적응형 바이어스와 PBG를 이용한 Doherty 전력 증폭기 전력효율과 선형성 개선에 관한 연구

Research on PAE and Linearity of Doherty Amplifier Using Adaptive Bias and PBG Structure

이 왕 열 · 서 철 헌

Wang-Yeol Lee · Chul-Hun Seo

요 약

본 논문에서는 적응형 바이어스와 PBG 구조를 이용하여 Doherty 증폭기의 효율 및 선형성을 개선하였다. PBG 구조를 출력 정합회로에 구현하였으며, 적응형 바이어스를 peaking amplifier에 적용하여 Doherty 증폭기의 효율뿐 아니라 선형성을 개선할 수 있었다. 제안된 구조를 이용한 Doherty 증폭기는 기존의 전력증폭기에 비해 PAE 12 %, IMD_3 −7.5 dBc 개선하였다.

Abstract

In this paper, adaptive bias circuit and PBG structure have been employed to suppress IMD(Inter-Modulation Distortion) and improve PAE(Power Added Efficiency) of the Doherty amplifier. Gate bias voltage has been controlled with the envelope of the input RF signal and PBG structure has been employed on the output port of Doherty amplifier. The proposed power amplifier using adaptive bias circuit and PBG has been improved the IMD_3 by 7.5 dBc, and the average PAE by 12 %, respectively.

Key words : Adaptive Bias, Doherty Amplifier, Efficiency, Lienearity, PAE

Ⅰ. 서 론

이동 통신 시스템의 급격한 보급에 의해 무선통신 고출력 증폭기의 중요성이 새로이 부각되고 있으며 앞으로도 새로운 환경에 적합한 고출력, 고효율을 가지는 전력 증폭기가 개발이 시급하고 현재 사용 중인 CDMA 방식에서와 같이 넓은 대역에서 많은 양의 정보를 전송하기 위해 multiple-carrier 이용하기 때문에 선형성도 전력 증폭기의 중요한 설계 사양이 되었다[1].

기존의 전력 증폭기의 선형성 해결 방법으로는 back-off, feedback, pre-distortion, feedforward, PBG 등이 있다. 이 방식 중 feedforward, pre-distortion 방식은 추가적인 소자를 사용해야 한다는 단점이 있다. 따라서 PBG를 이용한 선형화 기법이 필요하다[2],[3]. 일반적으로 Doherty 증폭기는 각기 다른 클래스의 두 증폭기를 사용하는데 주 증폭기를 A급 또는 B급으로 설계하면 보조 증폭기는 B급 또는 C급으로 사용한다. B급 또는 C급 증폭기의 경우 선형성의 문제를 가지게 되고, B급 또는 C급을 동작할 때 입력 신호가 크기 때문에 A급 또는 AB급은 포화가 되어 혼변조 왜곡 성분이 증가하게 된다. 즉 Doherty 전력 증폭기는 효율 개선의 장점을 가지고 있으나 선형성 문제를 갖게 된다[4],[5].

「이 연구는 2005학년도 숭실대학교 교내연구비의 지원으로 연구되었음.」

숭실대학교 정보통신공학부(School of Electronic Engineering, Soong-sil University)

· 논 문 번 호 : 20050521-01S

· 수정완료일자 : 2005년 8월 10일

본 논문에서는 B급 또는 C급 증폭기가 동작할 때 주 증폭기 A급 또는 AB급은 포화가 되어 선형성이 열화됨으로 적응형 바이어스를 이용해 게이트의 DC 전압을 조절하는 방법과 PBG 구조를 Doherty 증폭기의 출력 정합 회로에 구현함으로써 무선 통신 고출력 증폭기의 전력 효율 및 비선형 특성 문제를 동시에 해결할 수 있었으며 RF 고출력 증폭기의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 가능성을 보여주었다.

Ⅱ. 본 론

2-1 Adaptive Bias Control Circuit 이론 및 설계

PAE(전력부가효율)은 다음 식과 같이 표현된다.

$$PAE = \frac{(RFoutputpower) - (RFinputpower)}{(Vgs * Igs) + (Vds * Ids)} \quad (1)$$

PAE를 개선하기 위해 바이어스의 전압을 입력 RF 신호의 크기에 비례하여 조절하는 방법이다.

전압을 조절하는 방법은 세 가지가 있다. 그림 1에서 보는 것과 같이 드레인 전압 또는 게이트 전압을 조절하거나, 양쪽의 전압을 조절하는 방법이 있다[6]. 하지만, 실질적으로는 양쪽의 전압을 동시에 조절하기는 어렵기 때문에 보통은 드레인이나 게이트 전압 중에 하나만 조절하는 방법을 많이 사용한다. 포락선 검파기로는 Analog Device사의 AD8313을 이용한 포락선 검파기를 사용하였다.

포락선 검파기을 통해서 입력 신호(RF)의 크기에 따라서 출력 전압(DC)이 나오지만 0~2 V 사이의 값이 나오기 때문에 전력 증폭기의 게이트 전압으로는 알맞지 않으므로 그림 3과 같이 OP-Amp을 거쳐

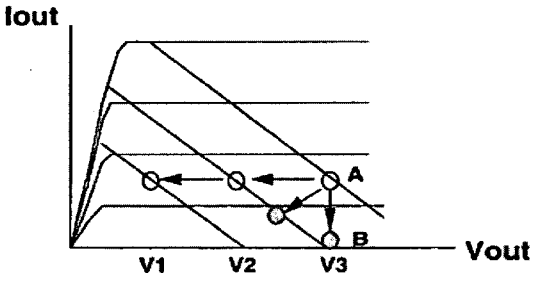

그림 1. RF 부하선과 적응형 DC-바이어스 점
Fig. 1. RF load line and various DC-bias point.

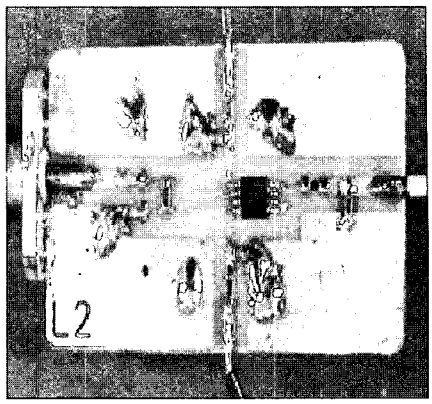

그림 2. AD8313을 이용한 포락선 검파기의 회로
Fig. 2. Envelope detector circuit using AD8313.

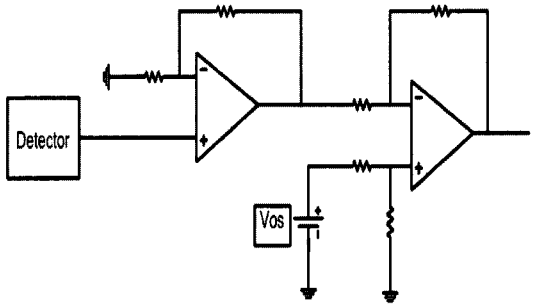

그림 3. 적응형 바이어스 회로
Fig. 3. Circuit diagram for the adaptive gate bias circuit.

서 전압의 크기를 조절해야 한다. 즉 입력 파워가 올라감에 따라 최종 게이트 DC 값은 AB급에서 B급으로 B급에서 C급에 해당하는 전압 값으로 점점 작아져야 하기 때문에 그림 3과 같은 구조를 이용하였다.

2-2 PBG 이론 및 설계

PBG 구조는 Bragg 격자 원리로부터 2 Λ에 해당하는 주파수를 중심으로 저지대역이 형성되는 것을 예상할 수 있다. 이러한 PBG 구조의 원리를 이용하여 원하는 부분에서의 저지대역 형성할 수 있다. 격자의 주기 Λ는

$$\Lambda = \lambda_g/2 \quad (2)$$

여기서 λ_g는 마이크로스트립 라인 구조에서 유기되는 전파의 파장으로 식 (3)과 같이 유효 유전률과 원하는 저지대역의 중심 주파수에 의해 구해진다.

$$\lambda_g(f) = \frac{v_p(f)}{f} = \frac{c}{f\sqrt{\mu_r \varepsilon_{r,eff}(f)}} \quad (3)$$

여기서 주파수 f는 원하는 저지대역의 중심 주파수를 $\varepsilon_{r,\,eff}(f)$는 마이크로스트립 구조에서 저지대역의 중심 주파수가 갖는 유효 굴절률을 말한다.

PBG 설계를 위하여 시뮬레이션 툴로 Ansoft사의 HFSS8.0를 사용하였으며, 유전율 3.2를 갖는 테프론 기판을 사용하여 제작하였다.

그림 4는 PBG 측정 결과치로 중심 주파수인 1.8 GHz에서의 신호의 감쇠가 최소가 되도록 설계하여 S_{21}= −0.3 dB, 2차 고조파 대역인 3.6 GHz에서는 S_{21}= −28.2 dB가 되도록 만들어서 고조파 성분의 감쇠가 많이 되도록 만들었다.

2-3 적응형 바이어스와 PBG 구조를 이용한 Doherty 전력 증폭기 설계

본 연구에서 유전율 3.2의 테프론 기판을 사용하였고, 사용된 소자는 Motorola사의 MRF281ZR1을 사용하였다. Loadpull 시뮬레이션을 통하여 출력 정합점을 찾고 그에 따른 출력 정합을 하여 Doherty 전력 증폭기를 설계하였다.

차세대 이동 통신 시스템의 획기적인 연구를 위하여 새로운 개념의 고출력 증폭기 연구의 필요성이 증대하고 있으며 전 세계적으로 무선 통신 환경에서

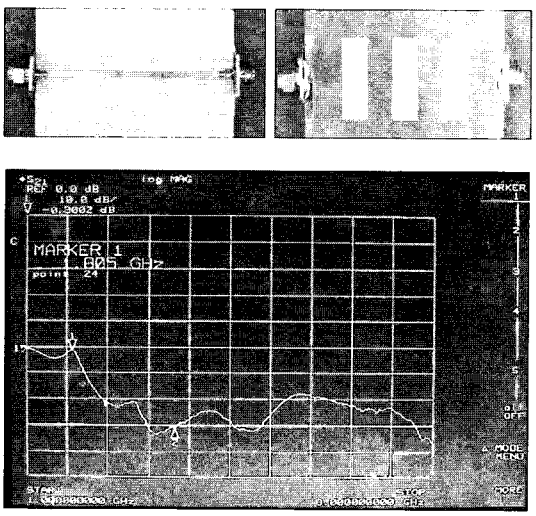

그림 4. 실제 제작한 PBG 모양과 측정
Fig. 4 . Manufacture of PBG measurement.

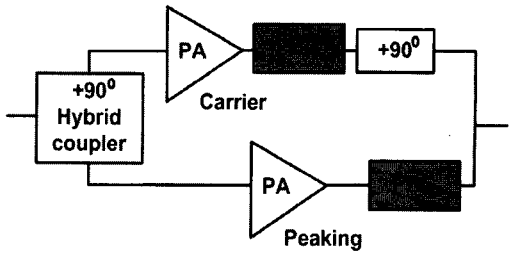

그림 5. PBG 적용한 Doherty 증폭기 설계
Fig. 5. Design of Doherty amplifier using PBG.

고출력 증폭기의 연구가 경쟁적으로 진행되고 있다. 이러한 고출력 전력 증폭기 개발을 위해 여러 가지 가능성이 제안되었으나 그 중 PBG를 이용한 Doherty 증폭기가 알맞은 구조이다.

그림 5는 각 증폭기에 PBG를 적용한 것으로 PBG를 사용함으로써 기존의 Doherty 증폭기가 갖고 있는 선형성 문제를 해결하는 것이다. 전력 증폭기 loadpull 정합점을 찾아 출력 정합 회로를 구현할 때, PBG를 포함하여 출력 정합 회로를 구현한 것이다. 이와 같은 방식으로 PBG를 적용하여 최종적인 PBG를 적용한 Doherty 증폭기를 설계하였다.

2-4 PBG 구조를 이용한 Doherty 전력증폭기 제작 및 측정

우선 본 논문과 비교하기 위해서 기준이 되는 class AB급 전력 증폭기를 그림 6과 같이 설계 제작

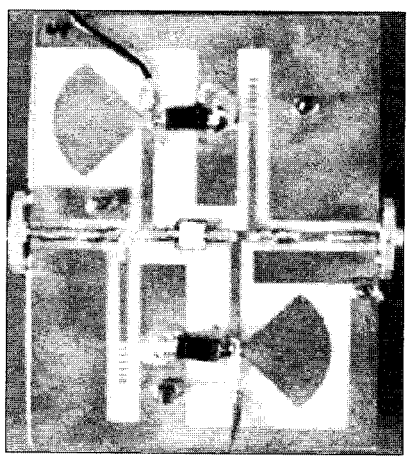

그림 6. 기준 class AB급 전력 증폭기
Fig. 6. Reference class AB power amplifier.

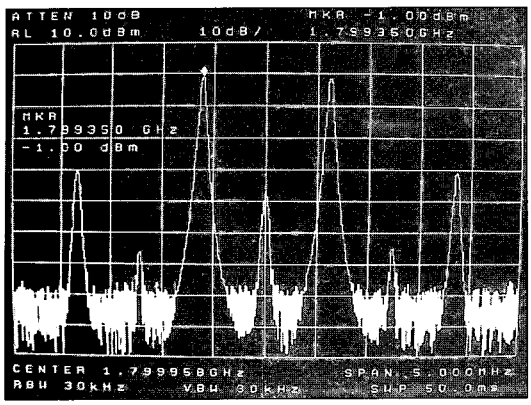

그림 7. Reference 증폭기 2-톤 측정 결과
Fig. 7. Measurement of 2-tone test data of reference amplifier.

하였고, Doherty 전력 증폭기(그림 8)와 PBG를 적용한 Doherty 전력 증폭기(그림 10)를 제작 측정하였다.

그림 7은 기준 증폭기의 2-톤 측정 결과로 입력

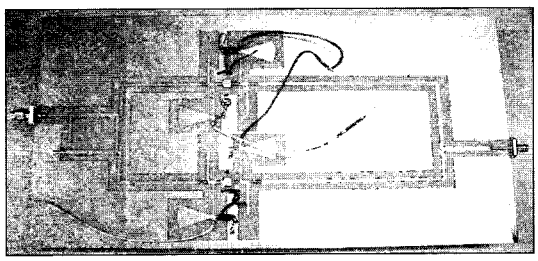

그림 8. 실제 제작한 Doherty 증폭기
Fig. 8. Realization of Doherty amplifier.

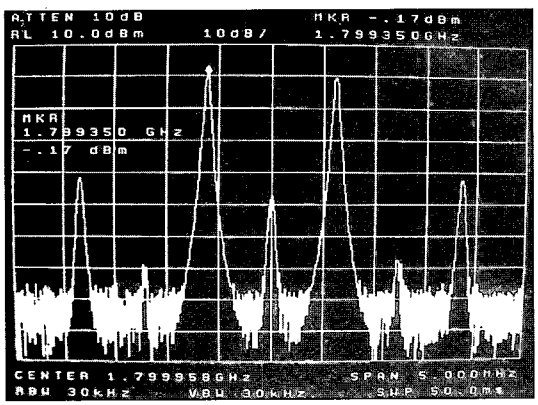

그림 9. Doherty 증폭기 2-톤 측정결과
Fig. 9. Measurement of 2-tone test data of Doherty amplifier.

전력을 19 dBm으로 인가하고 IMD_3 −30 dBc를 기준으로 32.01 dBm의 출력을 얻을 수가 있었고, 전력 효율은 25.3 %를 얻었다.

그림 9는 Doherty 증폭기의 2-톤 측정 결과로 기준이 되는 class AB급 전력 증폭기와 비교하기 위해서 IMD_3를 동일하게 −30 dBc로 하여 측정한 결과이다. 그 결과 출력 파워가 32.86 dBm이었고 전력 효율은 31.92 %로 기준 전력 증폭기보다 약 6 % 정도 전력 효율이 향상됨을 알 수 있었다.

그림 11은 PBG를 적용한 Doherty 증폭기의 2-톤 측정 결과로 역시 기준 전력 증폭기와 비교하기 위해서 IMD_3를 동일하게 −30 dBc로 하여 측정한 결과이다.

그 결과 출력 파워가 33.84 dBm이었고 전력효율은 34.85 %로 기준 전력 증폭기보다 약 9 % 정도 전

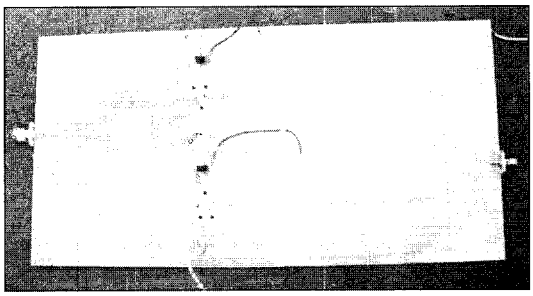

그림 10. PBG를 적용한 Doherty 증폭기
Fig. 10. Doherty amplifier using PBG.

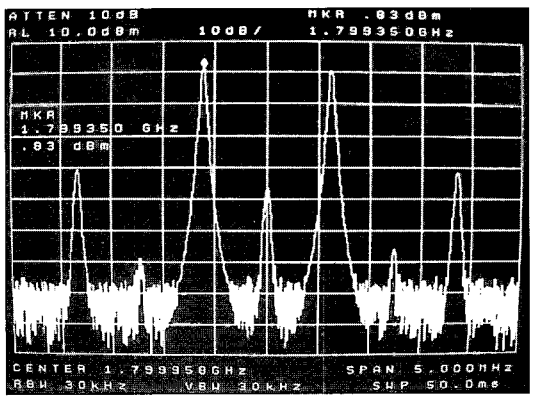

그림 11. PBG를 적용한 Doherty 증폭기 2-톤 측정 결과(동일 IMD_3)
Fig. 11. Measurement of 2-tone test data of Doherty amplifier using PBG(same IMD_3).

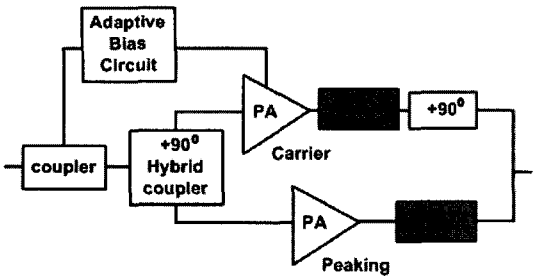

그림 12. 제안된 적응형 바이어스와 PBG를 적용한 고선형, 고효율 Doherty 전력증폭기 구조
Fig. 12. Proposed configuration of Doherty amplifier using adaptive bias and PBG structure.

력효율이 향상됨을 알 수 있었고, 기준 전력 증폭기와 같은 출력 파워로 놓고 측정했을 때 IMD_3 특성 또한 좋은 것을 알 수 있었다.

본 논문에서는 PBG를 적용한 Doherty 증폭기(그림 11)를 바탕으로 포락선 검파기(그림 2)와 전압조절을 위해 OP-Amp.(그림 3)를 이용해서 설계한 적응형 바이어스를 적용하여 효율 및 선형성을 개선시키기 위한 구조로써 그림 12와 같이 설계를 하였다.

제안된 구조와 비교를 하기 위해 앞에서 설계 제작하였던 1.8 GHz class AB급 전력 증폭기, Doherty 전력 증폭기, PBG를 이용한 Doherty 전력 증폭기를 설계 제작하였다. 입력 신호를 1800.625 MHz와 1799.375 MHz 2-톤으로 하고 IMD_3(−30 dBc) 기준으로 했을 때 class AB급은 출력이 32.01 dBm이고 전력 효율은 25.3 %라는 결과를 얻었고 Doherty 전력 증폭기는 출력이 32.86 dBm, 전력 효율이 31.92 % PBG를 이용한 Doherty 전력 증폭기는 출력이 33.84 dBm 전력 효율이 34.85 %였다.

표 1은 본 논문에서 제안한 구조와 비교하기 위한 측정치이다.

표 1. 각 증폭기에 대한 측정 결과 비교(IMD_3 −30 dBc)
Table 1. Summary of the measured data(IMD_3 −30 dBc).

	Reference	Doherty (PBG 無)	Doherty (PBG 有)
Output power	32.01	32.86	33.84
PAE(%)	25.3	31.92	34.85

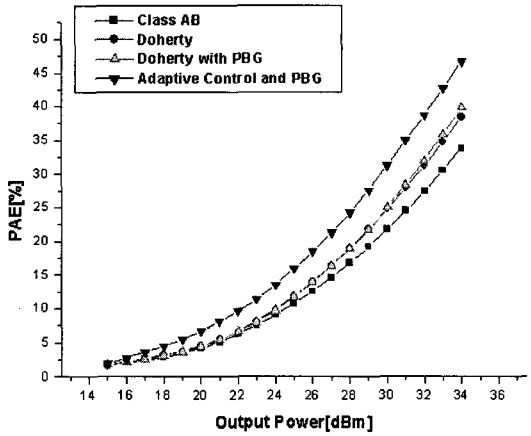

그림 13. 각 전력증폭기의 출력신호에 따른 PAE 추이
Fig. 13. Output power vs. PAE.

최종 제안된 구조인 적응형 바이어스와 PBG 구조를 이용한 Doherty 전력 증폭기는 출력이 35.45 dBm 전력 효율이 48.58 %라는 결과를 얻었다. 그림 13에서 보다시피 출력이 32 dBm에서 class AB급을 기준으로 했을 경우 Doherty 전력 증폭기는 약 5 % 증가하였고, PBG를 이용한 Doherty 전력증폭기는 약 7 % 증가하였고, 최종 제안된 구조인 적응형 바이어스와 PBG 구조를 이용한 Doherty 전력 증폭기는 12 %가 증가됨을 알 수 있었다.

그리고 제안된 구조가 그림 14에서 보듯이 낮은 입력에서 고조파 억제가 감소해 출력 28 dBm까지는 IMD_3 특성이 좋지 않으나 입력 파워에 따라 Carrier

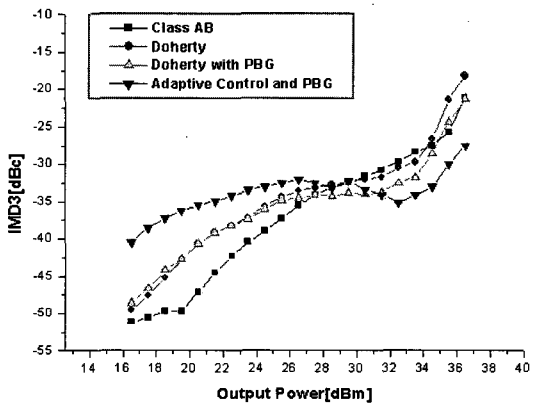

그림 14. 각 전력 증폭기의 출력신호에 따른 IMD_3 추이
Fig. 14. Output power vs. IMD_3.

Amp.의 바이어스 점이 적응형 바이어스에 의해 바뀌어지기 때문에 실제 전력 증폭기가 동작하게 되는 지점부터는 다른 세 가지 전력 증폭기보다 IMD_3 특성이 뛰어난 것을 알 수 있다.

Ⅲ. 결 론

본 논문은 전력 효율과 선형성을 증대시키는 방법으로 적응형 바이어스를 적용하여 입력 신호의 크기에 따라서 입력 전압을 조절하여 증폭기의 구동 전력을 조절하는 방식과 전력 증폭기의 출력부에 광대역 저대역 여파기의 역할을 하는 PBG(Photonic Band Gap)을 추가함으로써 선형성을 개선시키는 구조를 제안하였다.

본 논문에서 제안한 구조로 증폭기를 설계한 결과 class AB급과 Doherty 그리고 PBG 구조를 이용한 Doherty 전력 증폭기보다 뛰어난 전력 효율과 선형성을 가지는 것을 알 수 있었고 class AB급을 기준으로 제안된 구조와 비교했을 때, IMD_3 −30 dBc를 기준으로 했을 때 전력효율이 약 20 % 향상되었고 출력파워 32 dBm을 기준으로 했을 때 전력 효율은 12 %, IMD_3는 7.5 dBc가 개선되었다.

참 고 문 헌

[1] Steve C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Artech House, 1999.

[2] T. S. Kim, C. H. Seo, "A novel photonic bandgap structure for lowpass filter of wide stopband", *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, Jan. 2000.

[3] I. Rumsey, P. M. Melinda, and P. K. Kelly, "Photonic bandgap structures used as filter in microstrip circuits", *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. 8, pp. 336-338, 1998.

[4] W. H. Doherty, "A new high efficiency power amplifier for modulated waves", *Proceeding of the IRE*, vol. 24, no. 9, pp. 1163-1182, 1936.

[5] David M. Upton, Peter R. Maloney, et al., "A microwave Doherty amplifier", *Applied Microwaves and RF*, Winter 1994.

[6] G. Hanington, "High-efficiency power amplifier using dynamic power-supply voltage for CDMA applications", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, pp. 1471-1476, Aug. 1999.

이 왕 열

2004년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공학부 (공학사)
2004년 3월~현재: 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, RF power Amplifier 등

서 철 헌

1983년 3월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1985년 3월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
1993년 3월: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
1993년~1995년: MIT 연구원
1993년~1997년: 숭실대학교 정보통신공학과 조교수
1999년 8월~2001년 1월: MIT 방문교수
1997년~현재: 숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수
[주 관심분야] 이동 및 위성통신 Microwave 부품 및 시스템, PBG를 이용한 RF 부품