
도허티 이론을 이용한 무선 네트워크 및 중계기용 전력증폭기의 효율 향상에 관한 연구

전중성* · 최동묵*

A Study on Improving Efficiency of Power Amplifier using Doherty Theory for Wireless Network and Repeater

Joong Sung jeon* · Dong Muk Choi*

본 연구는 한국학술진흥재단(KRF-2003-005-D000 5) 지원으로 수행되었음

요 약

본 논문에서는 무선 네트워크 장비에도 적용 가능한 WCDMA 중계기용 전력증폭기의 선형성 및 효율을 향상시키기 위한 도허티증폭기를 구현하였다. 입력 전력의 변화에 따라 고효율 전력증폭기를 구현하고자 능동 로드풀을 이용한 도허티 기술을 이용하고 기존의 증폭기의 낮은 효율 구간에서도 우수한 선형성과 고효율을 유지하도록 설계하였다.

WCDMA 주파수 대역인 2.11~2.17 GHz에서 CW 1-tone 실험 결과 최대 출력 전력 52.3 dBm에서 6 dBm 백 오프 지점부터 50 %의 전력 부가 효율을 갖게 하여 기존의 AB급에 비해 13.3 % 이상의 높은 효율을 가졌다. 또한 게이트 바이어스 조절을 통하여 선형성 개선의 최적 바이어스 점을 찾은 후 도허티증폭기에서는 4 dB 이상의 IMD3가 개선됨을 알 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, Doherty amplifier is designed by the need of improving the linearity and efficiency of wireless network and repeater for WCDMA. It is designed to maintain the high linearity and efficiency at the low efficiency period of the power amplifier after analyzing Doherty technique using the active load-pull in condition of the high efficiency power amplifier implementation according to the variation of input power. CW 1-tone experimental results at the WCDMA frequency 2.11~2.17 GHz shows that Doherty amplifier, which achieves power add efficiency(PAE) 50 % at 6 dB back off the point from maximum output power 52.3 dBm, obtains higher efficiency of 13.3 % than class AB. Finding optimum bias point after adjusted gate voltage, Doherty amplifier shows that IMD3 improves 4 dB.

키워드

WCDMA, 도허티증폭기, 로드풀, AB급, C급, 무선 네트워크, 전력 부가 효율

1. 서 론

현대의 이동통신 시스템을 비롯한 위성통신 시스템은 고도의 통신 서비스를 실현하기 위하여 각 분야에서 기술들이 연구되어지고 비약적인 발전을 거듭하고 있다. 그 중에서도 이동통신 서비스는 이동 가입자 수와 통화량의 폭발적인 증가에 의하여 기존의 아날로그 방식으로는 다양한 정보량을 수용하는데 한계가 있으므로 CDMA, GSM 같은 디지털 방식을 선택한 통신 서비스가 국내외에서 주류를 이루고 있다. 이러한 통신 방식에서 위상과 진폭을 동시에 변조시키는 복합적인 변조방식은 신호의 포락선이 일정하게 유지 되지 않는 방식으로서 아날로그 방식에 비해 광대역의 대역폭과 인접 채널과의 간섭비를 최소화 하기 위해 고출력 전력증폭기의 출력 전력의 상당량을 백 오프(Back off) 시켜 사용하거나 선형성이 개선되어진 선형 전력증폭기를 사용하게 된다[1]~[5]. 이러한 방법으로 사용되는 전력증폭기는 높은 발열량으로 인해 소자의 수명과 RF 시스템 성능 저하를 유발하여 냉각 시스템을 추가 유지해야하기 때문에 소형 경량화 하려는 추세에 걸림돌이 되고 있다. 이러한 단점을 개선하고자 여러 가지 효율 증가 방식이 대안으로 제시되고 있는데 그 중에서도 도허티 기술은 포락선 제거 및 재생성(Envelop elimination restoration)이나 포락선 추적(Envelop tracking)과 같은 기술에 비해 포락선 검출회로나 피드백 회로와 같은 추가적인 회로가 부가되지 않아 구현이 간단하고 우수한 성능을 갖는다는 장점이 있다.

그림 1과 그림 2는 도허티증폭기의 간략한 회로도를 보여준다. 도허티증폭기는 최대 전력을 출력할 수 있는 캐리어증폭기와 피킹증폭기를 포함하며 $\lambda/4$ 변환기와 적당한 마이크로스트립 선로, 그리고 전력분배기와 합성기로 구성된다[7].

각각의 증폭기는 특성임피던스 R_{oc} 와 R_{op} 에 각각 최대 전력 레벨에서 정합되어 있다. 또한 출력 임피던스 $\lambda/4$ 변환기의 특성임피던스 R_T 는 다음과 같다.

$$R_T = \sqrt{\frac{R_{oc} R_{op}}{R_{in} + R_{op}}} R_{in} \quad (1)$$

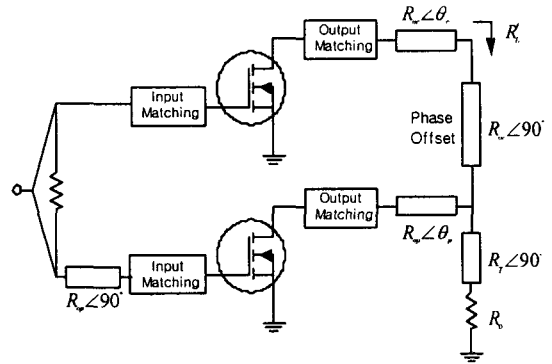


그림 2. 설계된 도허티증폭기의 구조
Fig. 2 Configuration of the designed Doherty amplifier

II. 위상 오프셋 선로

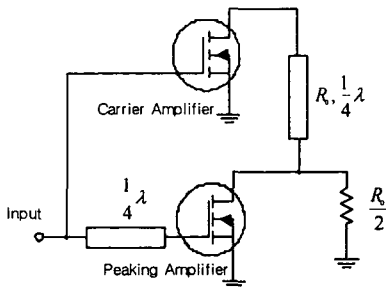


그림 1. 도허티증폭기의 구조
Fig. 1 Configuration of Doherty amplifier

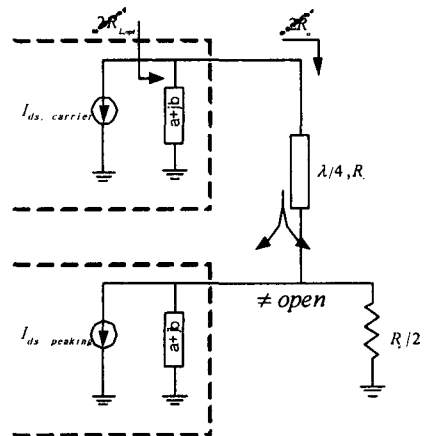


그림 3. 도허티증폭기의 출력 등가회로
Fig. 3 Output equivalent circuit of Doherty amplifier

만약 $R_o=R_{oc}=R_{op}=50 \Omega$ 이면 R_T 는 35.36Ω 이 된다. 그리고 캐리어증폭기의 오프셋 선로(Offset line)에서 바라보는 부하 임피던스는 피킹증폭기의 전류공급에 의해 변조된다. 낮은 출력파워의 경우 피킹증폭기가 완전히 동작을 하지 않는다면 캐리어증폭기의 오프셋 선로에서 바라보는 부하 임피던스는 다음 식과 같이 된다.

$$R'_{L,low} = \frac{R_{oc} R_{op} + R_{oc}^2}{R_{op}} \quad (2)$$

여기서 다시 $R_o=R_{oc}=R_{op}=50 \Omega$ 라고 한다면 캐리어증폭기의 오프셋 선로에서 바라보는 부하 임피던스는 $R'_{L,low}=100 \Omega$ 이 된다. 또한 높은 출력 전력의 경우 그 부하 임피던스는 50Ω 이 될 것이다.

하지만 위의 식과 같은 부하변조가 되기 위해서는 낮은 출력전력의 경우에 피킹증폭기가 완전히 동작하지 않아야 하고 출력단과 연결되는 부분이 완벽히 개방된 것과 같이 보여야만 한다. 일반적인 증폭기용 소자들은 큰 병렬 커패시턴스, 피드백 커패시턴스, 패키지로 인한 기생(Parasitic) 성분들을 포함하며 이러한 리액턴스 성분들은 낮은 저항성분을 가지고 높은 리액턴스 성분을 가지는 출력 임피던스를 가지게 한다. 이러한 피킹증폭기의 낮은 복소 출력 임피던스는 부정확한 부하변조를 일으켜 캐리어증폭기로부터 피킹증폭기로의 전력 누설을 생기게 하는 원인이 된다[6], [8].

그림 3은 일반적인 도허티증폭기의 출력단 등가 회로를 나타내며, 그림 4는 설계된 도허티증폭기의 출력단 등가회로를 나타낸다. 보는 바와 같이 각각의 능동 소자는 병렬 중단된 $a+jb$ 의 임피던스와 이상적인 전류원으로 표현되었다. 일반적인 부하 회로를 가지는 도허티증폭기에서 그 능동 소자 내부의 병렬 회로는 심각한 문제를 일으킬 수 있다. 먼저 낮은 출력전력일 경우 캐리어증폭기의 출력전력은 피킹증폭기로 누설될 수 있으며 이는 효율의 저하를 발생시키는 요인이 될 수 있다. 다음으로 최대 전력 정합 임피던스는 복소 임피던스가 되며 순수 저항성 부하 변조로 전력 전달이 되지 않을 수 있다. 따라서 원하는 부하 변조가 완벽히 수행될 수 없게 된다.

낮은 출력전력에서 $a+jb$ 라는 소자내부의 성분 때문에 피킹증폭기가 완전히 개방되지 않는다면 캐리어증폭기의 출력단에서 바라보는 부하 임피던스는 $2R_o$ 가 되지 않는다. 이러한 문제들은 그림 4에서 보는 바와 같이 부하 회로에 의해 상당히 줄

여질 수 있다.

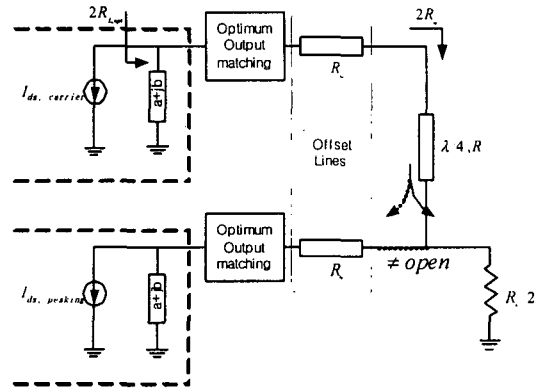


그림 4. 설계된 도허티증폭기의 출력등가회로
Fig. 4 Output equivalent circuit of the designed Doherty amplifier

높은 출력전력에서의 전력 정합회로와 적당한 길이의 오프셋 선로를 이용하여 각각의 증폭기 출력단이 만나는 곳에서의 출력 임피던스는 피킹증폭기에 대해 거의 개방된 것으로 보여질 수 있다. 사용되는 능동소자의 출력 임피던스는 매우 낮은 저항성 성분과 높은 리액턴스 성분을 가지기 때문에 적당한 길이의 오프셋 선로를 사용하여 높은 저항성 성분을 가지는 임피던스 값으로 VSWR 원을 따라 변환될 수 있다. 따라서 낮은 출력전력에서 피킹증폭기로의 전력 누설은 어느 정도 막을 수가 있으며 캐리어증폭기의 오프셋 선로에서 보여지는 임피던스 $2R_o$ 의 부하 저항으로 적당한 부하 변조가 일어날 수 있다. 오프셋 선로에서 보여지는 임피던스 $2R_o$ 는 적당한 길이의 오프셋 선로에 의해 캐리어증폭기의 전류원에서 최적 부하 임피던스 $R_{L,opt}$ 의 두 배가 된다. 앞서 설명한 바와 같이 도허티증폭기를 설계하는데 있어 중요한 점은 낮은 전력 레벨에서 피킹증폭기가 개방된 것처럼 보이게 할 뿐만 아니라 캐리어증폭기의 출력단에서 $\lambda/4(50 \Omega)$ 선로를 통해 적절한 부하 임피던스 변조가 이루어지도록 하는 것이다. 낮은 전력 레벨에서 부하 임피던스를 크게 함으로써 효율을 향상시키고 이득의 감소를 적게나마 막을 수 있다. 그 목적으로 위상 오프셋 선로(Phase offset line)가 필요하다. 그림 2는 정합된 소자를 바탕으로 해서 위상 오프셋 선로의 길이 결정을 위한 방법을 그림으로 나타낸 것이다. 시뮬레이션을 통하여 Z_{out} 를 구한 후, 위상 오프셋 선로의 길이를 결정하였다. 50Ω 선로의 길이(θ)를 이용하여 Z_{out} 를 VSWR 원을

따라서 조금씩 회전시키고 캐리어증폭기와 피킹증폭기의 출력이 합성되는 지점에서 피킹증폭기의 출력 임피던스 Z'_{out} 는 결국 리액턴스 성분이 거의 없는 저항성 성분만 가지게 된다. 계산된 도허티증폭기의 Z'_{out} 은 약 391 Ω 이었다.

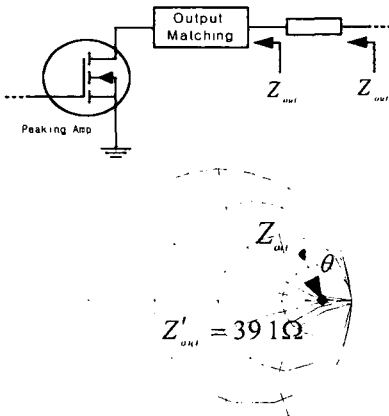


그림 5. 위상 오프셋 선로의 길이 결정 방법
Fig. 5 Load matching techniques to determine the angle of the offset transmission line for the peaking amplifier

III. 설계 및 제작

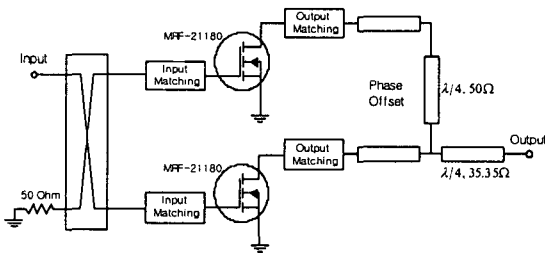


그림 6. 설계된 도허티증폭기의 상세 회로도
Fig. 6 Schematic diagram of the designed Doherty amplifier

도허티증폭기의 전체적인 구조는 평형증폭기 (Balanced amplifier)의 형태와 같다. 또한 전력증폭기의 구현을 위해 모토롤라(Motorola)사의 170 Watt PEP LD MOSFET (MRF- 21180)를 사용하였다.

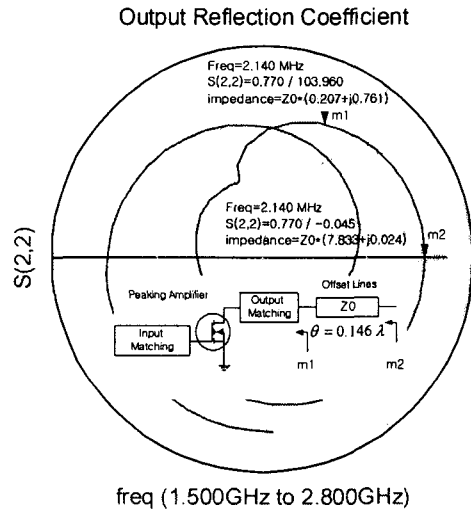


그림 7. 피킹증폭기의 출력 임피던스
Fig. 7 Output reflection coefficient of peaking amplifier

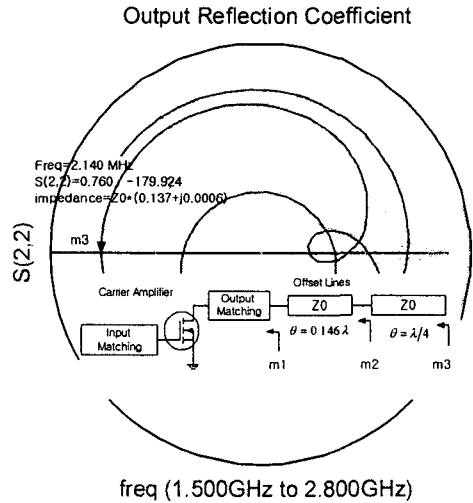


그림 8. 캐리어증폭기의 출력 임피던스
Fig. 8 Output reflection coefficient of carrier amplifier

그림 6은 설계된 도허티증폭기의 회로도를 나타내었으며, 피킹증폭기의 입력단의 3 dB 커플러 (Coupler)는 캐리어증폭기와의 위상차를 보상해 주기 위한 것이고, 최종 출력단의 35.35 Ω 선로는 임피던스 50 Ω 을 25 Ω 으로 변환시키기 위한 것이다.

도허티증폭기의 오프셋 선로의 길이 결정 방법을 사용하여 그 길이를 결정하고 그 과정에 해당하

는 각각의 출력 임피던스를 시뮬레이션하여 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 그림 7과 그림 8은 오프셋 선로의 각 지점에서 계산된 출력 임피던스를 나타내었다. m_1 은 출력 임피던스 매칭점의 임피던스이고 m_2 는 θ 가 0.146λ 일 때의 출력 임피던스이다. 출력 임피던스 m_2 는 리액턴스 성분이 거의 없고 저항 성분만을 갖는다. 따라서 0.146λ 의 길이에 해당하는 오프셋 선로를 추가하였을 때 출력 임피던스 m_2 는 약 391 Ω 으로 거의 저항 성분만을 가지게 되었다. 뿐만 아니라 캐리어증폭기에 피킹증폭기에서와 같은 오프셋 선로를 추가하면 부하 임피던스 변조를 위한 $\lambda/4$ 길이의 50 Ω 선로와 더해져서 캐리어증폭기의 출력 임피던스 m_3 는 그림 8과 같이 피킹증폭기의 출력 임피던스 m_2 와 정확히 반대되는 지점에 위치한다.

IV. 측정 결과

제작된 도허티증폭기의 성능을 측정하여 AB급 평형증폭기(Balanced amplifier)와 성능을 비교하였다. IMD3가 -35 dBc 이하일 때의 최대 효율을 가지는 바이어스 점(Bias point)를 찾고 이를 AB급 평형증폭기의 경우와 효율성을 비교하였다. 그림 9과 그림 10은 출력 전력 레벨에 따른 AB급 평형증폭기($V_{gs}=3.82$ V)와 도허티증폭기($V_{gs,c}=3.82$ V, $V_{gs,p}=1.52$ V)의 전력 부가 효율(Power Added Efficiency; PAE) 변화 곡선을 시뮬레이션과 측정된 값으로 각각 나타내었다. 그림 11은 AB급 평형증폭기와 도허티증폭기의 IMD3 성분을 출력 전력 레벨에 따라 나타내었다. 도허티증폭기가 AB급 평형증폭기에 비해 출력이 60 Watt에서 13.3%의 효율 개선을 보이고 있으며 낮은 출력 전력 레벨에서도 약 두 배 정도의 효율 개선을 보이고 있다. -37 dBc의 IMD3를 가지는 게이트 전압(Gate voltage) 범위 중에서 1.52 V 이하의 게이트

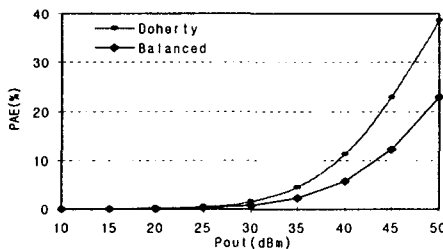


그림 9. 시뮬레이션된 평형증폭기와 도허티증폭기의 효율 특성

Fig. 9 Comparison the efficiency of Doherty amplifier with that of Balanced amplifier (Simulation)

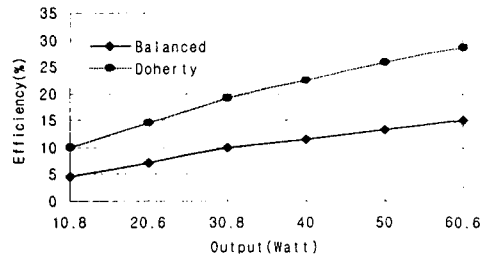


그림 10. 측정된 평형증폭기와 도허티증폭기의 효율 특성

Fig. 10 Comparison the efficiency of Doherty amplifier with that of Balanced amplifier (Measurement result)

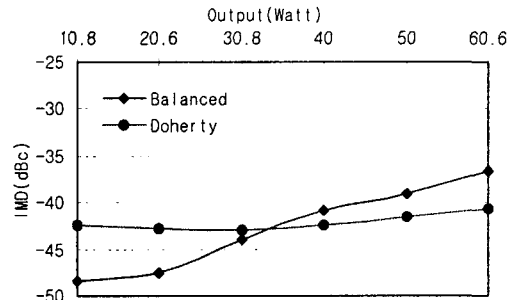


그림 11. 측정된 평형증폭기와 도허티증폭기의 IMD3 특성

Fig. 11 Comparison the IMD3 of Doherty amplifier with that of Balanced amplifier (Measurement result)

전압을 인가할 때 가장 큰 효율 개선을 보였다. 이로써 피킹증폭기의 게이트 바이어스가 1.52 V 이하에서 최고의 효율 개선을 얻을 수 있으며, 또한 제작된 도허티증폭기가 피드포워드 시스템(Feedforward system)과 함께 구현될 때 현재의 선형성 기준을 만족하면서 보다 높은 효율을 가질 수 있는 가능성을 보이고 있다.

V. 결론

차세대 무선 이동 통신 WCDMA 시스템 및 무선 네트워크 환경에서 사용되는 전력증폭기의 효율을 개선하기 위해 본 논문에서는 여러 가지 효율 개선 방법 중에서 도허티증폭기에 관하여 논의하였다.

제작된 도허티증폭기의 성능을 살펴보면 피킹증

폭기의 $V_{gs,p}=1.52$ V 일 때 효율이 평형증폭기에 비해 최대 13.3 % 이상 개선되었으며, 게이트 바이어스 조절을 통하여 선형성 개선의 최적 바이어스 점을 찾은 후 도허티증폭기에서는 4 dB 이상의 IMD3가 개선됨을 알 수 있었다.

앞으로 도허티 전력증폭기의 비선형성에 적합한 선형화기가 개발되어 적용 된다면 고효율의 높은 선형성을 갖는 도허티 전력증폭기가 실제 적용 될 수 있으리라고 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] P. Kenington, High-Linearity RF Amplifier Design, Artech House, 2000.
- [2] Steve C. Cripps, RF Power Amplifiers for Wireless Communications, Artech House, pp. 225-235, 1999.
- [3] Steve C. Cripps, Advanced Techniques in RF Power Design, Artech House, 2002.
- [4] N. Potheary, Feedforward Linear Power Amplifier, Artech House, 1999.
- [5] Joong Sung JEON, Dongil KIM, "A Study on Linearization of Intermodulation Distortion for WCDMA", International Journal of Navigation and Port Research, Vol. 28, No. 2, pp. 149-154, 2004.
- [6] Raab, F. H., Asbeck, P., Cripps, S., Kenington, P. B., Popovic, Z. B., Potheary, N., Sevic, J. F., and Sokal, N. O., "Power amplifiers and transmitters for RF and Mi

crowave," IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol. 50, No. 3 pp. 814-826, 2002.

- [7] C.P. Campbell, "A Fully Integrated Ku-band Doherty Amplifier MMIC," IEEE Microwave and Guided Wave Letters, Vol. 9, No. 3, 1999.
- [8] Y. Yang, J. Yi, Y.Y. Woo and B. Kim, "Experimental Investigation on Efficiency and Linearity of a Microwave Doherty Amplifier," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, May, pp. 1367-1370, 2001.

저자소개

전중성(Joong Sung Jeom)



2000년 8월 한국해양대학교 전자통신공학과(공학박사)

2000년 8월 한국해양대학교 부설 산업기술연구소 전임연구원

※ 관심분야 : 마이크로파 회로해석 및 설계, 통신시스템, 전자파 수치해석

최동묵(Dong Muk Choi)



2003년 8월 경북대학교 전자공학과(공학박사)

2004년 3월 한국해양대학교 부설 산업기술연구소 전임연구원

※ 관심분야 : 전자파 수치해석