 선형성에 따른 효율 감소를 보상하였다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 비대칭 Doherty 전력 증폭기와 비대칭 3-stage Doherty 전력 증폭기를 제작하였으며, 측정 결과 약 -55 dBc의 IMD 특성을 보였으며, 13%의 효율 특성을 얻을 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, a new design method of asymmetrical configuration of main amplifier and peaking amplifier using changed bias point is proposed for excellent linearity, instead of the conventional Doherty structure. We have utilized the uneven wilkinson power divider for the unequal power drive at the input network of amplifiers. And we proposed a compensating method of the decreasing efficiency due to improving linearity using 3-stage Doherty structures. From the simulation results of asymmetrical Doherty power amplifier and asymmetrical 3-stage Doherty power amplifier with uneven power drive are implemented. From the implementation and measurement results of the each amplifier, IMD characteristics have -55 dBc as the good efficiency of 13% compensates the decreased entire efficiency due to the improving linearity characteristics.

Keywords: Power amplifier, Asymmetrical structure, Linearity, Efficiency, dBc

* 한국정보통신기술대학 (dj kang@icpc.ac.kr)

** 교신저자 동원대학 정보통신과 (hwlee@tongwon.ac.kr)

접수일자: 2010년 2월 16일, 수정일자: 2010년 3월 15일, 심사완료일자: 2010년 3월 19일

I. 서 론

현재 운용되고 있는 이동통신 시스템은 한정된 주파수 자원을 보다 효율적으로 사용하기 위해 디지털 변조 방식을 주로 사용하고 있다. 이러한 디지털 변조된 신호는 그 용도에 맞게 RF 전력 증폭기를 이용하여 신호의 증폭과정을 거치게 되는데, 이 때 고품질의 통신을 위해서는 높은 선형성을 가지는 전력 증폭기의 사용이 필수적이다. 기지국 및 중계기 시스템에서는 많은 채널의 신호를 증폭해야 하기 때문에 특히 높은 선형성이 요구된다. 이러한 이유로 RF 전력 증폭기는 주로 A급 또는 AB급으로 동작된다. 기존의 기지국 및 중계기에 사용되는 선형 전력 증폭기들은 증폭기 자체에서 요구되는 선형성을 만족시키지 못하기 때문에 피드포워드(Feedforward)나 디지털 전치왜곡기(DPD : Digital PreDistortion linearizer)와 같은 부가적인 선형화 기술을 사용하여 원하는 선형성을 얻고 있다[1-2]. 그러나 이러한 기술들은 각각 큰 단점을 가지고 있다. 피드포워드 기술은 구조적인 부분에서 여러 추가적인 회로들과 같이 연동되어 큰 효율 감소와 추가 비용이 생긴다. 또한 디지털 전치 왜곡 기술도 구조적으로 매우 복잡하며, 고가라는 단점을 가지고 있다.

일반적으로 기지국 및 중계기 시스템은 휴대용 단말기와는 달리 DC 전력 공급이 풍부하기 때문에 효율보다는 선형성에 비중을 두고 있다. 그러나 증폭기의 전력레벨 증가 및 소형화에 따른 열 문제로 인해 최근에는 증폭기의 높은 선형성뿐만 아니라 효율의 특성도 점차 중요시 되어 가고 있다. 때문에 최근 기지국 및 중계기 시스템 등에 사용되는 증폭기가 높은 선형성을 가지면서도 높은 효율을 가질 수 있도록 하는 연구가 많이 진행되고 있다.

본 논문에서는 피드포워드나 디지털 전치왜곡기와 같은 고가의 부가회로를 사용하지 않으며, 필요 이상의 출력 소자를 이용하지 않는 경제적이면서 높은 선형성을 얻기 위한 방법으로 비대칭 Doherty 구조를 이용하였다. 또한, 3-stage Doherty 구조를 이용하여 선형성 개선에 따른 효율 감소를 보상할 수 있는 방안도 함께 제시하였다.

II. 전력 증폭기의 선형화 기술

1. 일반적인 전력 증폭기의 선형화 기술

이동통신용 전력 증폭기의 비선형 특성을 선형화하기 위해 사용되는 선형화 기술에는 백오프(back-off) 기술, 전치왜곡(predistortion) 기술, 피드백(feedback) 기술, 피드포워드 기술 등이 있다. 이러한 선형화 방식은 적용되는 신호의 종류, 주파수 대역폭, 시스템의 주어진 효율 및 선형성에 관한 규격, 크기 및 가격에 따라 적절한 선택이 요구된다. 다음 표 1은 각각의 전력 증폭기의 선형화 방식의 장단점을 주요 항목별로 간단히 비교한 것이다.

표 1. 전력 증폭기 선형화 방식의 장단점 비교
Table. 1 Comparison of several techniques for amplifier linearization

	Linearity	Bandwidth	Efficiency	size	cost
Back-off	Low	> 100MHz	Medium	S	L
Predistortion	Medium	> 20MHz	High	S	L
Feedback	High	> 1MHz	High	M	M
Feedforward	Excellent	> 50MHz	Low	L	H

2. 비대칭 Doherty 구조를 이용한 선형화 기술

최근의 무선 통신 시스템에서는 기지국용 선형 전력증폭기(LPA)의 물리적인 크기가 점점 작아지고 있다. 따라서 소형화로 인하여 발생하는 방열의 문제를 해결하기 위해 고효율 특성을 갖으면서 동시에 높은 선형성을 갖는 증폭기를 개발해야할 필요성에 직면하고 있다. Doherty 구조를 갖는 증폭기는 일반적으로 AB급에서 동작하는 주 증폭기와 C급에서 동작하는 피킹 증폭기로 구성되어 있다. 피킹 증폭기의 전류는 주 증폭기에 비해 언제나 낮은 레벨에서 동작하기 때문에, 두 증폭기의 부하

임피던스는 높은 전력 정합을 위한 적절한 임피던스 값으로 모두 변조되는데 한계가 있다. 따라서 두 증폭기 모두 원하는 최대 전력을 발생할 수가 없게 된다. 이러한 해법으로 적응형 바이어스 기법이 제시되었다. 하지만 적응형 바이어스 기법은 외부적인 전압 조정 회로를 필요로 하며 그 때문에 회로가 복잡해지는 단점이 있다[3].

비대칭 Doherty 구조는 어떠한 외부 회로도 없이 그 단점을 극복하는 것을 목표로 제안되었다[4]. 이를 달성하기 위하여 주 증폭기와 피킹 증폭기 사이의 입력 전력을 서로 다르게 주입하는 방식을 이용한다. 비대칭 Doherty 구조에서는 비대칭 전력 분배기를 통해, 주 증폭기에 비해 더 많은 전력이 피킹 증폭기에 주입된다. 적응형 바이어스와 마찬가지로, 주 증폭기와 피킹 증폭기에서의 기본과 진류는 최대 전력 레벨에서 같아질 수 있다. 그 결과 두 증폭기에서의 임피던스는 높은 전력 레벨에서 최적화된 전력 정합의 값으로 모두 변조될 수 있다. 그리고 최대 전력은 일반적으로 부하에 모두 전달되어 효율 개선 효과가 나타난다. 또한 각각의 증폭기의 최적화된 정합 임피던스는 높은 선형성을 갖도록 해주는 큰 특징을 갖는다.

III. 비대칭 3-stage 전력 증폭기 설계

본 장에서는 이동통신 전력 증폭기 소자로 상용화 되어있는 LDMOS(Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductor)를 이용하여, 6 W(37.7 dBm) 급 기지국용 비대칭 2-stage Doherty 전력 증폭기를 설계하였다. 표 2는 본 논문에서 제시한 목표 사양이다. 30 W급 이상의 대형 중계기용 전력 증폭기는 피드포워드나 디지털 전치왜곡 기술을 이용하여 선형 전력 증폭기를 구현해내지만, 소형 중계기에 적용하기에는 단가면에서 경쟁력이 많이 떨어진다. 따라서 고가의 피드포워드 기술이나 디지털 전치왜곡 기술에 적용할 수 없는 중소형 중계기의 전력 증폭기를 선형화하기 위해서 다른 대안이 필요하다 할 수 있다. 본 논문에서는 Doherty 기술을 응용하여 외부의 선형화 장치 없이도 원하는 선형성 특성을 얻어 내는 것을 목표로 하였다. 이를 위하여 ADS2009를 사용하여 회로 시뮬레이션

을 하였다.

표 2. 설계 사양
Table. 2 Design specifications

항 목	특 성
주파수대역	2130 ~ 2150 MHz
대역폭	20 MHz
출력	37.7 dBm
선형성	-55dBc / IM3 특성

1. 비대칭 Doherty 전력 증폭기 설계

비대칭 구조는 주 증폭기와 피킹 증폭기 사이의 구동전력 비율에 따라 그 특성 차이가 커진다는 특징이 있다. 따라서 가장 높은 선형성을 얻을 수 있는 구동전력 비율을 결정하는 일이 매우 중요하다. 구동전력 비율을 점진적으로 변화시키면서 그 특성을 살펴보면, 현재 주 증폭기와 피킹 증폭기의 구동전력 비율이 1:2 인 경우에 가장 좋은 선형성을 가짐이 연구 결과로 보고되어 있다[4-5].

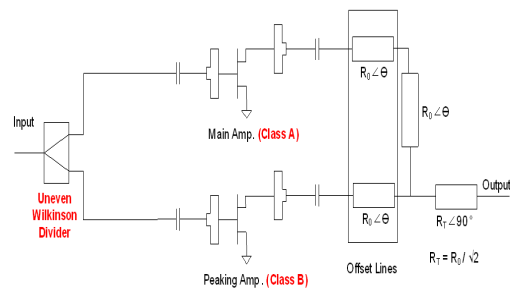
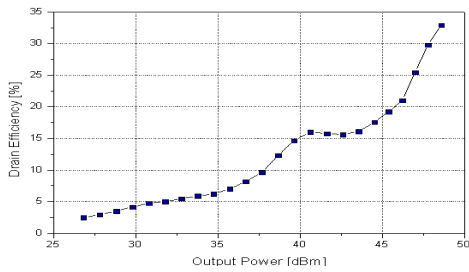


그림 1. 비대칭 Doherty 전력증폭기 설계 구성도
Fig. 1 Design schematic of a asymmetric Doherty power amplifier

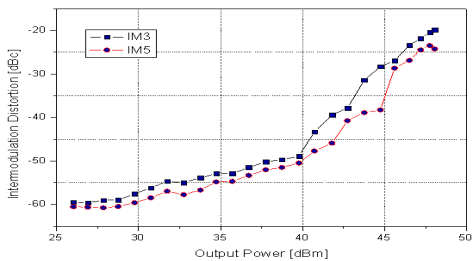
본 논문에서는 선형 구간의 확장을 위하여 다단 구조 대신 비대칭 구조를 사용하였으며, 기존의 논문에서 입력단에 사용한 하이브리드 커플러나 wilkinson 분배기 대신에 피킹 증폭기의 이득 특성을 보상과 불균등한 전력 공급을 위해 비대칭

wilkinson 분배기를 이용하였다. 전력 분배는 선형성 개선효과가 가장 높은 1:2 비율로 설계하여 피킹 증폭기에 주 증폭기보다 높은 입력을 가진다. 또한 본 논문에서는 선형성 개선을 위하여 A급 주 증폭기와 B급의 피킹 증폭기로 구성을 하였다. 그림 1은 비대칭 구동 전력을 갖는 Doherty 전력 증폭기의 설계 구성도이다.

시뮬레이션 결과 37.7 dBm의 출력에서 약 10%의 효율 특성을 보이며, 동시에 48 dBc의 선형성을 나타내었다. 대칭 구조를 가지는 Doherty 전력 증폭기에 비해 약 10 dBc 가량 선형성이 개선되었다. 그림 2는 비대칭 구조의 Doherty 증폭기의 시뮬레이션 결과이다.



(a) 효율



(b) IM3 & IM5 특성

그림 2 비대칭 Doherty 전력 증폭기 시뮬레이션 결과
Fig. 2 Simulation results of a asymmetric Doherty power amplifier

입력단에 비대칭 구조를 갖는 분배를 이용하여 각각의 증폭기에 구동되는 입력전력을 조절하는 동시에 각 증폭기들의 바이어스를 조절하여 우수한 선형성을 얻어냈지만, 최종 목표로 제시한 특성에는 도달하지 못하였다.

2. 비대칭 3-stage Doherty 전력 증폭기 설계

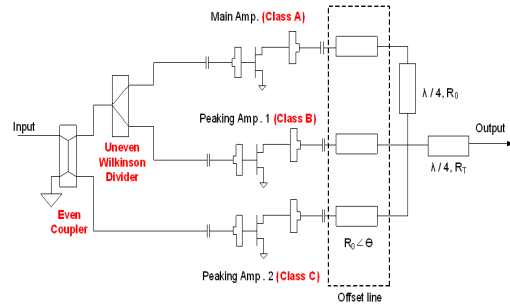
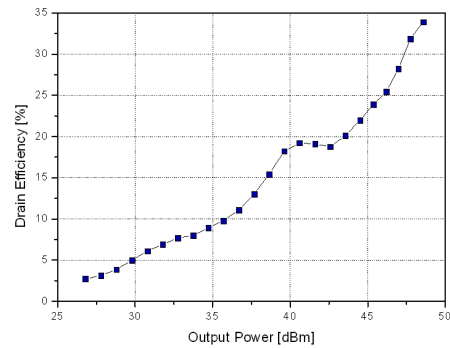
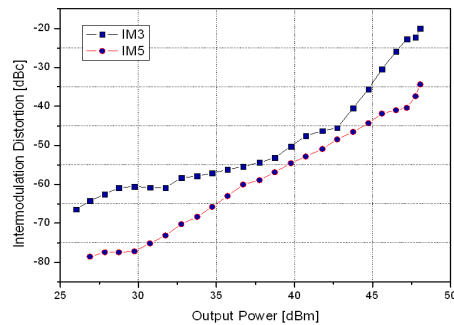


그림 3. 제안된 비대칭 3-stage Doherty 전력증폭기 설계 구성도

Fig. 3 Design schematic of the proposed asymmetric 3-stage Doherty power amplifier



(a) 효율



(b) IM3 & IM5 특성

그림 4. 비대칭 3-stage Doherty 전력 증폭기 시뮬레이션 결과

Fig. 4 Simulation results of a asymmetric 3-stage Doherty power amplifier

그림 4는 비대칭 3-stage Doherty 증폭기의 시뮬레이션 결과이다. 37.7 dBm의 출력에서 약 -53 dBc의 선형성을 얻을 수 있었다. 이 때 효율은 약 13%로 앞 절에서의 시뮬레이션 결과에 비해 약 3%가 개선되었다.

IV. 제작 및 측정

본 장에서는 앞 장에서 설계된 전력 증폭기를 보이고 분석하였다. 기존의 설계 방식의 전력 증폭기와 제시된 전력 증폭기를 비교 분석하여 선형성 개선 정도를 확인하였다. LDMOS FET를 이용한 전력 증폭기는 Teflon 기판을 사용하여 제작하였다. 사용된 기판의 제원은 비유전율(ϵ_r) 2.55, 기판 두께(h) 0.8 mm, 동판 두께(t) 0.035 mm 이다.

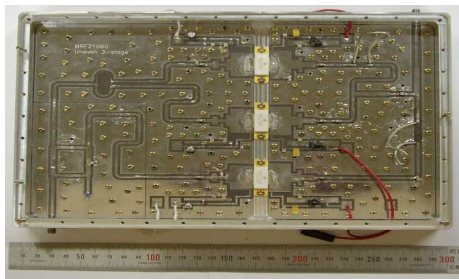


그림 5. 비대칭 3-stage Doherty 증폭기 실물도
Fig. 5 Photograph of uneven 3-stage Doherty power amplifier

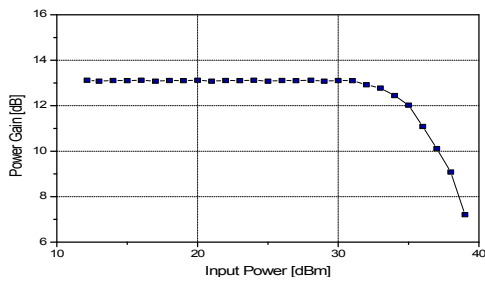
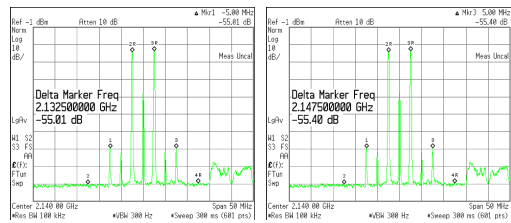


그림 6. 소신호 전력 이득 측정 결과
Fig. 6 Measured results of the small signal power gain

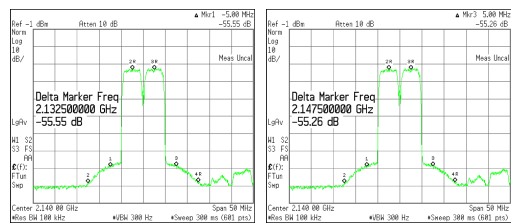
그림 5는 제작된 3-stage Doherty 전력 증폭기의 실물도이다. 비대칭에 의한 입력 전력과 각 증폭기의 바이어스 값의 차이로 인하여 출력단에 정확 전력 결합이 이루어지지 않는 현상을 보상하고자 출력단에 오프셋 선로가 추가되었다. 그림 6은 제작된 전력 증폭기의 소신호 이득 측정결과이며, 약 13 dB의 이득이 나타났다.

그림 7은 5 MHz의 tone spacing을 가지는 2-tone 신호를 인가하였을 때의 측정 결과를 나타내고 있다. IM3 특성이 약 -53 dBc가 나타났다. 또한 다중 반송파(Multi-carrier) 시스템에 적합한지를 확인하기 위하여 W-CDMA 신호를 인가하여 그 특성을 확인하였다. 그림 8은 W-CDMA 2FA 신호 인가 시 특성이며, 그림 9는 W-CDMA 4FA 신호를 인가하였을 때의 ACLR 특성이며, 각각 약 -55 dBc의 특성을 보였다. 2-tone 입력일 때와 4FA 입력일 때의 출력 특성에서 큰 차이가 없었던 이유는 원천 신호의 선형성 때문이라고 예측된다. 출력 전력을 37.7 dBm 이상 올렸을 때에는 그 차이가 나타남을 확인할 수 있었다.



(a) Lower IM3 (b) Upper IM3

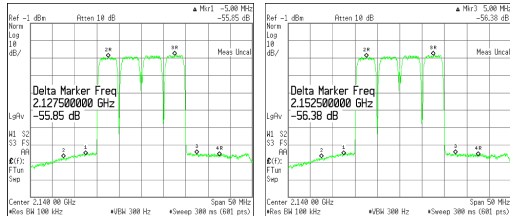
그림 7. 비대칭 3-stage Doherty 증폭기 2-tone 특성
Fig. 7 2-tone characteristics of uneven 3-stage Doherty power amplifier



(a) Lower ACLR (b) Upper ACLR

그림 8. 비대칭 3-stage Doherty 증폭기 2FA 특성
Fig. 8 2FA characteristics of uneven 3-stage

Doherty power amplifier



(a) Lower ACLR (b) Upper ACLR

그림 9. 비대칭 3-stage Doherty 증폭기 4FA 특성
Fig. 9 4FA characteristics of asymmetrical 3-stage Doherty power amplifier

다음 표 3은 제작된 전력 증폭기 측정 결과들을 정리한 것이다. 실제 목표치에 부합하였으며, 상용 목표치에도 부족함이 없음을 확인할 수 있다.

표 3. 전력 증폭기 측정 결과 비교
Table. 3 Comparison of measured results

구분	이득 [dB]	평균출력 [dBm]	ACLR [dBc]	효율 [%]
연구 목표	12	37.7	50	10
상용 제품	12	37.7	45	6 ~ 8
일반 구조	14	37.7	35	15
비대칭 구조	13.8	37.7	53	10
제안된 구조	13	37.7	55	13

다음 그림 10은 본 논문을 진행하면서 제작된 증폭기들의 선형성 특성을 비교한 그래프이다. 선형화 과정을 거치는 동안의 선형성 특성이 개선되는 모습을 보이고 있다. 일반적인 구조를 갖는 Doherty 전력 증폭기의 선형성은 약 -35 dBc 전후로 피드포워드나 디지털 전치왜곡기와 같은 추가적인 선형화 회로 없이는 상용스펙을 만족할 수 없었다. 본 논문에서 제시한 비대칭 Doherty 구조와 비대칭 3-stage 구조는 이보다 약 20 dB 개선되어 사용스펙을 웃도는 우수한 선형성을 확보할 수 있었다. 다음 그림 11은 제작된 증폭기들의 효율 특성을 보여준다. 일반적인 Doherty 증폭기의 경우

가 가장 높게 나타났으며, 비대칭 Doherty 증폭기의 경우가 가장 낮게 나타났다.

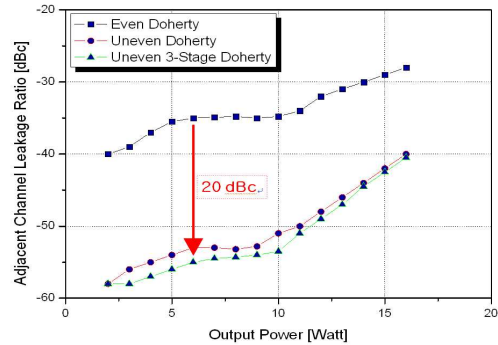


그림 10. 선형화 후의 선형성 개선 비교
Fig. 10 Comparison of improved linearity

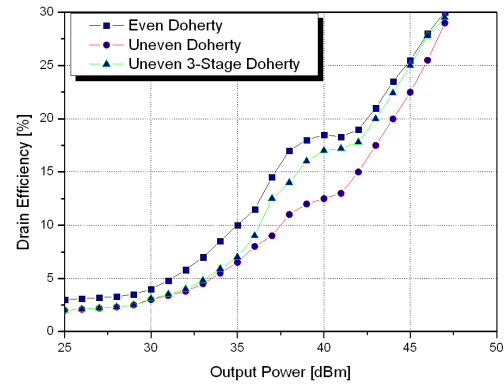


그림 11. 제작된 증폭기들의 효율 특성
Fig. 11 Efficiency characteristics of implemented amplifiers

표 4. 타 논문과의 비교
Table. 4 Comparison of other papers

구분	[4]	[6]	This work
사용 주파수	2.14 GHz	1 GHz	2.14 GHz
출력 [dBm]	43	36.85	37.7
입력 비율	1:2	1:2:2	1:2:3
선형성	-35 dBc	37.23 dB (REC)	-53 dBc
효율 [%]	31	55.46	13
특이 사항	용량이 다른 증폭소자 사용		같은 용량의 증폭소자 사용

V. 결 론

본 논문은 신호를 증폭하는 전력 증폭기의 특성 중 선형성 개선을 목표로 하는 연구이다. 원하는 목표를 달성하기 위해 기존에 알려진 이론들을 통합하고 새롭게 변형하여 혼변조 왜곡을 최소화하였으며, 효율 감소에 대해 보상하는 방법도 함께 연구하였다.

전력 증폭기의 선형성 확보를 위해 부가적인 외부 회로와 연동하지 않으면서 상용스펙에 충분히 부합할만한 전력 증폭기 자체의 구조적인 변형을 시도하였다. 그 출발점은 이미 보편화되어 있는 Doherty 구조를 이용하는 것이다. 기존의 Doherty 구조에서 이용되는 각 증폭기들의 바이어스 점에 변화를 시도하였고, 그 결과 원하는 선형성을 확보할 수 있었다. 또한 비대칭 3-stage 구조를 도입하여 추가적인 선형성 확보와 효율 감소를 보상하였다. 또한 실용성 검증을 위하여 제작된 전력 증폭기들은 3GPP 규격에 맞는 W-CDMA 신호를 이용하였다. 상용스펙을 상회하는 설계 목표치를 설정하여 선형화 기술의 유용성을 보이고자 하였다.

참 고 문 헌

- [1] J. B. Groe and L. E. Larson, CDMA Mobile Radio Design, Artech House, 2000.
- [2] P. Burns, Software Defined Radio, Artech House, 2002.
- [3] J. Cha, Y. Yang, B. Shin, and B. Kim, "An adaptive bias controlled power amplifier with a load-modulated combing scheme for high efficiency and linearity", IEEE Microw. Symp., Dig., vol. 1, pp. 81-84, Jun. 2003.
- [4] 이주영, 김지연, 이동현, 김종현, "선형적인 동적 영역 특성을 갖는 고출력 비대칭 Doherty 전력 증폭기의 설계", 한국전자과학회논문지, 17권, 6호, 538-545쪽, 2006년 6월.
- [5] 유형수, "Doherty 전력증폭기의 선형성 개선에 관한 연구", 박사학위논문, 광운대학교, 2006년.
- [6] 김일두, 지승훈, 문정환, 손정환, 김정준, 김범

만, "효율 향상을 위해 포락선 추적 기술을 이용한 비대칭 포화 3-Stage 도허티 전력 증폭기", 한국전자과학회논문지, 20권, 5호, 813-822쪽, 2009년 8월.

저자약력

강 동 진 (Dong-Jin Kang)



1993년 2월 광운대학교
전자통신공학과(공학사)
2004년 2월 광운대학교
전파공학과(공학석사)
2008년 2월 광운대학교
전파공학과(공학박사)
2003년~현재 한국정보통신기능
대학 이동통신설비과 교수

<관심분야> RF 회로 설계, RF 시스템

한 기 관 (Ki-Kwan Han)



1999년 2월 광운대학교
전자통신공학과(공학석사)
2008년 2월 순천향대학교
정보통신공학과(공학박사)
2003년~현재 한국정보통신기능
대학 정보통신설비과 교수

<관심분야> RF 회로 설계, 전력 증폭기

이 호 웅 (Ho-Woong Lee)



1984년 2월 광운대학교
전자통신공학과(공학사)
1986년 2월 광운대학교 대학원
전자통신공학과(공학석사)
2000년 2월 광운대학교 대학원
전자통신공학과(공학박사)

1988년4월~1996년2월 LG전자 영상미디어연구소
(선임연구원)

1996년~현재 동원대학 정보통신과 부교수

<관심분야> 방송통신, 무선통신, HDTV