고효율 전력증폭기 설계를 위한 가변 바이어스 기법

Variable Bias Techniques for High Efficiency Power Amplifier Design

이영민*, 김경민*, 구경헌*

Young-Min Lee*, Kyung-Min Kim* and Kyung-Heon Koo*

요 약

본 논문에서는 설계된 전력증폭기에서 가변 바이어스 기법을 이용하면 전력부가효율을 증가시킬 수 있다는 것을 보였다. 서로 다른 출력전력을 갖는 이중 모우드에서 높은 효율을 얻기 위하여 가변 바이어스 기법을 이용하고 바이어스 변화에 따른 영향을 시뮬레이션 하였다. 게이트 전압을 고정하고 드레인 바이어스를 시뮬레이션으로 최적값을 구하여 이를 변화하여 전력증폭기의 효율을 향상시킬 수 있었다. 또한 전력증폭기의 비선형 특성을 분석하고 디지털 사전왜곡 기법을 이용하여 이중 대역 증폭기의 송신기의 ACPR 특성을 최대 10dB 개선되었다.

Abstract

This paper shows some variable bias techniques which can improve the power added efficiency(PAE) for the designed power amplifier. Some simulations have been done to get the effect of the bias change, and variable bias is adopted to get the higher efficiency for dual mode amplifier which generates two different output power levels. With drain bias change and a fixed gate bias, the amplifier shows PAE improvement compared to the fixed bias amplifier. In addition, this paper analyzed nonlinear distortion of the power amplifier and has used the digital predistortion which can result in 10dB ACPR improvement for the dual band amplifier.

Keywords : power amplifier, drain bias change, dual band

I. 서 론

오늘날 많은 새로운 무선통신 시스템이 제안되어 서비스가 진행되고 있으며 이중에는 고속 이동 중에도 데이터 전송이 가능한 와이브로(WiBro) 시스템이 있다. 와이브로는 시속 100Km 이상의 속도로 이동 중에도 수Mbps 이상의 전송속도를 갖도록 구현된 새로운 기술로 단말의 경우 최대 1W급 출력을 갖는다. 와이브로에 인접한 2.4GHz 주파수 대역에서는 IEEE802.11 표준의 다양한 무선랜 서비스가 제공되고 있으며 단말의 경우 100mW 이하 출력을 갖는다.

이동통신 기술의 발전 방향을 볼 때 향후 휴대전화 사용자들에게 이동통신과 와이브로 서비스를 동시에 제공하는 단말기가 제공될 것으로 예상되며, 와이브로와 무선랜 이중 서비스를 제공하는 것도 필요하다.[1],[2] 이러한 이동통신 시스템의 발전은 이를

* 인천대학교 전자공학과(Dept. of Electronics Engineering. University of Incheon.)
· 제1저자 (First Author) : 이영민
· 투고일자 : 2009년 5월 13일
· 심사(수정)일자 : 2009년 5월 18일 (수정일자 : 2009년 6월 5일)
· 게재일자 : 2009년 6월 30일

지원하는 새로운 RF 기술을 필요로 하며, 무선시스템 송신전력의 상당 부분을 소비하는 전력증폭기는 선형성을 유지하며 높은 전력효율을 얻기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 전력증폭기 효율을 개선하는 방법에는 Doherty 증폭기, 다이나믹 바이어스 및 적응형 바이어스 증폭기 등의 연구가 있으며, 이 연구들은 단일 대역에서 동작하는 전력증폭기의 효율을 개선하는데 큰 효과가 있으며 향후 다중 모우드 시스템에 대한 연구가 추가로 필요하다.[3],[4],[5],[6]

전력증폭기의 효율 특성을 개선하는 경우 비선형 특성이 크게 나타나므로 선형화 특성 개선이 필요하며 이를 위한 디지털 사전왜곡 선형화기법을 적용하여 각 신호의 특성과 전력증폭기의 출력특성을 비교해 볼 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 고효율 이중 모우드 전력증폭기를 설계하고 전력증폭기의 선형성을 향상하기 위하여 디지털 사전왜곡 선형화 기법을 적용하여 특성 개선을 시도하였다. 논문 2장에서는 가변 바이어스 기법을 이용하여 고효율 특성을 갖는 증폭기 설계 원리를 제시하고 게이트 및 드레인 바이어스 변화에 따른 효율 변화를 시뮬레이션 하여 가변 바이어스를 이용한 전력증폭기 설계를 기술하였다. 그리고 디지털 사전왜곡 기법에 대한 이론과 제안한 전력증폭기에 적용하여 시뮬레이션 한 결과들을 제시하였다. 3장에는 제안된 가변 바이어스 증폭기의 구현 및 특성을 기술하고 4장에 결론을 제시하였다.

Ⅱ. 가변 바이어스 증폭기 설계

2-1 가변 바이어스 제어 이론

증폭기 전력부가효율 (Power Added Efficiency, PAE) 은 DC 입력전력과 원하는 RF 주파수에서 전달되는 전력의 비로 식(1)에 표시하였다.[7]

$$PAE = \frac{P_{RF(out)} - P_{RF(in)}}{P_{DC}} \quad (1)$$

PAE를 개선하기 위하여 가변 바이어스 증폭기는 각 주파수 대역에서 공급되는 바이어스 및 전력(PDC)을 제어하여 최적의 효율을 유지하고자 동작하게 된다. 그림 1은 사용되는 적응형 바이어스 전력증폭기의 기본적인 블록도이다.[2],[8] 단일 주파수 대역 및 협대역 신호가 입력되면 방향성결합기로 신호전력을 분배하고 포락선 검파기를 통해 입력신호를 검출하며, 최적 효율을 얻기 위한 파형 정형회로 등으로 구성된다. 적응형 바이어스 전력증폭기는 입력 신호의 크기에 따라 바이어스 전압을 제어하는 방식으로 고정 바이어스 증폭기의 경우와 비교하여 입력 신호 크기가 작을 경우 전력효율이 개선된다. 하지만 입력 신호의 크기와 주파수가 각각 다른 새로운 형태의 이중 모우드 시스템에 적용하기 위해서는 각각의 신호에 따라 최적 성능을 갖는 바이어스 전압으로 가변시켜야 한다. 그림 2는 적응형 바이어스와 고정 바이어스형 증폭기의 효율을 비교한 것이다. 적응형 바이어스 제어를 통해 PAE가 개선된 특성을 나타내고 있다.[2],[5] 그림 3에 본 논문에서 제안한 가변 바이어스 전력증폭기 블록도를 나타내었다. 동작 주파수 및 모우드 정보를 이용하여 DC- DC 변환기의 전압을 제어하여 각 모우드에 최적화된 바이어스를 공급하게 된다.

이 경우 게이트 및 드레인 바이어스를 각각 가변하거나 두개 모두를 가변할 수 있으므로 이 중 어느 경우를 구현할 것인가를 결정하여야 한다. 본 연구에 이용된 증폭기는 무선랜과 와이브로 이중 대역에서 10dB 이상의 이득을 갖고 각각에서 요구하는 출력을 만족하는 P1dB를 갖도록 바이어스 결정 시뮬레이션 및 효율 개선 목표를 설정하였다.[2]

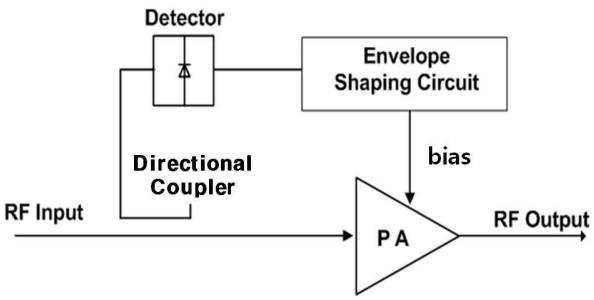


그림 1. 적응형 바이어스 증폭기 블록도.
Fig 1. Block diagram of adaptive bias amplifier

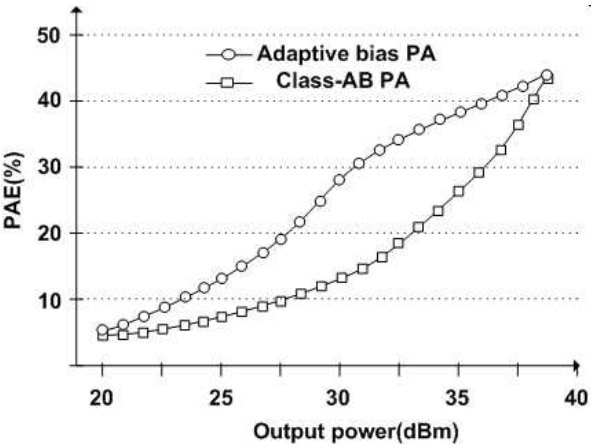


그림 2. 적응형 바이어스 및 고정 바이어스 전력증폭기의 전력부가효율.
Fig 2. PAE of adaptive bias PA and fixed bias PA

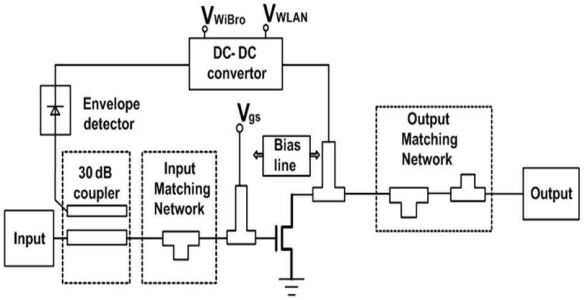


그림 3. 가변 바이어스 전력증폭기의 블록도
Fig 3. Block of variable bias amplifier

2-2 디지털 사전왜곡 선형화 기법

사전왜곡 방식은 크게 아날로그방식과 디지털방식으로 나눌 수 있다. 사전왜곡 신호를 RF대역에서 구현하는 아날로그방식의 경우 각 주파수 대역별로 별도의 회로가 필요 하게 되므로 여러 가지 구현의 복잡성이 존재하게 된다. 또한 아날로그 사전 왜곡기는 대역폭의 제한은 없으나 일반적으로 왜곡 제거가 주로 3차 IMD에 제한되는 단점이 있다. 반면 디지털 사전왜곡기는 기저대역에서 사전왜곡신호를 만들게 되므로 신호 조정이 쉽고 시스템의 신뢰성과 유연성이 좋다. 그림 4에 제시한 바와 같이 대부분의 디지털 사전 왜곡기 구현에서는 다양한 진폭레벨의 입력신호와 이에 대한 사전왜곡 출력 신호간의 매핑을 테이블 참조방식(Look Up Table)을 이용하여 이를 메모리에 저장하여 이용하는 방식을 사용한다. 기저대역 디지털 사전왜곡 방식은 다양한 장점이 있다.[9]

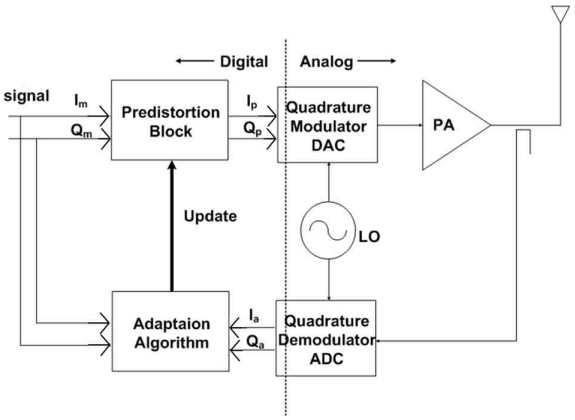


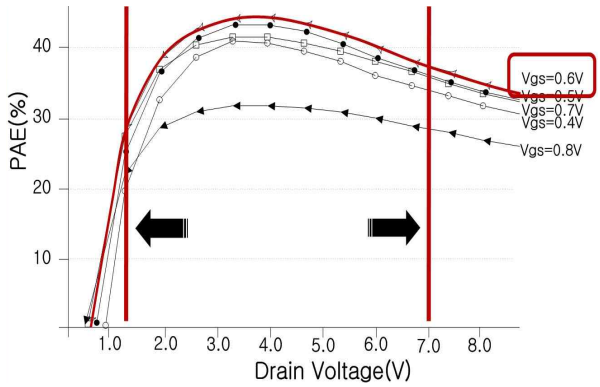
그림 4. 적응형 디지털 사전왜곡 시스템의 블록도
Fig 4. Block for adaptive digital predistortion

2-3 가변 바이어스 시뮬레이션

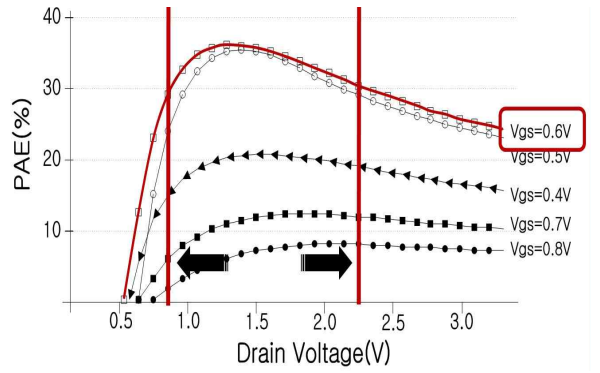
증폭기의 PAE를 개선하기 위해 동일한 출력에서 공급 DC 전력을 감소하면 되므로 가능한 낮은 드레인 바이어스 공급이 필요하다. 본 연구의 이중 모드 동작에서는 무선랜의 경우 요구출력이 와이브로의 십분의 일 내외 이므로 이 경우 드레인 전압을 최소로 하면 된다. 증폭기에 공급되는 바이어스를 제어하기 위해서는 드레인 및 게이트 각각에 대해 바이어스 제어회로가 필요하며, 본 논문에서는 이들 바이어스 전압을 변화하며 전력증폭기의 효율 개선 특성을 시뮬레이션 하였다. 또한 이중 모우드에서 원하는 증폭기 특성을 얻기 위해서 동시에 게이트와 드레인 바이어스를 조정하는 것은 복잡하므로 신호의 종류에 구분 없이 공급할 수 있는 Vgs를 선택하기 위한 최적의 값이 가능한지 시뮬레이션 하였다. 그림 5(a)는 2.3GHz 신호를 인가하고 드레인 전압과 게이트 전압을 변화시켰을 때 출력되는 전력효율 특성을 시뮬레이션 한 것이다. Vds는 최대 8V 로 변화시키고, Vgs는 최대 0.8V 의 범위에서 변화를 주었다. 이때 Vds=5V, Vgs= 0.6V 에서 1W (30dBm) 의 출력전력과 40%의 전력효율을 얻을 수 있음을 시뮬레이션 할 수 있었다.

또한 2.4GHz 무선랜 신호를 인가한 상태에서 드레인과 게이트 전압을 변화시키며 출력되는 효율 특성을 시뮬레이션 한 결과, 무선랜 신호의 경우 Vds=2V, Vgs=0.6V에서 100mW 급 출력전력과 30% 이상의 효율을 얻을 수 있었다. 시뮬레이션 결과 게이트 전압

에 따라 특성이 변화하지만 이중 모우드의 두 경우 모두 Vgs가 0.6V일 때 요구 특성을 만족하였으며 따라서 게이트 전압은 Vgs=0.6V 로 고정하여 최적의 드레인 바이어스를 찾았다..



(a) 2.3GHz_WiBro



(b) 2.4GHz WLAN

그림 5. 2.3GHz 및 2.4GHz 신호를 인가시, 드레인 및 게이트 전압에 따른 시뮬레이션 전력부가효율.

Fig 5. Simulation PAE for WiBro and wireless LAN signal by drain and gate voltage.

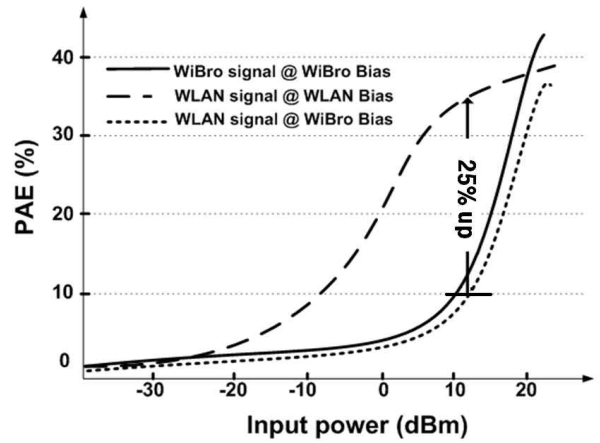


그림 6. 드레인 바이어스 스위칭시 개선된 PAE 특성.

Fig 6. Simulated PAE with drain bias switching.

가변 바이어스 기법을 적용해 각 주파수 대역에서 시뮬레이션된 효율을 그림 6에 제시하였다. 와이브로와 무선랜에 최적화된 바이어스 전압을 인가하였을 때 최대 38% 효율을 갖는 것으로 나타나 무선랜의 경우 무선랜 고정 바이어스 증폭기의 효율과 비교하여 20% 이상의 효율이 개선되었다.

Ⅲ. 증폭기 특성 측정

시뮬레이션된 가변 바이어스 전력증폭기를 실제 제작하여 그림 7에 나타내었다. 일단 pHEMT 증폭기로 드레인 바이어스 스위칭을 이용하여 이중대역에서 효율 특성 개선을 측정하였다. 증폭기에 고정 게이트 바이어스 및 드레인 바이어스 스위칭을 공급하고 출력 특성을 측정하였을 때 그림 8(a)에서와 같이 무선랜 모우드시 출력 P1dB는 19.2dBm이며, 와이브로 모우드시 그림 8(b)에서와 같이 28.4dBm의 출력을 나타내었다. 각 바이어스 조건에서 입력전력에 따른 효율의 변화를 나타낸 그림 9에서 알 수 있듯이 드레인 바이어스 스위칭시 전력부가효율은 35% 에서 38% 로 고정 바이어스보다 효율이 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

기저대역 사전왜곡기의 성능은 비선형 소자의 특성과 역이되는 신호를 모델링하여 인가하는 데에 있다. 전력증폭기의 비선형 왜곡특성인 AM-AM, AM-PM 왜곡특성을 추출하여 원하는 사전 왜곡신호를 생성하기 위해서는 1-tone 인가에 의한 측정 방법보다는 실제 무선 랜(IEEE 802.11a) 신호원을 전력증폭기에 인가하여 AM-AM , AM-PM 왜곡특성을 추출하는 것이 바람직하다.

그림 10은 IEEE 802.11g 신호원을 제작된 전력증폭기에 인가하여 에질런트의 벡터 신호 분석툴을 사용하여 얻은 전력증폭기의 진폭-진폭 (AM-AM) 및 진폭-위상 (AM-PM) 왜곡 특성을 나타내고 있다. 그림 11은 중심주파수 2.4GHz에서 제작한 전력 증폭기의 출력 스펙트럼을 나타낸 것이다. 사전왜곡을 이용하지 않은 전력증폭기와 적응형 기저대역 사전왜곡 기법을 사용하였을 때 스펙트럼을 비교하였다. 중심주파수에서 각각+11MHz와 +20MHz에서 2.6dB와

7.3dB ACPR특성이 향상되었다. 그림 12은 2.3GHz에서 측정된 스펙트럼으로 offset 주파수에서 최대 10dBc까지 ACPR특성이 개선되었다.

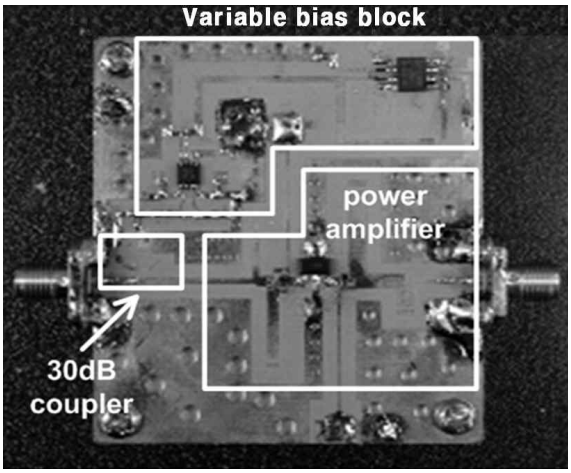
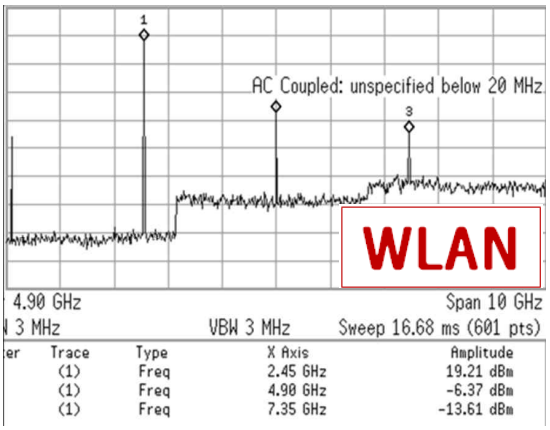
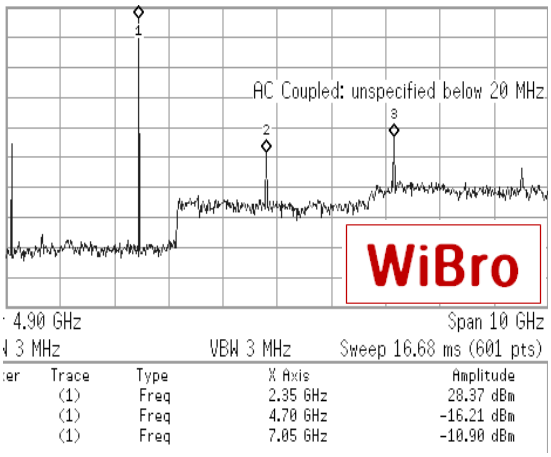


그림 7. 설계된 전력증폭기
Fig 7. Designed power amplifier



(a) 2.4GHz_WLAN



(b) 2.3GHz_WiBro

그림 8. 2.3GHz_WiBro 및 2.4GHz_WLAN 대역 출력
Fig 8. Output of 2.3GHz and 2.4GHz

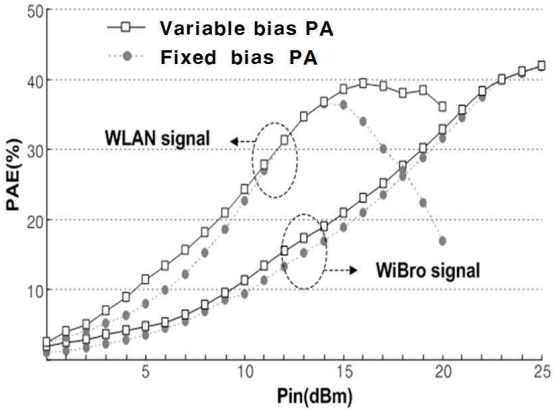
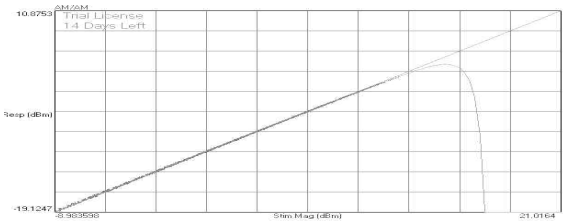
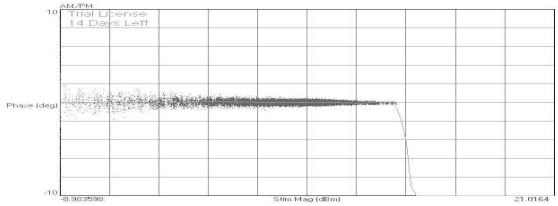


그림 9. 가변 바이어스와 스위칭 된 고정 바이어스 전력증폭기의 전력부가효율 비교.
Fig 9. PAE comparison of variable bias PA with switching fixed bias PA



(a) AM-AM



(b)AM-PM

그림 10. 전력증폭기의 측정된 AM-AM,AM-PM 특성
Fig 10. Measured AM-AM & AM-PM of PA

그림 11 선형화 전후 2.4GHz WLAN 스펙트럼 특성
Fig 11. Measured WLAN spectrum with DPD and without DPD

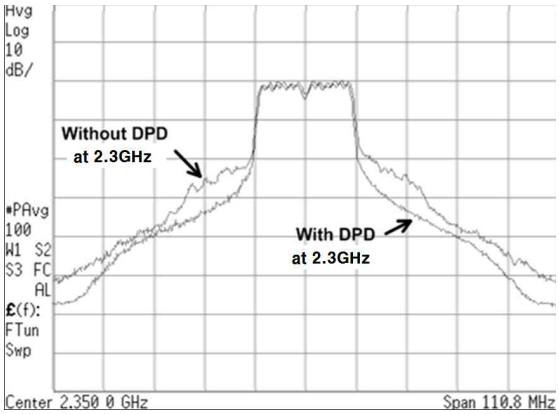


그림 12 선형화 전후 2.3GHz 스펙트럼 특성
Fig 12. Measured 2.3GHz spectrum with DPD and without DPD

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 전력증폭기의 바이어스를 가변하여 이중대역에서 높은 효율을 얻도록 하였다. 시뮬레이션을 통하여 증폭기의 게이트 바이어스를 Vgs= 0.6V로 고정하여도 출력 및 전력효율의 변화가 크지 않은 바이어스를 결정하게 되어 드레인 바이어스만을 가변하여 전력부가효율 특성을 개선하였다. 구현된 증폭기에 가변 바이어스 기법을 적용하여 특성을 측정하였다. 와이브로 및 무선랜 이중 모우드에서 최대 38%의 PAE 특성을 나타냈으며 그 결과를 표 1에 정리하였다.

표 1. 바이어스 포인트 및 출력특성
Table 1. Bias point and output characteristics.

	bias point		PAE%max	P1dB [dBm]
	Vds	Vgs		
2.3GHz WiBro	5V	0.6V	38%	28.4
2.4GHz WLAN	2V			19.2

전력증폭기에 적용된 선형화 기법의 타당성을 선형화 전후의 스펙트럼(ACPR)을 비교하여 제시하였다. 측정결과, 출력스펙트럼은 중심주파수 2.4GHz에서 각각 +11MHz, +20MHz, +30MHz offset인 주파수에서 선형화하지 않았을 때와 비교하여 2.6dB, 7.3dB, 3.3dB의 ACPR 특성이 향상되었으며, 중심주파수 2.3GHz 에서도 각 옵셋 주파수에서 최대 10dBc의 ACPR 특성이 개선되었으며 그 결과를 표2에 정리하였다.

표 2. 선형화 후의 ACPR 특성 변화
Table 2. Variation of ACPR after linearization

offset frequency	2.3GHz WiBro		2.4GHz WLAN	
	선형화 전	선형화 후	선형화 전	선형화 후
+11MHz	-19.6dB	-19dB	-16.6dB	-19dB
+20MHz	-20.5dB	-22.9dB	-18.3dB	-20.9dB
+30MHz	-28.4dB	-33.1dB	-26.5dB	-33.8dB

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2007년도 자체 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

[1] 지경용, 김문구, 임상민, “광대역 무선인터넷의 고객 수용도 분석 및 서비스 제공 방향,” *통신시장, 통권 제 51호*, 2003. 12.

[2] 이영민, 구경헌, “드레인 바이어스 스위칭을 이용한 와이브로/무선랜 이중 모우드 전력증폭기,” *대한전자공학회 논문지*, 제44권 TC편, 제3호, pp.248-252, 2007. 3.

[3] S. B. Shin and S. G. Lee, "An adaptive bias circuits for high efficiency power amp," *Proceedings of 2000 Tencon,* vol. 2, pp. 30-32, 2000.

[4] Fun Ye, Jen Shiun Chiang, Chun Wen Chen, and Yu Chen Sung, "Dynamic bias circuits for efficiency improvement of RF power amplifier," *Tamkang Journal of Science and Engineering,* vol. 7, pp. 183-188, 2004.

[5] J. Cha, Y. Yang, B. Shin and B. Kim, “An adaptive bias controlled power amplifier with load modulated combining scheme for high efficiency and linearity,” *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.* vol 1, pp. 81-84, 2003.

[6] J. Lees, M. Goss, J. Benedikt and P.J. Tasker, “Single tone optimisation of an adaptive bias Doherty

structure," *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.* vol 3, pp. 2213 - 2216, 2003.

[7] David M. Pozar, Microwave and RF wireless systems, John Wiley & Sons, pp. 218-219, 2001.

[8] K. H. Yang, G. I. Haddad, and J. R. East, "High efficiency class A power amplifiers with a dual bias control scheme," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.,* vol. 47, pp. 1426-1432, 1999.

[9] J. H. Choi, S. M. Kang, and K. H. Koo, "Digital predistortion of frequency multiplier for dual band wireless LAN transmitter," *2005 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, 2005.

이 영 민 (李永珉)

2006년 2월 : 인천대학교 전자공학과 (공학사)
2008년 2월 : 인천대학교 전자공학과 (공학석사)
2008년~ 현재 : KMW 연구원
관심분야 : 마이크로파 회로 및 모듈 설계, 다중대역 전력증폭기 설계

김 경 민 (金王竟 珉)

2009년 2월 인천대학교 전자공학과 (공학사)
2009년 2월~현재 : 인천대학교 전자공학과 석사과정
관심분야 : 마이크로파 회로 및 모듈 설계, 전력증폭기 설계 및 선형화

구 경 헌 (具京憲)

1981년 : 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1983년 : 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1991년 : 서울대학교 전자공학 (공학박사)
1999년~2000년 : UC San Diego 방문학자
2001년 ~ 2008년 : 대한전자공학회 마이크로파 및 전파연구회 위원장, 통신소사이어티 회장
2003년 ~ 현재 : 한국항행학회 학술 이사, 국제 이사, 차세대항행 통신연구회 위원장, 부회장
1987년 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 교수
관심분야 : 마이크로파 회로 및 모듈 설계, 전력증폭기 선형화, 무선통신 시스템, 차세대항행시스템 등