

고선형성, 고효율의 Wibro용 PAM 설계

Design of the PAM with High Linearity and Efficiency for Wibro

오 인 열 · 김 태 수 · 이 근 무

Inn-Yeal Oh · Tae-Soo Kim · Kun-Moo Rhee

요 약

본 논문은 Wibro용으로 사용될 수 있는 PAM 사양을 설정하고, 사양을 바탕으로 Wibro 동작에 적합한 PAM 구조를 제시하고, 설계하는데 목적을 두었다. Wibro용에 적합한 PAM 설계가 되도록 2005년 802.16e 규격 승인에 따른 최종 개정안인 TTA의 TTAS_Ko_06_0082R1과 국제규격 IEEE Std. 802.16d/e를 기반으로 사양을 정하였으며, 높은 효율 동작을 위해 최종단 증폭기는 Doherty 구조를 갖도록 하였고, 보다 높은 선형성 동작을 위해 pre-distorter를 적용 설계하였다. 제작된 PAM은 전체의 사용 대역과 전체의 사용 출력 범위에서 26.5 dB ± 1.0 dB의 이득 특성과 -14 dB 이하의 입출력 반사 손실 특성을 가지며, 최대 사용 출력인 26 dBm의 출력점에서 pre-distorter에 의한 4 Tone IMD 특성의 8 dB 개선 효과를 얻어 37 dBc의 결과를 얻었고, Wibro 신호에서는 4.77 MHz Offset 지점에서 5 dB의 개선 효과를 얻으면서 31 dBc의 스프리얼스 동작 특성을 얻음과 동시에 Doherty 방식 적용으로 27 % 정도의 효율 동작 특성을 얻었다. 제작된 결과는 기존 일반 PAM 구조와 Balanced 구조 그리고 전치 왜곡기가 적용되지 않은 Doherty 구조와의 동작을 비교 분석하여 비교 우위 성능을 가지고 있음을 밝혔다.

Abstract

This thesis is regarding of fabricating wibro PAM. First of all, we need to set specification based on link budget for wibro communication circumstance in order to develop PAM, then we decided specification concerning of wibro PAM by considering TTAS_Ko_06_0082R1 which is standardized in Korea, and IEEE Std. 802.16d/e which is international standard. We selected the Doherty structure to increase efficiency, and pre-distorter structure to increase linearity. The fabricated PAM has not only a result of 26.5 dB ± 1.0 dB gain characteristics and maximum of -14 dB return loss characteristics in full frequency bands and full output ranges, but also a result of 37 dBc at 4 tone IMD characteristics which is improved result of 8 dB and a result of 31 dBc spurious characteristics which is improved result of 5 dB at 4.77 MHz offset point in status of having 27 % efficiency in the 26 dBm high power amplifier output signal. We confirmed the suggested structure is better than others by comparing with normal structure, balanced structure and Doherty structure without predistorter.

Key words : PAM, Doherty, Pre-Distorter, Wibro, OFDMA-TDD

I. 서 론

Wibro는 Wireless Broadband의 약자로서 휴대 인터넷 개념으로 4세대 통신을 지향하여 나온 서비스

이다. 주파수는 2.3 GHz 대역을 사용하며, OFDMA/TDD 접속을 한다. 우리나라에서는 이와 관련한 무선 접속 규격을 TTA에서 TTAS_Ko_06_0082R1으로 제정하였고, 국제 표준은 IEEE Std. 802.16d/e에서

위덕대학교 정보통신공학부(Division of Information and Communication Engineering, Uiduk University)

· 논문 번호 : 20060329-032

· 수정완료일자 : 2006년 5월 22일

“Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems”의 규격으로 제정하고 있다. 현재 국내에서는 제정된 TTA 표준 권고를 중심으로 국제 표준이 반영되도록 많은 국내의 연구진이 활동하고 있다. 본 논문에서 목적으로 한 Wibro용 PAM 설계는 국내 TTA에서 최근 개정된 2.3 GHz 휴대 인터넷 표준인 TTAS_Ko_06_0082R1을 기반으로 동작하도록 하는 기능 및 사양을 설정하였다. Wibro 신호의 OFDMA 변조 방식은 주파수 이용 효율은 높으면서 주파수 선택적 페이딩에 강한 전송 방식이지만 다수의 부반송파를 증점으로 사용하여 전송합으로 PAPR(Peak to Average Power Ratio)가 크다는 문제점이 있다. 이에 대하여 사용되는 PAM은 선형성을 강조하여 설계되면서 동시에 TDD 기능에 적합하게 동작하여야 하고, 높은 효율 동작을 가져야 한다.

II. 사양 설정

Wibro 단말기는 MAC(Medium Access Control)을 기반으로 RF 신호를 제어하여 신호를 송수신하여야 하며, MAC 동작을 위한 MODEM IC를 제어하는 CPU에 의해 사용자가 원하는 동작이 일어나도록 동작시켜야 한다.

PHY(Physical Layer)에 의해 OFDM 신호를 송수신하며, 무선 신호는 baseband 신호에 맞추어 수신할 수 있도록 동작하고, 송신 신호는 원하는 무선 주파수 대역과 출력 레벨로 만들어야 한다. 송수신 신호는 같은 주파수로 송수신을 하기 때문에 TDD(Time Division Duplex) 방식으로 잘 제어될 수 있도록 스위칭해 주어야 한다.

사양 설정은 단말기의 링크 버짓에 의해 정해지며, 우선 단말기의 수신 변복조 방식에 근거한다. Wibro에서 변복조 방식은 통신 환경에 의해 적응형 변조 방식을 따르기 때문에 사양을 정하는 관점에서는 무선 환경이 최악으로 가정한 상태에서 정하게 되며, 이러한 경우 단말기는 QPSK 방식의 변복조를 수행하게 된다. QPSK 변복조 방식은 10^{-5} BER 특성을 얻기 위해서는 8.5 dB~10 dB까지의 S/N 비를 요구하고 있음을 알 수 있다^[1]. 그러나 Turbo Code의 channel coding을 하는 Wibro에서는 channel coding의 이득을 얻게 되는데, 이를 근거로 요구되는 S/N

비는 10^{-5} BER 특성을 얻기 위해서는 4.5 dB의 S/N 비를 요구한다^[2]. 2.3~2.4 GHz 주파수를 사용하는 Wibro의 경로(d_n)에 대한 손실은 식 (1)과 같은 손실에 대한 보상을 해주어야 한다^[3].

$$L_{dB} = 42.6 + 26 \log(d_n / \text{km}) + 20 \log(f / \text{MHz}) \quad (1)$$

Wibro 서비스는 Macro Cell 범위가 1 km이기 때문에 최악의 경우 송수신 경로가 1 km라 할 수 있다. 그리고 2.4 GHz로 통신이 이루어진다면 경로에 대한 전체 손실은 -122 dB가 됨을 알 수 있다.

단말기의 요구되는 송신 사양을 고려하기 위해서는 시스템의 잡음 레벨을 고려해야 한다. 잘 만들어진 통신 장치에서 일반적으로 잡음은 열잡음이 99% 이상을 차지하므로 잡음 레벨(N)은 식 (2)와 같이 $kT B_n$ 을 갖는다.

k : 볼츠만 상수 (1.38×10^{-23} J/K)

T : 절대온도 (300 K @ 27 °C)

B_n : 잡음 대역폭 (10 MHz)

$$N(\text{잡음레벨}) = k T B_n = -104 \text{ dBm} \quad (2)$$

이러한 잡음 레벨 환경에서 일반적인 시스템 잡음지수(NF) 2 dB를 가지며, 경로 손실을 122 dB 갖는 중계기(RAS)가 수신할 수 있는 단말기 송신 레벨은 식 (3)과 같은 고려에서 25 dBm의 출력 전력을 요구하고 있음을 알 수 있다.

단말기 최대 송신 요구 레벨

$$\begin{aligned} &= \text{시스템 잡음} + \text{경로 손실} + \text{요구되는 S/N 비} \\ &\quad + \text{NF} \\ &= -104 \text{ dBm} + 122 \text{ dB} + 5 \text{ dB} + 2 \text{ dB} \\ &= 25 \text{ dBm} \end{aligned} \quad (3)$$

링크 버짓과 무선 접속 규격을 바탕으로 표 1과 같이 PAM 사양을 정하였다.

III. PAM 설계

그림 1에서 볼 수 있는 것처럼 충분한 이득을 위해 2단 증폭 구성을 하였으며, 최대 효율 동작을 위해 Doherty 구조를 따르도록 접근하였다. Doherty 구조는 carrier amp와 peaking amp로 구성되어 효율을 최대화 하는 동작을 갖도록 하지만 선형성에 취약함

표 1. PAM 설정 사양

Table 1. The specification of PAM.

항목	타사 제품(R사)	목표 사양
주파수	2.3~2.4 GHz	2.3~2.4 GHz
출력	25.5 dBm	26 dBm Max.
방식	OFDMA-TDD	OFDMA-TDD
이득	29 dB	26.5 dB
효율	22 %	TBD
전원	3.2~4.2 V	3.2~4.2 V
선형성	-30 dBc @ 9.27 MHz -38 dBc @ 13.23 MHz	-30 dBc @ 4.77 MHz -45 dBc @ 13.23 MHz
기능	Shut Down	Shut Down /Sensing

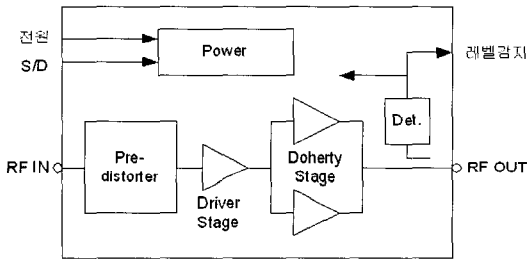


그림 1. PAM 블록도

Fig. 1. The block-diagram of PAM.

으로 peaking amp를 B급으로 동작시키는 접근을 하여 효율은 최대화 하면서도 선형성을 유지하는 방법을 고려하였다. 또한 선형성 동작을 위해 pre-distorter를 고려하여 설계하였다.

3-1 Pre-Distorter 설계

일반적으로 고출력 증폭기는 그림 2(a)와 같이 동작점에서 포화 현상이 나타나 비선형 동작을 하게 된다. 이러한 비선형 동작은 신호를 왜곡시키고, 인접 채널에 영향을 미치는 결과를 초래한다. 비선형 동작 특성을 보상하기 위해 입력 단에 그림 2(b)와 같은 전치 왜곡의 특성을 갖도록 하는 pre-distorter를 고출력 증폭기 앞에서 동작시킴으로써 고출력 증폭기가 선형 동작을 하게 된다.

본 논문에서는 pre-distorter에 대해 최적 동작 특성을 가질 수 있도록 조정이 가능한 반사형 구조를 갖는 위상 변환기, 가변 감쇄기, IM 발생기를 구조화

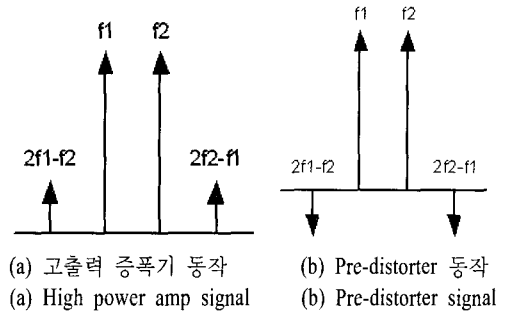


그림 2. Pre-distorter 동작

Fig. 2. The operation of pre-distorter.

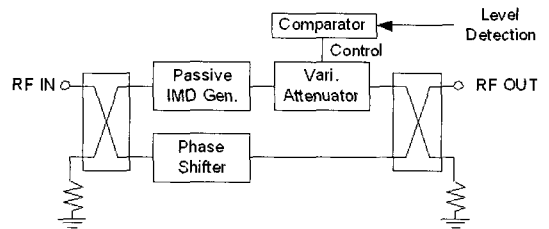


그림 3. Pre-distorter 구조도

Fig. 3. The structure of pre-distorter.

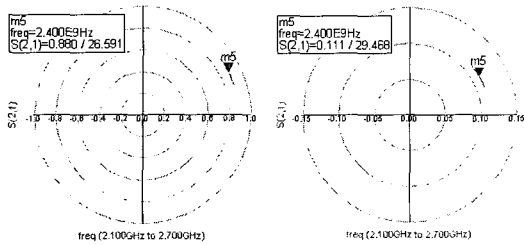
하여 원하는 왜곡 신호의 레벨과 위상을 갖도록 조절 할 수 있는 구조로 설계하여 고출력 증폭기의 특성에 맞는 그림 2의 (b) 출력 결과를 얻도록 하였다. 그림 3은 pre-distorter의 구조도를 나타내었다.

전력 증폭기는 최대 출력에서 왜곡이 발생함으로 PAM의 출력 신호를 감지하여 일정 출력 이상이면 pre-distorter가 동작하도록 구조화하여 어느 출력에서도 선형성 동작을 갖도록 설계하였다. 이를 위해 출력 포트에는 출력 신호를 감지하는 detector 회로를 첨가하여 주었다.

그림 4는 pre-distorter에 적용한 가변 감쇄기의 결과를 나타내었듯이 3°의 위상 변화를 가지면서 19 dB의 진폭을 가변할 수 있음을 볼 수 있다.

그림 5 역시 pre-distorter에 적용한 위상 변환기의 결과를 나타내었듯이 진폭의 변화는 없으면서 156°의 위상을 가변할 수 있도록 설계되었다.

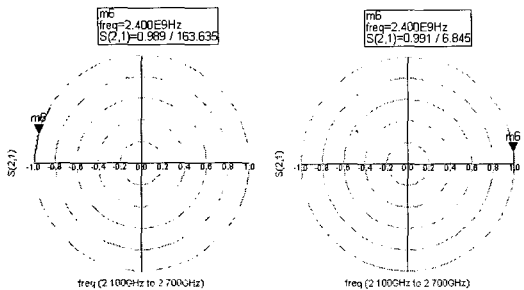
그림 6의 IM 발생기의 설계 결과는 -11 dB 이하의 입출력 반사 손실 결과와 15 dBc 정도의 IM 발생 결과를 얻었다. 제작 결과에도 제어 전압을 통해 IM 발생량을 충분히 조정될 수 있었고, 고출력 증폭기의 출력에 따른 왜곡 정도에 대한 변화량을 상황에



(a) 0.88 V(-1 dB)/26° @ Vp=4 V
 (a) 0.88 V(-1 dB)/26° @ Vp=4 V
 (b) 0.11 V(-20 dB)/29° @ Vp=0.3 V
 (b) 0.11 V(-20 dB)/29° @ Vp=0.3 V

그림 4. 가변 감쇄기 설계 결과

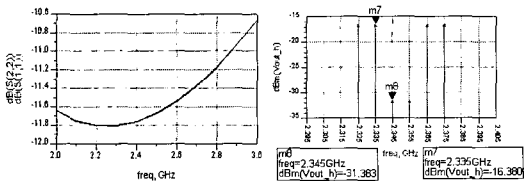
Fig. 4. The simulation result of variable attenuator.



(a) 0.99 V(-0.1 dB)/7° @ Vp=4 V
 (a) 0.99 V(-0.1 dB)/7° @ Vp=4 V
 (b) 0.989 V(-0.1 dB)/163° @ Vp=0 V
 (b) 0.989 V(-0.1 dB)/163° @ Vp=0 V

그림 5. 위상 변환기 설계 결과

Fig. 5. The simulation result of phase shifter.



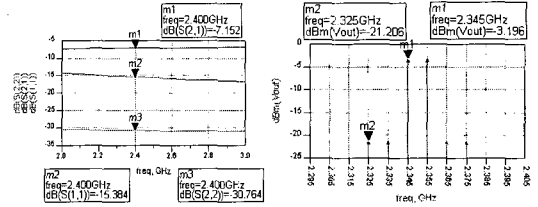
(a) 입출력 반사 손실 결과 (<-11 dB)
 (a) A return loss result (<-11 dB)
 (b) IM 발생 결과(15 dBc IM 발생)
 (b) A IM Gen. result(15 dBc IM Gen.)

그림 6. IM 발생기 설계 결과

Fig. 6. The simulation result of IM Generator.

맞게 IM 발생 동작을 시킬 수 있었다.

가변 감쇄기, 위상 변환기, IM 발생기의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 그림 3의 pre-distorter를 구조화



(a) 이득 및 반사 손실 결과 (a) A gain & return loss result
 (b) IM 발생 결과 (b) A IM gen. result

그림 7. Pre-distorter 설계 결과

Fig. 7. The simulation result of pre-distorter.

표 2. Pre-distorter 단 설계 결과표

Table 2. The design result of pre-distorter.

사양		Simulation 결과
주파수		2.3 GHz~2.4 GHz
가변 감쇄기	진폭 변화	19 dB
	위상 변화	3°
위상 변환기	진폭 변화	0 dB
	위상 변화	156°
IM 발생기	입출력 반사 손실	-11 dB 이하
	IM 발생	15 dBc
Pre-distorter	IM 발생	18 dBc
	삽입손실	-7 dB
	입출력 반사 손실	-15 dB

하여 그림 7의 시뮬레이션 결과를 얻었다. 이를 바탕으로 pre-distorter의 결과를 표 2에 정리하였다.

그림 7과 표 2에서 알 수 있는 것처럼 시뮬레이션 결과는 -7 dB의 삽입 손실과 -15 dB 이하의 입출력 반사 손실 상태에서 18 dBc 정도의 3차 왜곡 특성을 강제로 발생시키고 있음을 알 수 있다. 이러한 전치 왜곡 특성은 PAM에서 발생된 왜곡 특성을 상쇄하도록 동작시킨다.

3-2 Doherty 단 설계

PAM의 최종단은 선형성을 유지하면서도 효율을 높일 수 있는 Doherty 구조로 설계하였다. Power Tr 선택에 있어서는 OFDMA 동작을 통해서 얻는 BER의 10^-5 기준일 때의 OBO(Output Back-Off) 출력을 기준으로 하였고, 이때의 요구되는 OBO는 일반 전력 증폭기에서 -10 dB 정도의 back off를 요구한

을 알 수 있다¹⁴⁾. 본 논문에서는 pre-distorter를 사용하여 2~3 dB 선형성 개선 효과를 감안하면서 동시에 Doherty 구조에 의한 출력 동작 감소와 선형 특성의 왜곡으로 1 dB 손실 정도를 감안해 주었다. 이 때문에 최종 26 dBm 출력을 얻기 위해서는 7 dB OBO를 갖도록 설계하여야 하기에 최종단 P1 dB 출력이 33 dBm이 되도록 하였다. 이 때문에 Doherty carrier amp 용 Tr과 peaking amp 용 Tr은 각각 30 dBm P1 dB를 갖는 소자로 설계해 주었다. 적용된 FET는 Fujitsu 사의 제품을 적용하였고, 시뮬레이션은 high power의 출력인 경우와 low power의 출력인 경우로 나누어 설계해 주었다. Doherty는 carrier 증폭기 경로와 peaking 증폭기 경로의 두 개의 경로로 동작하며 carrier 증폭기는 A급 작동점에서 동작하고, peaking 증폭기 경로는 B급 작동점에서 동작하여 낮은 출력뿐 아니라 최대 출력에서도 선형성을 유지시키는 출력을 얻으면서도 효율을 높일 수 있는 구조로 동작한다. 이에 대한 시뮬레이션은 high power 출력인 경우는 carrier 증폭기 경로와 peaking 증폭기 경로가 모두 동작하는 것을 예상하였으며, low power 출력 경우는 carrier 증폭기 경로만 동작한다는 가정에서 peaking 증폭기 경로는 open시켜 시뮬레이션 해 주었다. 이에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 8과 그림 9 그리고 그림 10에 나타내 주었고, 이의 결과 값을 표 3에 정리하였다.

설계 결과에서 볼 수 있는 것처럼 low power인 경우와 high power인 경우가 모두 2차 하모닉 이상의 주파수인 5 GHz까지 안정하게 동작하면서도 항상 입출력 반사 계수를 -10 dB 이하로 만족하고 있음을 볼 수 있다. 이득 역시 low power인 경우가 high power 경우보다 2 dB 차이밖에 나지 않음을 볼 수 있어 일정하게 동작함을 알 수 있다. 이에 대한 보

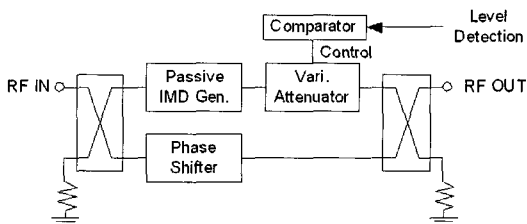
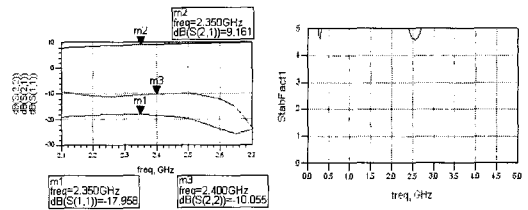
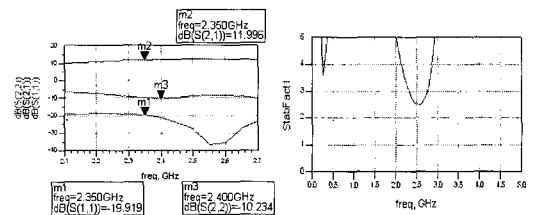


그림 8. 적용된 Doherty 구조
Fig. 8. The structure of Doherty part.



(a) 반사 손실 및 이득 결과 (b) 안정도 결과
(a) A return loss & gain result (b) A stability result

그림 9. Power Amp단 설계 결과(Low Power 경우)
Fig. 9. The simulation result of power Amp part.



(a) 반사 손실 및 이득 결과 (b) 안정도 결과
(a) A return loss & gain result (b) A stability result

그림 10. Power Amp단 설계 결과(High Power 경우)
Fig. 10. The simulation result of power Amp part.

표 3. Doherty 단 설계 결과표

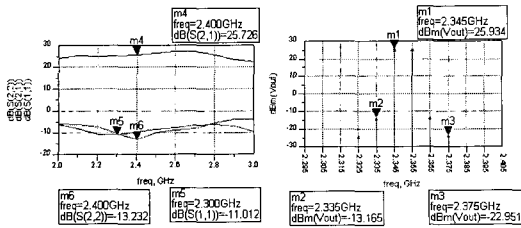
Table 3. The design result of Doherty part.

사양	Low Power	High Power
	Simulation 결과	Simulation 결과
주파수	2.3~2.4 GHz	2.3~2.4 GHz
입력 반사 손실	-17 dB Typ.	-19 dB Typ.
출력 반사 손실	-10 dB Typ.	-10 dB Typ.
이득	9 dB	11 dB
안정도(K)	>1	>1

정은 driver 단의 ramping 신호에 의해 보정이 가능하다.

3-3 PAM 설계

그림 11은 pre-distorter와 Doherty 구조를 함께 고려하여 얻은 최종 PAM의 시뮬레이션 결과도이다. 시뮬레이션은 Wibro 소스가 정의되어 있지 않아 2 tone IMD의 선형화 결과를 참조하여 결과를 얻었다. 시뮬레이션 결과 설계된 PAM은 26 dB의 이득과 -10 dB 이하의 입출력 반사 손실 결과를 얻었으며, 26



(a) 반사 손실 및 이득 결과 (b) IM 발생 결과
 (a) A return loss & gain result (b) A stability result

그림 11. PAM 설계 결과

Fig. 11. The simulation result of PAM.

표 4. PAM 시뮬레이션 결과표

Table 4. The simulation result of PAM.

사양	Simulation 결과	검토
주파수	2.3 GHz~2.4 GHz	
입력 반사 손실	-11 dB	Typ.
출력 반사 손실	-13 dB	Typ.
이득	25~26 dB	
Spectrum	26 dBm	Fundamental
	-13 dBm	IMD

dBm 출력에서 38 dBc의 IMD 특성 결과를 얻음을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과는 표 4에 정리하였다.

표 4에서 볼 수 있는 것처럼 전 사용 대역에서 25~26 dB의 이득과 -10 이하의 입출력 반사 손실 결과를 얻음을 확인할 수 있었고, 2 tone IMD는 39 dBc의 결과를 얻음을 알 수 있다. 이는 목표한 사양에 접근하고 있음을 판단할 수 있고, 이를 근거로 제작을 해주었다.

IV. 제작 및 측정 결과

PCB 설계는 simulation을 바탕으로 진행하였다. 전체적으로 PCB 설계를 하는 것보다는 부분적으로 실험을 진행하기 위해 PCB 설계도 부분적으로 설계해 주었다. 우선적으로 pre-distorter를 설계하면서 증폭부를 따로 설계 접근하였다. 증폭부 부분 역시 처음에는 각 증폭부가 최적의 동작점을 알 수 있는 실험을 진행함으로써 최적의 PAM이 될 수 있도록 부분적으로 설계를 진행하였었다. 이 때문에 driver부 증폭단과 Doherty부 증폭단을 따로 설계하여 PCB를 별도로 설계해 주었고, Doherty 부분 역시 carrier부

와 peaking부를 나누어 설계하여 최적점을 찾는 접근을 통해 최종 PAM을 구조화 시켜 주었다. Doherty 부분에 있어서도 phase balance를 맞추기 위해 delay line 특성 고찰이 필수적이어서 delay line 실험 접근을 위해 delay line PCB도 역시 별도로 해주어 실험할 수 있도록 하였다. 이를 바탕으로 driver 단과 Doherty 단의 전체 증폭기 설계를 해주었다.

4-1 Pre-Distorter 실험 결과

그림 12는 제작된 pre-distorter의 실물 사진이며, 그림 13과 그림 14는 PAM의 출력 특성 개선 결과로서 IMD 출력 개선 효과와 스프리어스 출력 개선 효과를 Pre-distorter 적용 전과 후의 결과를 비교함으로써 각각의 성능 결과를 나타내 주었다.

선형성 측정 결과는 먼저 주파수 대역 내에서 1 MHz 간격의 4 tone을 사용하여 측정하였다. 그림 13의 (a)는 pre-distorter와 Doherty가 적용되지 않고 측정된 24 dBm에서의 PAM 출력 결과이다. 그리고 (b) 그림은 모두 적용하여 얻은 26 dBm의 PAM 최종

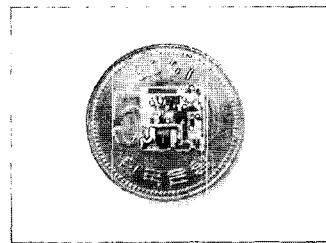
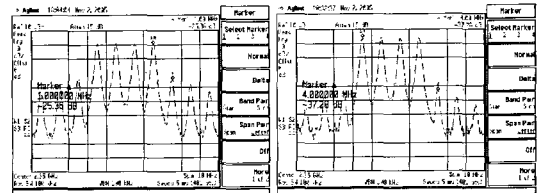


그림 12. 제작된 pre-distorter 제품 사진

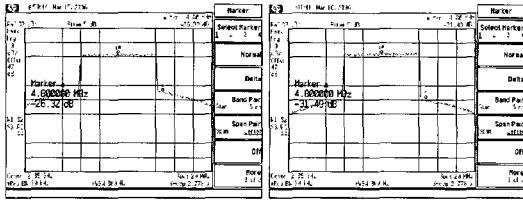
Fig. 12. The picture of the fabricated pre-distorter.



(a) PD & Doherty 미적용된 PAM 결과(29 dBc) (b) PD & Doherty 적용된 PAM 결과(37 dBc)
 (a) The result of PAM non-applied with PD & Doherty (b) The result of PAM applied with PD & Doherty where PD: pre-distorter

그림 13. PAM 선형성 동작 결과(IMD 개선 결과)

Fig. 13. The IMD result of PAM.



(a) Pre-distorter 적용 안 된 PAM 결과(26 dBc)
 (b) Pre-distorter 적용된 PAM 결과(31 dBc)
 (a) The result of PAM non-applied with PD
 (b) The result of PAM applied with PD

그림 14. PAM 선형성 동작 결과(스프리이스 개선 결과)

Fig. 14. The spurious result of PAM.

단 출력 결과이다. Doherty 동작에 의해 출력 레벨이 올라가면서도 pre-distorter 동작에 의해 선형성 특성이 8 dB 정도 개선됨을 알 수 있다.

그림 14의 (a)는 pre-distorter가 적용되지 않고 측정된 26 dBm에서의 PAM 출력 결과이고, (b) 그림은 pre-distorter를 적용하여 얻은 PAM 최종단 출력 결과이다. Pre-distorter 동작에 의해 선형성 특성이 5 dB 정도 개선됨을 알 수 있다. TDD 신호에 대한 측정의 용이성을 위해 30 kHz RBW/300 Hz VBW로 측정하였다.

4-2 PAM 실험 결과

제작된 PAM의 전체 크기는 24×16(unit: mm)로 하였으며, 그림 16은 제작된 PAM의 내부 사진이다. 그림 15는 제안된 PAM의 성능 결과에 대한 비교를 위해 제작된 일반(normal) 구조의 PAM의 사진이다. Normal 구조의 PAM은 1dB 특성이 3 Watt 출력을 갖도록 설계한 것이다.

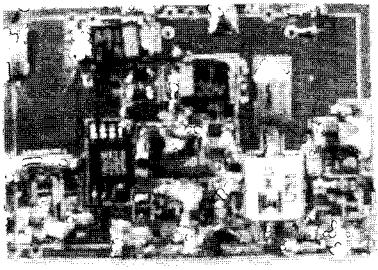


그림 15. Normal 구조의 제작된 PAM 제품 사진
 Fig. 15. The picture of PAM having normal structure.

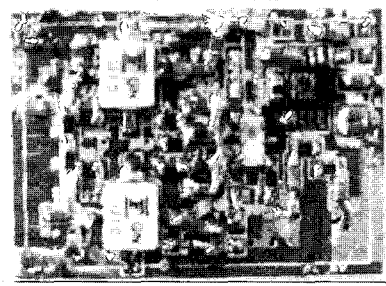


그림 16. 제안된 구조의 제작된 PAM 제품 사진
 Fig. 16. The picture of PAM having suggested structure.

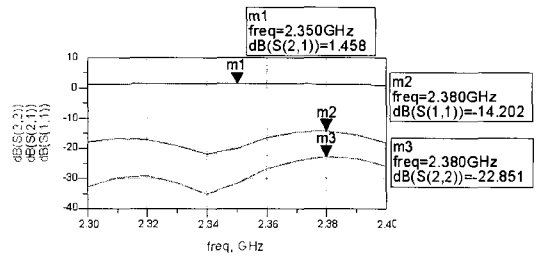


그림 17. 이득 및 반사 손실 측정 결과
 Fig. 17. The test result of gain & return loss.

제작된 PAM은 HP8510C Network Analyzer와 E4438C의 DSG 그리고 E4407B의 Spectrum Analyzer를 이용하여 측정하였다.

그림 17은 PAM의 이득 및 반사 손실을 측정한 결과도이다. 계측기 보호를 위해 출력단에 25 dB 감쇄기를 넣어서 측정해 주었기 때문에 전체적으로 26.5 dB 이득과 -14 dB 이하의 반사 손실 결과를 얻을 수 있다.

Pre-distorter와 Doherty가 적용되었을 때 26 dBm 출력시 전류는 4.0 V에서 약 300 mA까지의 전류가 소모되었으므로 효율은 27 %에서 동작함을 알 수 있었다.

Pre-distorter와 Doherty가 적용된 PAM의 실험 결과를 통해 얻어진 전체적인 성능 결과를 고찰하기 위해 일반 normal 구조의 PAM과 balanced PAM, Doherty PAM의 성능을 비교해 주었다. 여기서 Balanced 구조의 PAM은 선형성 위주의 최적 접근 튜닝으로 얻은 결과와 효율 위주의 최적 접근 튜닝으로 얻은 결과를 각각 나누어 시험 결과를 분석하여 제안된 방식의 PAM과 결과를 비교하였으며, Doherty

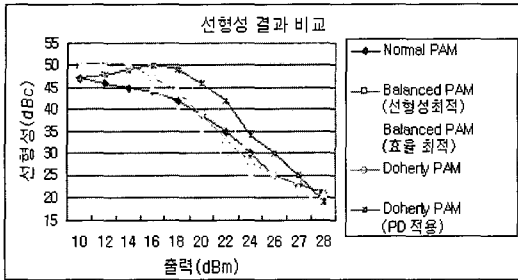


그림 18. 각 구조에 대한 PAM의 선형성 비교 결과
Fig. 18. The linearity result of comparing with each structures.

ty가 적용된 PAM에서는 pre-distorter(PD)가 적용되었느냐, 안되었느냐? 각각에 대한 실험 결과를 얻어서 성능 개선 효과를 비교하도록 하여 이의 결과를 그림 18~20에 나타내 주었다. 그림 18은 각각 PAM 구조에서 출력 레벨에 따른 선형성 결과의 비교를 나타낸 그림이다.

그림 18의 결과에서 볼 수 있는 것처럼 낮은 출력에서는 Doherty 구조와 balanced 구조의 PAM이 선형성 특성이 일반 normal 구조의 PAM보다 높지만 높은 출력에서는 비슷하거나 오히려 낮은 결과를 가짐을 볼 수 있다. 또한 pre-distorter 적용된 PAM은 20 dBm에서 26 dBm까지의 출력에서는 2 dB에서 5 dB까지의 점점 증가하는 개선 효과를 얻을 수 있다. 특히 사용 출력 레벨 중 최고 출력 레벨인 26 dBm에서는 보통 25 dBc의 결과에서 pre-distorter에 의해 5 dB 개선 효과를 얻어 30 dBc 출력 결과를 얻을 수 있다. 그러나 PAM의 낮은 출력에서는 PAM의 왜곡 특성이 적은 상태임으로 pre-distorter가 적용되면 전체적인 선형성 성능 특성이 더 악화되도록 볼 수 있다. 이 때문에 PAM은 출력 레벨을 감지하여 pre-distorter 적용 여부를 판단하도록 동작시켜야 한다. 이 때문에 본 논문에서는 출력 레벨을 감지하는 회로를 첨가하여 제안하고 있는 PAM 구조에서 선형화 특성이 열화되는 17 dBm 출력 레벨 이하에서는 pre-distorter가 동작이 되지 않도록 설계해 주었다. 이는 pre-distorter가 동작하지 않는 일반 Doherty amp로 동작시킴으로써 낮은 출력에서도 선형화 특성을 높일 수 있도록 함이다.

그림 19는 각각 PAM 구조에서 출력 레벨에 따

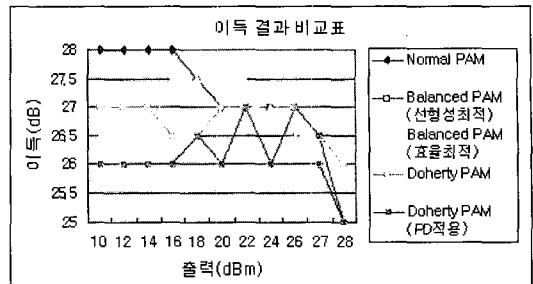


그림 19. 각 구조에 대한 PAM의 이득 비교 결과
Fig. 19. The gain result of comparing with each structures.

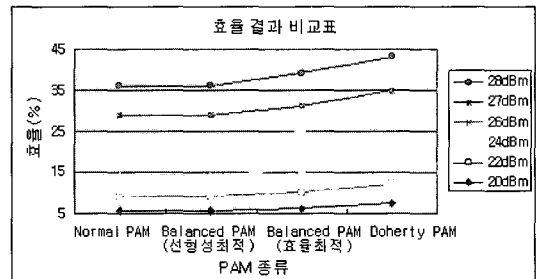


그림 20. 각 구조에 대한 PAM의 효율 비교 결과
Fig. 20. The efficiency result of comparing with each structures.

른 이득 결과 비교를 나타낸 그림이다.

그림 19의 결과에서 볼 수 있는 것처럼 모든 PAM 이득 범위 내에서 동작하고 있고, 높은 출력에서는 normal PAM과 pre-distorter가 적용된 Doherty 구조의 PAM의 이득이 낮아짐을 볼 수 있으며, 이를 제외한 일반적으로 사용 출력 레벨에서는 26.5 dB ± 1.0 dB의 이득을 갖도록 설계하였음을 볼 수 있다. 그림 20은 각각 PAM 구조에 따른 출력 레벨의 비교 결과를 나타낸 그림이다.

그림 20의 결과에서 볼 수 있는 것처럼 normal 구조의 PAM과 선형성 위주의 튜닝 접근을 한 balanced 구조의 PAM은 비교적 효율 특성이 다른 구조에 비해 낮지만 효율 접근에 대한 튜닝을 해준 balanced 구조의 PAM은 normal PAM보다는 2~3% 높아짐을 알 수 있다. 그리고 Doherty 구조의 PAM은 효율이 월등히 증가하여 3~4% 개선 효과를 얻을 수 있다.

전체적으로는 pre-distorter가 적용된 Doherty PAM

은 안정된 동작에서 목표한 이득 및 반사 손실 결과를 얻으면서 동시에 선형성 개선 효과로 목적하고자 하는 스프리어스 사양을 달성하면서 효율 개선 효과를 얻을 수 있다.

V. 결과 검토

Wibro용 PAM 설계를 통해 제작한 결과 -14 dB 이하의 반사 손실 특성에서 전체 이득은 26.5 dB ± 1.0 dB의 결과를 얻었으며, PAM의 26 dBm 출력시에 pre-distorter의 동작에 의해 8 dB의 선형성 개선 능력을 갖게 하여 4-Tone IMD를 37 dBc 얻었으며, 스프리어스 측면에서는 인접된 4.77 MHz offset 지점에서 $4\sim 5$ dB를 개선시켜 31 dBc의 출력 결과를 얻었다. 그리고 최고 사용 출력에서 27% 의 효율 동작 특성을 얻었다. Peaking 증폭기에서 C급이 아닌 B급으로 동작시킨 이유는 선형성 왜곡이 설정한 기준치(30 dBc @ 4.77 MHz)를 벗어나 심하게 왜곡되어 선형성을 맞출 수 없었기 때문이다. 이러한 이유로 효율면에서 중요한 최고 사용 출력에서 27% 의 효율에 만족해야만 했다. 여기서 얻어진 결과를 경쟁사 PAM과 대비하여 표 5에 정리해 주었다. 표 5에서 볼 수 있듯이 설계 제작된 PAM은 충분한 동작 결과를 가짐을 알 수 있다. 이를 바탕으로 얻은 특성 결과를

표 5. PAM 설계 결과

Table 5. The fabricated result of PAM.

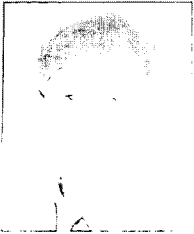
항목	타사 제품(R사)	제작 결과
주파수	2.3~2.4 GHz	2.3~2.4 GHz
출력	25.5 dBm	26 dBm Max.
반사 손실	-	-14 dB
이득	29 dB	26.5 dB
효율	22 %	33 % Min.@26 dBm
전원	3.2~4.2 V	3.2~4.2 V
선형성	-30 dBc @ 9.27 MHz -38 dBc @ 13.23 MHz	-30 dBc @ 4.77 MHz -45 dBc @ 13.23 MHz
기능	Shut Down	Shut Down /Sensing

중심으로 살펴보았을 때 PAM 사이즈를 줄이기 위해 이후 MCM(Multi Chip Module) 설계가 요구됨을 알 수 있다. 물론 최대 출력에서 전력 소모에 따른 열 방출 능력을 갖는 범위에서 사이즈 축소 작업이 이루어져야 한다. 이러한 조건하에 더 작은 사이즈로 구현이 필요하며 더불어 효과적인 효율 개선이 필수불가결하다.

참 고 문 헌

- [1] T. Noguchi, Y. Daido, and J. A. Nossek, "Modulation techniques for microwave digital radio", *IEEE Trans. Comm.*, vol. COM-33, pp. 442-449, May 1985.
- [2] 홍성원 외 3명, "복호기의 Metric 계산 횟수를 고려한 터보코드의 성능 분석", *한국통신학회지*, 17(2), pp. 1025-1028, 1998년.
- [3] Thomas Kurner, Reiner Fauss, and Andreas Wasch, "A hybrid propagation modeling approach for DCS 1800 macro cells", *Proc. 46th Veh. Tech. Conf.*, Atlanta, pp. 1628-1632, Apr. 1996.
- [4] 김만제, 임성빈, 신요안, "고정점 방법 기반의 사전왜곡기를 이용한 OFDM 시스템의 비선형 왜곡 보상", *한국통신학회지*, 24(4A), pp. 459-467, 1999년 4월.
- [5] C. P. McCarroll, G. D. Alley, S. Yates, and R. Matreci, "A 20 GHz Doherty power amplifier MMIC with high efficiency and low distortion designed for broad band digital communication systems", *MTT-s International Microwave Symposium Digest*, vol. 1 [MWSYM], pp. 537-540, Jan. 2000.
- [6] T. Saso, Y. Hasegawa, Y. Saito, and Y. Kakuta, "0.1 CC 60 % Efficiency power amplifier multi-chip modules for personal digital cellular phones", *MTT-s International Microwave Symposium Digest*, vol. 4 [MWSYM], pp. 1401-1404, Apr. 1999.
- [7] 이승규, 박남훈, "와이브로(Wibro) 단말 기술", *한국통신학회지*, 22(9), pp. 128-137, 2005년 9월.

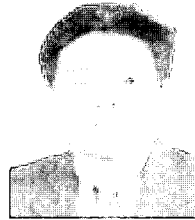
오 인 열



1993년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
1996년 8월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)
1996년 7월~1999년 8월: (주)LG정보통신 중앙연구소 이동통신단 연구원

2003년 8월: 광운대학교 전자공학과 (공학박사)
2003년 8월~2005년 2월: (주)햅팩스 H/W그룹 GSM/CD-MA 단말기 개발 팀장
2005년 3월~현재: 위덕대학교 정보통신공학부 전임강사
[주 관심분야] 이동통신시스템 및 부품연구, 디지털방송 및 LMDS 기술, 고출력 증폭기 선형화 기술

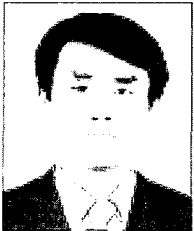
이 근 무



1982년 2월: 계명대학교 교육학과 (교육학사)
1991년 8월: 계명대학교 컴퓨터공학과 (공학석사)
1999년 2월: 계명대학교 교육학과 (교육학박사)

1984년 8월~2002년 2월: 계명대학교 전산교육원 연구원, 영남 전산&통계 대표
2002년 3월~현재: 위덕대학교 정보통신공학부 조교수
[주 관심분야] 멀티미디어 및 교육 컨텐츠, 멀티미디어 통신

김 태 수



1987년 8월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)
1991년 3월: 요코하마국립대학교 전자정보공학과 (공학석사)
1995년 3월: 요코하마국립대학교 전자정보공학과 (공학박사)

1996년 3월~현재: 위덕대학교 정보통신공학부 부교수
[주 관심분야] 디지털신호처리, 영상처리, 회로이론