

출력전력 백-오프 구간을 확장시킨 고효율 고출력 불균형 도허티 전력증폭기

High Power and High Efficiency Unbalanced Doherty Amplifier used to Extend the Output Power Back-off

장 동 희*
(Dong-Hee Jang)

김 지 연**
(Ji-Yeon Kim)

김 종 현***
(Jong-Heon Kim)

요 약

본 논문에서 출력 전력 백-오프 구간을 확장하기 위한 고효율 고출력 불균형 도허티 전력 증폭기를 제안하였다. 제안된 불균형 전력증폭기는 기존의 대칭형 도허티 전력증폭기처럼 주 증폭기와 보조 증폭기에 같은 트랜지스터를 사용하는 구조이며 주 증폭기의 출력에 연결되어 있는 $\lambda/4$ 변환기의 임피던스를 변형하여서 구간을 확장할 수 있다. 제안된 불균형 도허티 전력증폭기는 기존의 백-오프 구간을 확장하기 위한 비대칭 도허티 전력증폭기와 비교해서 구조가 더 간단함에도 불구하고 유사한 효율과 선형성 특성을 갖는다. 제안된 증폭기의 성능을 증명하기 위해서 CDMA2000 1FA 신호를 입력으로 사용하여 46 W 도허티 전력증폭기를 설계 및 제작하였다. 제작된 불균형 도허티 전력증폭기에서 35 %의 효율과 885 kHz 오프셋 주파수에서 ACPR -34 dBc 그리고 1.98 MHz 오프셋 주파수에서 ACPR -35.6 dBc를 얻었다.

Abstract

This paper presents a high power and high efficiency unbalanced Doherty power amplifier used to extend the output power back-off (OPBO). The proposed unbalanced amplifier uses the same type of transistors in both the main amplifier and the peaking amplifier, similar to a conventional symmetric Doherty amplifier. The unbalanced amplifier can have the impedance of a $\lambda/4$ transformer located at the output of the main amplifier modified. This enables the OPBO to exceed 6 dB, the maximum OPBO for a conventional symmetric Doherty amplifier. The efficiency and linearity performance of the unbalanced Doherty amplifier are almost same as those found for the asymmetric Doherty amplifier, even though the unbalanced Doherty amplifier structure is simpler than the asymmetric Doherty structure. In order to verify the proposed amplifier performance, a 46 W Doherty amplifier has been both simulated and measured using a CDMA2000 1FA signal. From the measured results, the proposed unbalanced Doherty amplifier achieved an added power efficiency of 38 % and an adjacent channel power ratio of -34 dBc at a 885 kHz offset frequency and -35.6 dBc at a 1.98 MHz offset frequency.

† 이 논문은 2011년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

* 주저자 : (주) 피플웍스 책임연구원

** 공저자 : 광운대학교 전파공학과 조빙교수

*** 공저자 및 교신저자 : 광운대학교 전파공학과 교수

† 논문접수일 : 2011년 8월 25일

† 논문심사일 : 2011년 10월 4일

† 게재확정일 : 2011년 10월 7일

I. 서 론

현대 디지털 무선통신 시스템은 빠른 속도의 데이터 전송을 위해서 높은 PAR (Peak to Average Ratio)의 신호를 사용한다. 이러한 높은 PAR을 갖는 신호를 선형적으로 증폭시키기 위해서는 전력증폭기의 높은 백-오프 출력이 요구되므로 효율이 낮아져서 전력손실을 발생시킨다. 따라서 높은 출력 백-오프 지점에서 전력증폭기의 효율을 개선하기 위해서 도허티 구조를 많이 사용하고 있다.

도허티 기술은 구조가 상대적으로 간단하고 다른 고효율 기술들 (EER, LINC, Dynamic bias control)에 비해 넓은 대역폭을 갖는 장점이 있다[1]. 일반적인 대칭 도허티 전력 증폭기는 6 dB 백-오프 출력까지 최대 효율을 유지하는데 백-오프 출력을 6 dB 이상으로 확장하기 위해서 N-way 도허티 전력증폭기와 비대칭 도허티 전력증폭기가 연구되었다.

N-way 도허티 증폭기는 주 증폭기에 셋 이상의 소자를 사용하여 전체 출력을 증가시켜 백-오프 구간을 확장시키는 기술이다[2,3]. 따라서 사용되는 소자의 수가 증가하여 이에 따른 가격 상승과 전체 회로의 사이즈 증가라는 단점을 갖고 있다. 또한 입력에 사용되는 N-way 분배기의 구현이 용이하지 않다.

비대칭 도허티 전력증폭기는 주 증폭기 보다 더 큰 출력 용량의 소자를 보조 증폭기에 사용하면서 전체 출력을 증가시켜서 최대 효율 백-오프 전력지점을 다양하게 조절하는 방식이다[4]. 이때 보조 증폭기와 주 증폭기에 사용되는 소자가 서로 다르기 때문에 두 증폭기의 출력 결합지점에서 두 출력 신호 간의 위상과 이득의 차이가 발생하게 되며 이를 개선하기 위해서 부가적 회로를 사용하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 불균형 도허티 구조를 사용한 고출력 전력증폭기를 제안하였다[5].

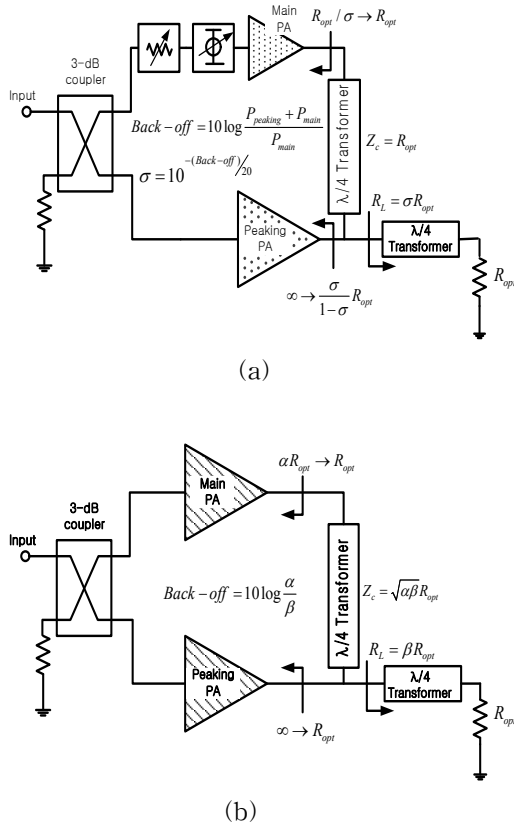
불균형 도허티 전력증폭기는 주 증폭기와 보조 증폭기에 동일한 출력 용량의 소자를 각각 하나씩 사용하고 주 증폭기의 $\lambda/4$ 출력 변환회로의 임피던스를 변화시켜서 포화출력을 조절함으로써 최대

효율을 갖는 백-오프 구간을 확장하는 구조이다. 불균형 도허티 전력증폭기는 주 증폭기와 보조 증폭기에 동일한 소자를 사용하기 때문에 추가적인 회로없이 효율 특성을 얻을 수 있어서 유사한 성능을 갖는 기존의 비대칭 도허티 증폭기에 비해서 설계와 제작이 쉽고 사용되는 소자의 새로운 선택 없이 최대효율 구간 확장을 위한 백-오프 출력을 늘릴 수 있다는 장점을 갖는다. 본 논문에서는 1.8 GHz 대역 120 W LDMOS소자를 사용하여 평균전력 46 W 불균형 도허티 전력증폭기를 설계하고 제작하였다.

II. 동작원리 및 이론

도허티 기술에서 기존의 최대 효율을 갖는 출력 백-오프 구간 확장 방식은 주 증폭기와 피킹 증폭기에 서로 다른 출력용량을 갖게 하는 비대칭 방식이다. 하지만 불균형 도허티는 대칭 도허티 전력증폭기와 같이 동일한 출력용량의 소자를 사용하면서 최대 효율을 갖는 출력 백-오프 구간을 확장하는 방식이다.

<그림 1>은 기존의 비대칭 도허티 전력증폭기와 제안한 불균형 도허티 전력증폭기의 구조를 보여준다. 비대칭 도허티 전력증폭기는 주 증폭기와 보조 증폭기의 소자 차이로 인한 이득과 위상조절이 요구되기 때문에 위상변환기와 이득조절기와 같은 보조 회로가 필요하다. 비대칭 도허티 전력증폭기는 주 증폭기의 임피던스 변환기 Z_c 의 값을 R_{opt} 로 갖도록 하고 두 소자의 출력 용량에 따른 출력 백-오프에 따라서 주 증폭기와 보조 증폭기의 출력 임피던스가 변하게 된다. 불균형 도허티 전력증폭기는 주 증폭기와 보조 증폭기에 같은 출력 용량의 소자를 사용하고 주 증폭기의 출력 임피던스를 $2R_{opt}$ 보다 크도록 조절하여 주 증폭기의 출력 백-오프를 6 dB보다 크게 늘린다. 따라서 전체 출력전력의 변화 없이 백-오프 구간만을 확장할 수 있다. 이때 실제 주 증폭기 출력 임피던스의 변화를 위해서 $\lambda/4$ 변환기의 임피던스 Z_c 의 값을 조절한다.



〈그림 1〉 출력 전력 백오프 구간의 확장을 위한 도허티 전력 증폭기의 구조: (a) 기존의 비대칭 전력 증폭기(2), (b) 제안된 불균형 도허티 전력 증폭기

〈Fig. 1〉 Doherty power amplifier structures for extending the output power back-off: (a) a conventional asymmetric Doherty PA and (b) the proposed unbalanced Doherty PA

불균형 도허티 전력증폭기에서 최대출력전력 P_H 와 최대효율 백-오프 구간의 출력전력 P_L 은 식 (1), 식 (2)와 같다.

$$P_H = \frac{1}{8} \frac{V_d^2}{\beta R_{opt}} \quad (1)$$

$$P_L = \frac{1}{8} \frac{V_d^2}{\alpha R_{opt}} \quad (2)$$

여기서 α 는 백-오프를 확장하기 위한 주 증폭기의 임피던스 계수이고 β 는 도허티 전체 출력임피던스 계수이고 R_{opt} 는 사용된 소자의 출력단에 최적

화된 임피던스로 일반적으로 50옴을 나타낸다.

따라서 기존의 최대효율구간 확장을 위한 백-오프량 B 는 식 (3)와 같다.

$$B [dB] = 10 \log \frac{P_H}{P_L} = 10 \log \frac{\beta}{\alpha} \quad (3)$$

원하는 백-오프 구간 B 를 얻기 위해서는 적합한 α 와 β 의 값을 얻어야 한다. 이때 $\lambda/4$ 변환기의 임피던스 Z_c 는 식 (4)와 같기 때문에 도허티 전체 출력임피던스 βR_{opt} 는 $\lambda/4$ 변환기의 임피던스 Z_c 와 보조 증폭기의 임피던스 R_{opt} 의 병렬연결 값과 같아야 하므로 식 (5)와 같이 나타난다.

$$Z_c = \sqrt{\alpha R_{opt} \cdot \beta R_{opt}} = \sqrt{\alpha\beta} R_{opt} \quad (4)$$

$$\frac{\sqrt{\alpha\beta}}{\sqrt{\alpha\beta+1}} = \beta \quad (5)$$

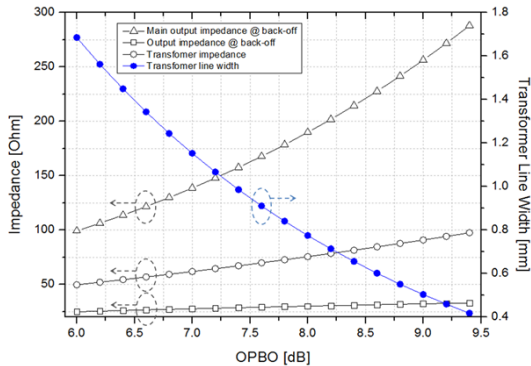
이때 식 (3)과 식 (5)를 계산하여 α 와 β 를 요구되는 백-오프량 B 로서 정의하면 식(6)과 같아진다.

$$\begin{aligned} \alpha &= b - \sqrt{b} \\ \beta &= \frac{b - \sqrt{b}}{b} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 b 는 백-오프량 B 의 크기로 $10^{B/10}$ 을 의미한다.

<그림 2>에 백-오프량에 따른 임피던스의 변화와 임피던스 변환기의 전송선로 두께의 변화를 보여준다. 백-오프량이 증가함에 따라서 주 증폭기의 출력 임피던스 αR_{opt} 와 전체 출력임피던스 βR_{opt} 가 점점 증가하는 것을 알 수 있다. αR_{opt} 와 βR_{opt} 가 점점 증가하기 때문에 Z_c 도 같이 증가하게 된다. 그림에서 보면 기존의 일반적인 대칭형 도허티 전력증폭기는 백-오프 값이 6 dB이기 때문에 αR_{opt} 는 100 ohm 이 되고 βR_{opt} 는 25 ohm이 되어서 $\lambda/4$ 변환기의 임피던스는 R_{opt} 즉 50 ohm이 된다. 본 논문에서는 CDMA2000 신호에서 요구되는 백-오프 값인 7.24 dB를 선택하면 αR_{opt} 는 150 ohm이 되고 βR_{opt} 는 28.3 ohm 이 되어서 $\lambda/4$ 변환기의 임피던스는 $1.303R_{opt}$ 즉 65 ohm이 된다. $\lambda/4$ 변환기의 두께는 유전율이 3.52인 기판을 사용할 경우의 변화를 보여준다.

불균형 도허티 전력증폭기의 백오프 출력이 9.4 dB가 될 경우 $\lambda/4$ 변환기의 임피던스 Z_c 는 98 ohm 이 되고 그 두께는 0.4 mm가 된다. 실제로 불균형 도허티의 제작 시에 Z_c 가 증가함에 따라서 마이크로 스트립 라인의 두께는 점점 감소하게 되어 출력 백-오프량을 무한히 늘릴 수는 없는 단점이 있다.



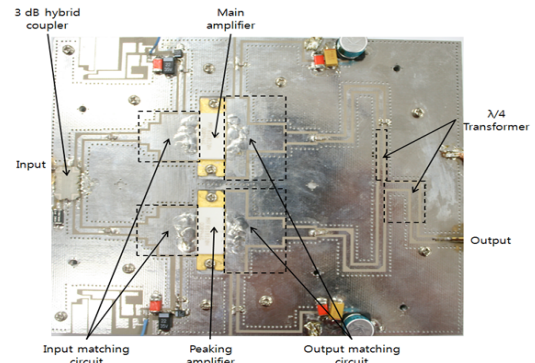
〈그림 2〉 백오프 출력에 따른 주증폭기 출력임피던스(αR_{opt})와 전체 출력 임피던스(βR_{opt}), $\lambda/4$ 변환기의 임피던스(Z_c) 및 전송선로 두께의 변화
 〈Fig. 2〉 Output impedance of the main amplifier, output impedance of the unbalanced Doherty amplifier, the $\lambda/4$ transformer impedance Z_c , and the transformer line width as a function of the OPBO (Output Power Back-Off)

III. 시뮬레이션 및 측정결과

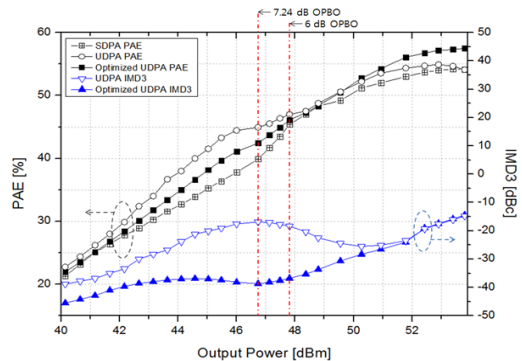
〈그림 3〉에 제작된 불균형 도허티 증폭기를 나타냈다. 기판은 유전율 3.52, 유전체 두께 0.762 mm인 RF35를 사용하였고 Freescale사의 120 W급 MRF8S18120을 주 증폭기와 보조 증폭기에 각각 사용하여 불균형 도허티 증폭기는 최대 출력 전력 240 W인 53.8 dBm을 갖는다. 불균형 도허티 증폭기는 대칭형 구조로 인해 주 증폭기와 보조 증폭기의 입출력 정합회로 구조가 동일하다. 입력단 부분에는 Anaren사의 90도 하이브리드 결합기인 XC1900A를 사용하였다.

〈그림 4〉에 2 톤 신호를 입력 신호로 사용하여 시뮬레이션 한 결과로 불균형 도허티 증폭기의 효율 및 선형성과 대칭형 6 dB 출력 백-오프 증폭기의 효율을 나타냈다. 선형성을 최적화하기 전에 불균형 도

허티 증폭기는 최대 출력으로부터 7.24 dB 출력 백-오프 지점에서 45 %의 효율을 갖는다. 이는 대칭형 도허티 전력증폭기보다 효율이 약 5.5 % 개선된 결과이다. 하지만 7.24 dB 출력 백-오프 지점에서 -17 dBc의 낮은 선형성을 갖는다. 따라서 불균형 전력증폭기의 선형성 개선을 위한 최적화가 요구된다. 선형성 개선을 위해서 보조 증폭기의 게이트 전압을 높여주고 주 증폭기 출력 정합회로에 커패시터를 추가 하였으며 선형성 최적화 후에 효율은 42.4 %, 3차 혼변조 성분은 -39 dBc를 얻었다. 이는 대칭형 도허티 전력증폭기보다 효율이 2.9 % 개선된 결과이다.

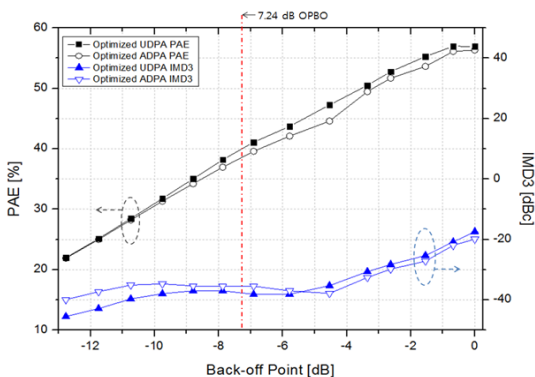


〈그림 3〉 제작된 불균형 도허티 증폭기의 사진
 〈Fig. 3〉 Photograph of the unbalanced Doherty amplifier



〈그림 4〉 1.25 MHz 대역폭을 갖는 2-톤 신호를 사용한 불균형 도허티 증폭기와 대칭형 도허티 증폭기 구조의 효율 및 선형성에 관한 시뮬레이션 결과
 〈Fig. 4〉 The simulated efficiency and linearity of the symmetric Doherty power amplifier (SDPA) and the unbalanced Doherty power amplifier (UDPA) for a two-tone signal with a bandwidth of 1.25 MHz

<그림 5>는 2-톤 신호를 입력 신호로 사용한 불균형 도허티 전력증폭기와 기존의 비대칭 전력증폭기의 효율 및 선형성의 측정결과를 비교한 결과이다 [4]. 그림에서 보여지는 것처럼 비대칭 전력증폭기가 7.24 dB 출력 백-오프 된 지점에서 38.6 %의 PAE와 -35.5 dBc의 IMD3을 갖고 불균형 도허티 증폭기는 7.24 dB 출력 백-오프 된 지점에서 39.9 %의 PAE와 -36.2 dBc의 IMD3을 갖는다. 결과적으로 두 개의 구조가 서로 유사한 성능을 갖는 것을 알 수 있다.

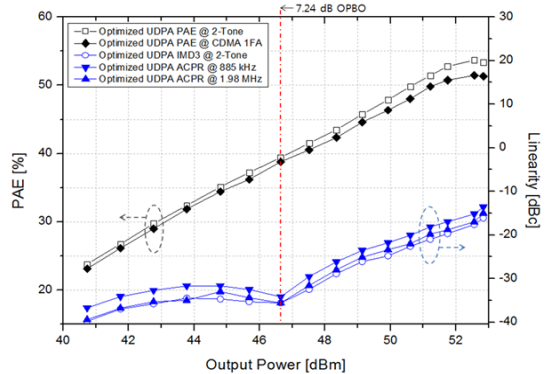


<그림 5> 1.25 MHz 2-톤 신호를 사용한 기존의 비대칭 도허티 전력증폭기와 불균형 전력 증폭기의 효율 및 선형성 측정 결과 비교

(Fig. 5) The measured efficiency and linearity of the conventional asymmetric Doherty amplifier and the unbalanced Doherty amplifier for a two-tone signal with a 1.25 MHz bandwidth

<그림 6>에 불균형 도허티 증폭기에서 2 톤 신호와 CDMA2000신호에 대한 효율 및 선형성의 측정결과를 나타냈다. 2톤 신호를 사용하였을 때 최대 출력 전력으로부터 7.24 dB 백-오프 지점에서 39.9 %의 전력부가효율과 -36.2 dBc의 3차 혼변조 특성을 보였다. 그리고 7 dB PAR을 갖는 CDMA2000 1x 1FA 신호를 사용하여 측정된 결과에서 최대 출력 전력으로부터 7.24 dB 백-오프 지점에서 효율(PAE)은 38 %를 얻었고 최대 출력 전력으로부터 7.24 dB 백-오프된 지점에서 885 kHz 오프셋에 대해 ACPR -34 dBc와 1.98 MHz 오프셋에 대해 ACPR -35.6 dBc를 얻었다.

측정결과를 바탕으로 본 논문에서 제시한 불균형 도허티 증폭기와 기존의 비대칭 증폭기들과 비



<그림 6> 2톤 및 CDMA 2000 1FA 입력신호를 사용한 불균형 도허티 전력증폭기의 효율 및 선형성 측정 결과
(Fig. 6) The measured efficiency and linearity of the unbalanced Doherty amplifier for a two-tone signal and a CDMA 2000 1FA signal

교하면 다음과 같다. 먼저 기존의 비대칭 도허티는 서로 출력용량이 다른 소자를 사용하기 때문에 주 증폭기와 보조증폭기의 입력신호의 비가 달라지게 된다. 따라서 1:1로 입력을 분배하지 않기 때문에 입력 분배기에 가변감쇄기가 필요하며 각 소자 간의 위상특성이 다르기 때문에 한쪽 경로에 위상변환기를 사용하여야 함으로 비효율적이다. N-way 도허티 증폭기의 경우에는 백오프량에 따라서 사용되는 소자의 개수가 증가하기 때문에 6 dB 이상의 백오프를 갖기 위해서는 사용해야할 소자의 수가 증가하게 된다. 3-way 도허티 증폭기의 경우, 주 증폭기에 1개의 소자와 보조 증폭기에 2개의 소자가 필요하기 때문에 증폭기 자체의 사이즈가 1/3 이상 증가하고 3개의 소자에 입력신호를 전달하기 위해서 사용되는 분배기는 격리도 때문에 2단 구조가 되어서 전체 증폭기의 크기가 2배로 증가한다.

그러나 본 논문에서 제시한 불균형 도허티 증폭기는 두 개의 동일 소자만으로 백오프 지점을 유연하게 조절할 수 있다. 따라서 성능적인 측면에서는 비대칭 도허티 증폭기와 유사하지만 구조적인 면에서 간단하기 때문에 최적화가 용이하고 사이즈적인 측면에서 장점을 갖는다.

V. 결 론

본 논문에서는 출력 백-오프 구간을 7.24 dB로

확장시킨 46 W급 고출력 고효율 도허티 전력증폭기를 구현하였다. 백-오프 구간의 확장시 고효율을 얻기 위해 주 증폭기와 보조 증폭기에 동일한 소자를 사용하고 주 증폭기 출력의 임피던스 변환회로를 조절하는 불균형 도허티 전력증폭기를 적용하였다. 제안한 불균형 도허티 전력증폭기는 기존의 비대칭 도허티 전력증폭기와 유사한 성능을 얻으면서 추가적인 회로를 줄일 수 있게 되었다. 측정결과, CDMA 2000 1x1FA 신호를 입력으로 사용하여 7.24 dB 출력 백-오프지점에서 38 %의 전력부가효율을 얻었으며 ACPR은 885 kHz 오프셋에서 -34 dBc를 1.98 MHz 오프셋에서 -35.6 dBc를 얻었다.

참 고 문 헌

- [1] K. Cho, J. Kim and S. Stapleton, "A highly efficient Doherty feedforward linear power amplifier for W-CDMA base-station applications," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 53, no. 1, pp.292-302, January 2005.
- [2] Y. Yang, J. Cha, B. Shin and B. Kim, "A fully matched N-way Doherty amplifier with optimized linearity," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 51, no. 3, pp.986-993, March 2003.
- [3] K. Cho, W. Kim, S. Stapleton, J. Kim, B. Lee, J. Choi, J. Kim and J. Lee, "Design of N-way distributed Doherty amplifier for WCDMA and OFDM applications," *IEEE Electronics Letters*, vol. 43, no. 10, pp.577-578, May 2007.
- [4] S. Chun, D. Jang, J. Kim and J. Kim, "Inverted asymmetric Doherty power amplifier driven by two-stage symmetric Doherty amplifier," *IEEE Electronics Letters*, vol. 46, no. 17, pp.1208-1209, August 2010.
- [5] S. Bousnina, M. Ghannouchi, "Analysis and experimental study of and L-band new topology Doherty amplifier," *IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, vol. 2, pp.93-98, May 2001.

저자소개



장 동 회 (Jang, Dong-Hee)

2004년 3월 ~ 현재 : (주) 피플웍스 책임연구원
 2010년 9월 : 광운대학교 대학원 전파공학과 공학박사
 2004년 2월 : 광운대학교 대학원 전파공학과 박사과정 수료
 2002년 2월 : 광운대학교 대학원 전파공학과 공학석사
 2000년 2월 : 광운대학교 대학원 전자공학부 공학사



김 지 연 (Kim, Ji-Yeon)

2008년 9월 ~ 현재 : 광운대학교 전파공학과 초빙교수
 2008년 2월 : 광운대학교 대학원 전파공학과 공학박사
 2004년 2월 : 광운대학교 대학원 전파공학과 공학석사
 2002년 2월 : 광운대학교 대학원 전파공학과 공학사



김 종 현 (Kim, Jong-Heon)

2009년 6월 ~ 현재 : 캐나다 Dali Wireless Technical Advisory Board Member
 1995년 4월 ~ 현재 : 광운대학교 전파공학과 교수
 2005년 3월 ~ 2008년 12월 : IT 국제 표준화 전문가
 2002년 1월 ~ 2007년 4월 : 캐나다 SFU Research Associate
 1994년 8월 : 독일 Dortmund Univ. 전자공학 공학박사
 1990년 6월 : 독일 Ruhr Univ. Bochum 전자공학과 공학석사
 1984년 2월 : 광운대학교 전자통신공학과 공학사