
IMT-2000 기지국용 도허티 전력증폭기의 설계 및 선형성과 효율 분석

김선근* · 김기문**

Design, Linear and Efficient Analysis of Doherty Power Amplifier for IMT-2000 Base Station

Seon-Keun Kim* · Ki-Moon Kim**

요 약

본 논문에서는 여러 가지 효율 개선 방법 중에서 Doherty Amplifier에 관해 논하였다. 간단한 회로를 이용하여 하나의 PEP 180W급 LDMOS를 사용하여 효율성과 선형성 개선에 관한 성능분석을 하였다. 제작된 Doherty Amp의 성능을 검증하기 위해 Balanced Class AB Amplifier와 성능을 비교하였다. 실험결과 peaking Amp의 $V_{gs,P}$ 가 1.53V일 때 효율이 최대 11.6% 이상 증가 되었으며 매뉴얼로 gate bias 조절을 통하여 선형성 개선의 최적 bias point를 찾은 후 WCDMA 4FA에서는 $V_{gs,P}$ 가 3.68V일 때 IMSR (InterModulation to Signal Ratio)이 최대 3.34dB가 증가됨을 보였다. 특히 1.53V로 peaking amp의 bias point를 맞추게 되면 출력 전력 43dBm에서 -32dBc 이하의 IMSR과 탁월한 효율 증가를 얻을 수 있었다.

ABSTRACT

During several method of improvement efficient, We analyzed Doherty Amplifier. That used by simple circuit and 180W PEP LDMOS to analyze improvement of efficient and linearity. We for testing performance of Doherty Amplifier compared with Balanced Class AB, the experimental results show when Peaking Amp $V_{gs,P}=1.53V$, the efficiency is increased at Maximum 11.6%. After finding optimum bias point of linearity improvement by manual tuning gate bias, when WCDMA 4FA $V_{gs,P}=3.68V$ IMSR could be increased maximum 3.34dB. especially, when we match bias point of Peaking amp at 1.53V, we could get a excellent efficiency increase and have IMSR under -32dBc at output power 43dBm.

키워드

Doherty, Efficient, linearity

* (주)KTF Network 본부

접수일자 2004. 1. 12

** 한국해양대학교 전자통신공학과

I. 서론

이동통신 시스템에서 통화품질을 개선하려면 기지국 송신기에 사용되는 전력증폭기의 출력을 크게 함과 동시에 선형성과 효율을 높여야 한다. 한편 전력증폭기에 발생하는 혼변조신호들은 시스템에 악영향을 끼쳐, 궁극적으로 시스템 성능을 저하시키게 된다. 전력증폭기의 출력전력이 정해진 상태에서는 전력증폭기의 선형성과 효율 사이에는 절충(trade-off)이 필요하며, 이는 어떠한 선형화방법을 사용하느냐에 따라 다르게 결정할 수 있다. 전력증폭기의 선형성을 증가시키는 방법에는 크게 Feedforward 방법과 Predistortion 방법이 주로 사용되고 있다. [1]-[4]

선형성이 기지국용 전력증폭기의 성능을 좌우하게 되어 주 증폭기를 class A 또는 AB로 동작시키게 된다. 이는 효율이 떨어지는 원인이 되어 증폭기의 효율성을 개선하기 위해 EER (Envelope Elimination and Restoration), Chireix's Outphasing Doherty 등 여러 기법이 사용되고 있다. 그 중 Doherty 증폭기는 회로가 간단하여 구현이 쉽다는 장점이 있으며 효율성뿐만 아니라 선형성도 개선될 수 있음이 제시되고 있다.

Feedforward Amplifier의 주 증폭기나 오차 증폭기로서 사용하기 위해서는 증폭기의 선형성과 효율성 그리고 PEP가 중요한 factor가 될 수 있다. 본 논문에서는 이러한 Doherty Amplifier가 효율성, 선형성과 동시에 PEP(Peak Envelope Power)가 개선될 수 있음을 소개한다.

II. 도허티증폭기의 동작원리

도허티증폭기의 기본적인 구성은 그림 1과 같다. 도허티증폭기를 간단하게 등가회로하면 그림 2와 같이 Amp. A(carrier 증폭기)와 Amp. B(peaking 증폭기)를 각각 전류원으로 하여 나타낼 수 있다.[5]

그림 2에서 각각 전류원에서 나오는 전류는 V_{IT} 에서 같은 위상을 갖기 위해 $\lambda/4$ 선로에 의해 미리 보상된 90° 위상차를 가진다.

$$I_A = I_A \cos(\omega_0 t) = I_A \angle 0^\circ$$

$$I_B = I_B \cos(\omega_0 t - 90^\circ) = I_B \angle -90^\circ$$

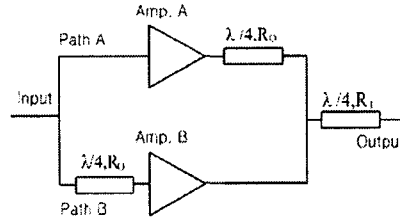


그림 1. 도허티증폭기의 블록도
Fig. 1 Block diagram of doherity amplifier

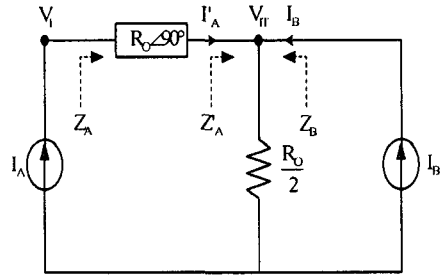


그림 2. 도허티증폭기의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of doherity amplifier

같은 위상차의 보상에 의해 V_{IT} 와 이에 따른 Amp. A와 Amp. B의 부하 임피던스는 다음 식과 같이 정리된다.

$$V_{IT} = \frac{R_O}{2} (I_A + I_B)$$

$$Z'_A = \frac{V_{IT}}{I'_A} = \frac{R_O}{2} \left(\frac{I_A + I_B}{I_A} \right)$$

$$Z_A = \frac{R_O^2}{Z'_A} = \frac{2R_O I_A}{I_A + I_B} \quad (0 \leq I_B \leq I_A) \dots\dots\dots (1)$$

결국 식(1)처럼 Amp. A의 부하 임피던스 Z_A 는 Amp. B에서 흐르는 전류에 의해 $2R_O$ 에서 R_O 로 변조하게 된다.[6][7][8]

located COA가 할당되어진다. 이동 호스트는 HA 영역 내에서 위치한 동안에는 동일한 COA를 유지한다. 그러므로 HA(Home Agent)는 이동 호스트가 새로운 도메인으로 이동하지 않는 한 관련될 필요가 없다. 위치 정보는 이동 호스트들에 의해 보내진 특정 제어 메시지에 의해 수정되어진다.

III. 도허티 증폭기의 효율

2-way의 도허티증폭기의 효율을 계산하기 전에 Amp. A는 class B 증폭기이고 Amp. B는 출력전압 V_0 가 $V_{max}/2$ 일때 동작을 한다고 가정하자. 이때 Amp. A와 Amp. B에 흐르는 전류 I_A, I_B 각각 증폭기의 출력전력 P_A, P_B 와 도허티증폭기의 출력전력 P_0 를 출력전압 V_0 에 따라 구해보면 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$I_A = \frac{V_0}{2R_0} \quad (0 < V_0 < V_{max})$$

$$I_B = \begin{cases} 0 & (0 < V_0 < \frac{V_{max}}{2}) \\ \frac{2V_0 - V_{max}}{2R_0} & (\frac{V_{max}}{2} < V_0 < V_{max}) \end{cases}$$

$$I_{DC} = \begin{cases} \frac{V_0}{2\pi R_0} & (0 < V_0 < \frac{V_{max}}{2}) \\ \frac{6V_0 - V_{max}}{2\pi R_0} & (\frac{V_{max}}{2} < V_0 < V_{max}) \end{cases}$$

$$P_A = \begin{cases} \frac{V_0^2}{2R_0} & (0 < V_0 < \frac{V_{max}}{2}) \quad \dots\dots(2) \\ \frac{V_{max}V_0}{4R_0} & (\frac{V_{max}}{2} < V_0 < V_{max}) \end{cases}$$

$$P_B = \begin{cases} 0 & (0 < V_0 < \frac{V_{max}}{2}) \quad \dots\dots(3) \\ \frac{V_{max}}{2R_0} (\frac{V_0^2}{V_{max}} - \frac{V_0}{2}) & (\frac{V_{max}}{2} < V_0 < V_{max}) \end{cases}$$

$$P_0 = \frac{V_0^2}{2R_0} \quad (0 < V_0 < V_{max}) \quad \dots\dots(4)$$

$$\eta_{tot} = \begin{cases} \frac{\pi V_0}{2V_{max}} & (0 < V_0 < \frac{V_{max}}{2}) \\ \frac{\pi}{2} \left(\frac{V_0}{V_{max}} \right)^2 - 1 & (\frac{V_{max}}{2} < V_0 < V_{max}) \quad \dots\dots(5) \end{cases}$$

식(5)는 도허티증폭기의 효율을 계산한 것인데 class B증폭기와 비교하여 그래프로 나타내면 그림 3을 얻을 수 있다. 그림 3을 보면 효율은 6dB back-off 지점까지 선형적으로 증가하는데 부하 임피던스의 변조에 의해 최대 효율인 78.5%를 얻을 수 있다. 출력이 증가함에 따라 70%까지 효율은 떨어지지만 포화 영역 근처에서 class B증폭기의 효율 78.5%를 얻을 수 있다. 그림 4는 각각

Amp. A와 Amp. B의 출력전력 P_A, P_B 와 도허티 증폭기의 출력전력 P_0 을 도시한 것이다. 식(4)와 그림 4를 보면 도허티증폭기의 출력전력은 class B 증폭기의 최종 출력전력과 같은 값이며 출력전력의 손실은 없음을 알 수 있다. 결국 도허티증폭기는 부가적인 회로 없이 넓은 범위에서 출력전력의 손실없이 큰 효율을 얻을 수 있는 것이다.

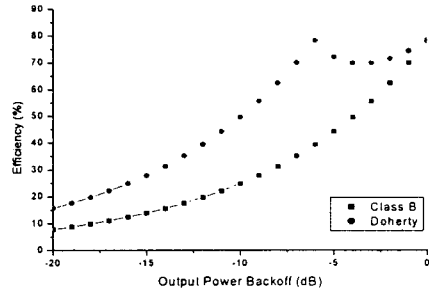


그림 3. 이론적인 도허티증폭기의 효율(Class B)
Fig. 3 Theoretical efficiency of doherty amplifier

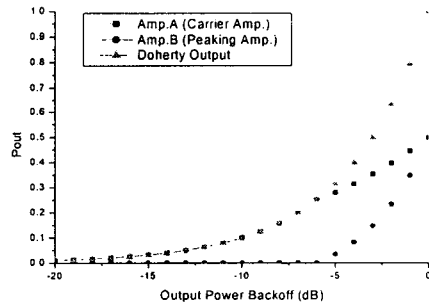


그림 4. OPBO(Output Power Back-off)에 따른 출력
Fig. 4 Output powers according to OPBO

IV. 도허티 증폭기의 설계 및 제작

이상적인 도허티증폭기는 Amp. A (carrier 증폭기)가 class B증폭기이며 Amp. B(peaking 증폭기)는 class C증폭기를 가진다. 그렇지만 제작 시 사용된 Transistor는 Motorola 사의 180W PEP LDMOSFET인 MRF5P21180로 class AB증폭기이다. 따라서 Amp. B의 gate bias를 낮추면서 Amp. A는 class AB증폭기, Amp. B는 class B증폭기에 가깝도록 하여 이상적인 도허티증폭기에 근접하고자 하였다. 도허티증폭기는 중심주파수 2.14GHz로

제작되었으며 각각의 Amp. A와 Amp B는 PEP (Peak Envelope Power) 48dBm을 가지며 이득평탄도는 0.3dB 이내가 되도록 하였다.

제작된 도허티 증폭기는 그림 5와 같다. 설계시 중요한 점은 부하 임피던스 변조가 Amp. A의 출력단 $\lambda/4$ 선로를 통해 이루어지도록 하여 효율을 개선시키고 출력 저하를 최소화 하는 것이다. 또한 Amp. A 최종 출력단에 50Ω에서 25Ω으로 변환시키기 위하여 적절한 $\lambda/4$ Transformer $R_T(35\Omega, \lambda/4)$ 를 사용하였으며 제작 시 사용된 기판은 RF35 ($r=3.5, h=0.76$ mm) 이다.

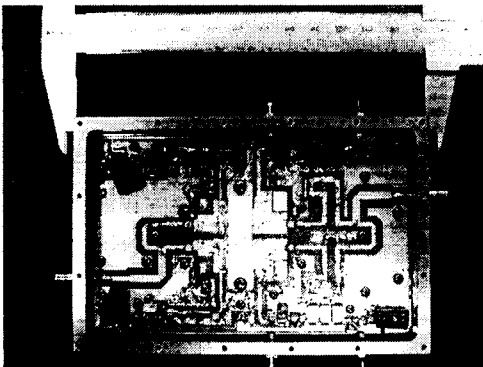


그림 5. 실제 제작된 Doherty Amplifier Module
Fig. 5 Constructed Doherty amplifier module

V. 제작된 Doherty Amplifier(4-carrier WCDMA 입력)의 성능 시험 결과

그림 5와 같이 제작된 Doherty Amp 회로에서 carrier Amp와 Peaking Amp들의 bias point를 같게 하면 모든 Amp들이 부하임피던스를 50Ω으로 보기 때문에 Class AB 증폭기의 동작을 하게 된다. Class AB 동작을 시킨 후, 출력 전력 레벨을 고정시키고 Peaking Amp의 gate voltage를 낮춰가면서 선형성이 가장 많이 개선되는 점을 찾으면 선형성이 최적화된 Doherty Amp의 bias point를 얻을 수 있으며, 그런 다음에 출력전력을 sweep하면서 두 증폭기의 선형성을 비교하였다. 그림 6부터 9에는 WCDMA 4FA 신호로 테스트하였을 때 -12.5 MHz, 12.5 MHz, -17.5 MHz 그리고 17.5 MHz offset에서 각 IMSR을 그래프로 나타내었다.

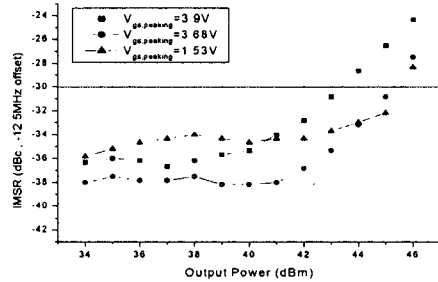


그림 6. WCDMA 4FA에서의 IMSR (-12.5MHz offset)
Fig. 6 IMSR of WCDMA 4FA

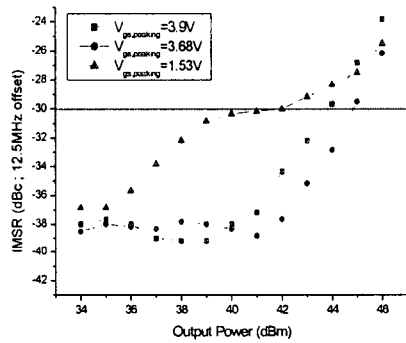


그림 7. WCDMA 4FA에서의 IMSR (12.5MHz offset)
Fig. 7 IMSR of WCDMA 4FA

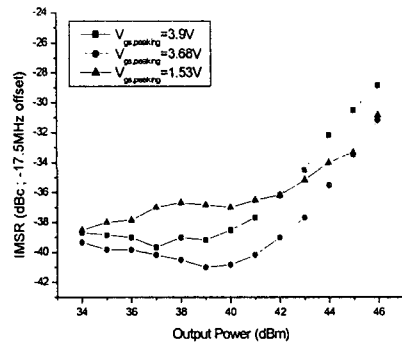


그림 8. WCDMA 4FA에서의 IMSR (-17.5MHz offset)
Fig. 8 IMSR of WCDMA 4FA

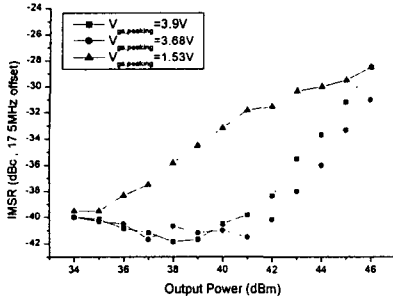


그림 9. WCDMA 4FA에서의 IMSR
(17.5MHz offset)
Fig. 9 IMSR of WCDMA 4FA

실험에서 Class AB는 $V_{gs,C}=3.9V$, $V_{gs,P}=3.9V$ 에 고정하였으며 Doherty Amp는 peaking amp의 gate voltage를 다르게 인가하였으며 출력 전력 레벨에 대한 IMSR 특성 곡선을 offset에 해당하는 $V_{gs,peaking}$ 가 3.9V, 3.68V, 1.53V일 때를 그림 9에서 나타내었다. 즉 3.9V에서 3.68V로 peaking amp의 gate bias를 낮추면 선형성이 크게 증가 되다가 다시 bias를 낮추면 peaking amp의 비선형성이 크게 작용하게 된다.

그림 6과 그림 7은 WCDMA의 4개의 channel중 가장 인접한 IMD 성분을 가지는 -12.5 MHz와 12.5 MHz offset에서 IMSR을 보여주고 있다. peaking amp의 bias를 조절해서 선형성을 최적화 시킨 bias point($V_{gs,P}=3.68V$)를 찾고 이때의 IMSR은 그림6과 그림 7에서와 같이 Class AB 모드에 비해 -12.5MHz offset에서 최고 4dB($P_{out}=42dBm$)가 증가되고 12.5MHz offset에서는 최고 3.34dB($P_{out}=42dBm$)가 증가되었다.

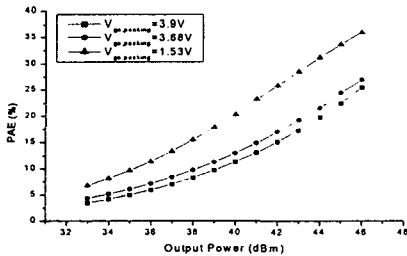


그림 10. WCDMA 4FA에서의 PAE
Fig. 10 PAE of WCDMA 4FA

그림 10에서는 WCDMA 4FA신호로 실험했을

경우 각 bias point에서 출력 전력에 해당하는 효율을 나타내고 있다. peaking amp의 gate bias를 $V_{gs,P}=1.53V$ 로 하였을 때 최고 11.6%의 효율 증가 효과를 보여주었으며 선형성을 최적화 시킨 peaking amp의 gate bias인 $V_{gs,P}=3.68V$ 로 인가했을 경우에 최대 2%의 효율 증가를 가져왔다.

VI. 결 론

본 논문에서 제작된 Doherty Amp의 성능을 살펴보면 peaking amp의 $V_{gs,P}$ 가 1.53V일 때 효율이 최대 11.6% 이상 증가 되었으며 매뉴얼로 gate bias 조절을 통하여 선형성 개선의 최적 bias point를 찾은 후 4FA에서는 $V_{gs,P}$ 가 3.68V일 때 IMSR이 최대 3.34dB가 증가됨을 보였다. 하지만 본 논문의 의도는 향후 적용하게 될 feedforward 방식의 선형화기에 Doherty Amp를 적용하기 위한 성능을 분석하는데 있었다. 특히 약 1.53V로 peaking amp의 bias point를 맞추게 되면 출력 전력 43dBm에서 -32dBc 이하의 IMSR과 탁월한 효율 개선을 얻을 수 있었다. 향후 과제로는 Memory Effect에 의한 영향을 최소화 하는 회로를 구현하고 이를 Feedforward 혹은 Predistortion와 같은 선형화기의 Main Amp로서 적용하고 Micro Controller를 이용한 적응 제어 시스템을 구축하는 것이다. 한편, 서론에서 거론된 EER, Chireix's Outphasing 등의 여러 다른 기법과 함께 본 논문의 결과 및 구현과정의 비교를 통해 실제 상용화를 위한 문제점을 지적하고, 그에 따른 개선 방향을 도출하고자 한다.

참고문헌

- [1] N. Pothecary, Feedforward Linear Power Amplifiers. Norwood MA : Artech House, 1999.
- [2] P.B. Kenington, High-Linearity RF Amplifier Design. Norwood, MA : Artech House, 2000.
- [3] S.C. Cripps, RF Power Amplifiers for Wireless communications. Norwood, MA : Artech House, 1999.
- [4] Steve C.Cripps, Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design, Norwood, MA : Artech House, 1999.

- [5] P.B. Kenington, "High Linearity RF Amplifier Design", Artech House Inc., Norwood, MA, 2000.
- [6] S. M. Wood, R. S. Pengelly, and M. Suto, "A High Power High Efficiency UMTS Amplifier using a Novel Doherty Configuration," RAWCON'03 proceedings, pp. 329-332, Aug. 10-13, 2003.
- [7] N. Srirattana, A. Raghavan, D. Heo, P. E. Allen, and J. Laskar, "A High-Efficiency Multistage Doherty Power Amplifier for WCDMA," RAWCON'03 proceedings, pp. 397-400, Aug. 10-13, 2003.
- [8] F. H. Raab, P. Asbeck, S. Cripps, P. B. Kenington, Z. B. Popovic, N. Pothecary, J. F. Sevic, N. O. Sokal, "Power amplifiers and transmitters for RF and microwave," IEEE Microwave Theory Tech., vol. 50, Issue 3, pp. 814-826, March 2002.

저자소개

김선근(Seon-Keun Kim)



1999년: 한국해양대학교 전자통신공학과(공학석사)
 2005년: 한국해양대학교 전자통신공학(공학박사)
 2004년 현재, KTF 네트워크 구축 담당

2004년 현재, KTF 네트워크 구축 담당
 ※관심분야 : W-CDMA, 해상통신

김기문(Ki-Moon Kim)

1972년: 광운대학교 전파통신공학과(공학사)
 1978년: 건국대학교 통신행정학 석사
 1983년~ 현재, 한국해양대학교 전파·정보통신공학부 교수
 1994년: 경남대학교 전파통신행정학 박사
 ※관심분야 : 정보공학, 통신행정, 전파행정