

# Feedforward 선형 전력증폭기를 위한 에러증폭기의 구현 및 성능평가에 관한 연구

전중성\* · 조희제\*\* · 김선근\*\*\* · 김기문\*\*

\* 한국해양대학교 부설 산업기술연구소  
\*\* 한국해양대학교 전파·정보통신공학부  
\*\*\* (주)케이티프리텔 네트워크부문 3G네트워크추진팀

## A Study on Implementation and Performance Evaluation of Error Amplifier for the Feedforward Linear Power Amplifier

Joong-Sung Jeon\* · Hee-Jea Cho\*\* · Seon-Keun Kim\*\*\* · Ki-Moon Kim\*\*

\* Research Institute of Industry Technology, Korea Maritime University  
\*\* Dept. of Radio Information and Communication Engineering, Korea Maritime University  
\*\*\* KTF 3G Radio N/W Engineering Team Network Group

**요 약** : 본 논문은 IMT-2000 기지국용 15 Watt Feedforward 선형전력증폭기(Linear Power Amplifier; LPA)의 구현을 위한 에러증폭기를 설계 및 제작하여, 그 성능을 평가하였다. 에러증폭기는 상호 변조 왜곡 신호(Intermodulation Distortion: IMD)만을 검출하기 위한 빼기회로, RF 신호의 세기 및 위상을 제어하기 위한 가변 감쇠기, 가변 위상변환기, 그리고 신호의 증폭을 위한 저전력증폭기, 대전력증폭기로 구성되었다. 이들 구성요소는 RO4350 기판 위에 구현되어, 튠 도금한 알루미늄 기구물 안에 바이어스 회로와 함께 집적하였다. 제작시 RF 회로부의 바이어스 회로에 전원을 공급하기 위하여 내벽에 관통형 커패시터를 삽입하여 DC 전원에 의한 스푸리어스 성분이 제거되도록 하였다. 제작된 에러증폭기는 45 dB 이상의 이득,  $\pm 0.66$  dB의 이득평탄도, -15 dB 이하의 입력반사 손실 특성을 나타내었다. 또한 성능을 평가하기 위해 Feedforward 방식의 LPA에 적용한 결과 주증폭기의 IM3 성분이 34 dBc에서 61 dBc, 개선되었다. 이때 오차루프의 상쇄지수는 약 27 dB, 최강 출력 전력은 15 W로 나타났다.

**핵심용어** : 에러증폭기, Feedforward, 선형증폭기(LPA), RF 전력증폭기, 상호 변조 왜곡(IMD)

**Abstract** : In this paper, We tested and fabricated the error amplifier for the 15 Watt linear power amplifier for the IMT-2000 baseband station. The error amplifier was comprised of subtractor for detecting intermodulation distortion, variable attenuator for control amplitude, variable phase shifter for control phase, low power amplifier and high power amplifier. This component was designed on the RO4350 substrate and integrated the aluminum case with active biasing circuit. For suppression of spurious, the through capacitance was used. The characteristics of error amplifier measured up to 45 dB gain,  $\pm 0.66$  dB gain flatness and -15 dB input return loss. Results of application to the 15 Watt feedforward Linear Power Amplifier, the error amplifier improved with 27 dB cancellation from 34 dBc to 61 dBc IM<sub>3</sub>.

**Key words** : Error Amplifier, Feedforward, LPA, RF Power Amplifier, IM<sub>3</sub>

### 1. 서 론

일반적으로 RF(Radio Frequency) 및 마이크로파 회로는 사용된 능동 소자의 비선형성으로 인해 비선형 회로 특성을 갖는다. 특히, 전력증폭기는 최대 전력을 얻기 위해 능동소자인 트랜지스터와 FET를 비선형 특성이 강한 포화영역에서 동작시키며, 포화영역에서 동작되는 전력증폭기의 경우 이득과 위상이 외곡되는 것이 보통이다. 또한 다중 채널을 이용하는 디

지털 이동통신 및 위성 통신의 경우 전력 증폭기에 2개 이상의 반송파가 입력되어 증폭될 때 포화 영역 부근의 비선형 특성으로 인하여 상호 변조 왜곡 신호들이 발생하게 된다. 이들 상호 변조 왜곡 신호들은 혼신(Cross-talk) 또는 잡음(Noise)으로 작용하여 전송 품질을 저하시키는 요인이 된다(Cripps, 1999), (Myer, 1998).

전력증폭기의 경우, 포화영역에서의 동작에 따른 비선형 특성을 보상하기 위하여 선형화기를 전력증폭기와 함께 사용하

\* 정희원, jsjeon@hanara.kmaritime.ac.kr, 051) 410-4788  
\*\* hjcho@bada.hhu.ac.kr, 051) 410-4939  
\*\*\* seon@ktf.com, 02) 3488-1367  
\*\* 정희원, kmkim@hanara.kmaritime.ac.kr, 051) 410-4315

면 포화영역에서도 다수 반송파의 증폭으로 발생하는 혼변조 신호들을 대폭 감소시키면서 원하는 출력 전력을 얻을 수 있게 된다. 이러한 전력증폭기의 비선형 특성을 선형화하기 위해 지금까지 개발된 방식으로는 입력전력의 Back-Off, Feedback, Predistortion, Feedforward 방식이 있다(Pothecary, 1999).

본 논문에서는 Fig. 1과 같은 구성을 가지는 주파수 2.11 ~ 2.17 GHz 대역에서 Feedforward 방식을 이용한 선형 전력증폭기의 에러증폭기를 구현하고, 그 성능을 평가하였다.

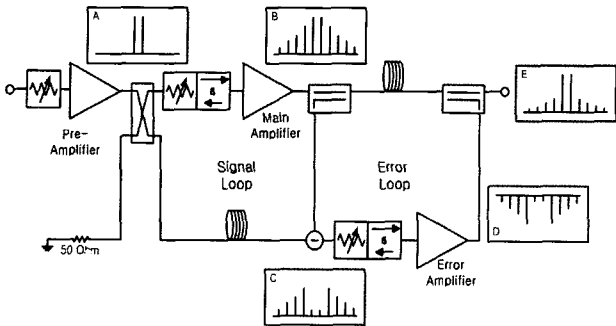


Fig. 1 The diagram of the feedforward

## 2. 에러증폭기의 설계 및 구성

빼기회로에서 출력된 반송파 신호를 제거하여 상호 변조 왜곡 신호를 증폭하기 위한 에러증폭기는 동작범위 내에서 균일한 이득 특성과 높은 선형성이 요구된다.

선형증폭기가 입력신호 주파수 2.11~2.17 GHz 대역에서 안정된 이득과 높은 이득 평탄도, 낮은 혼변조 신호를 가지고 증폭하는 반면, 에러증폭기는 선형증폭기의 입력신호 주파수 2 배 이상 즉, 2.08~2.2 GHz 대역에서 안정된 이득과 높은 이득 평탄도를 가져야 한다. 에러증폭기는 입력신호 상쇄회로와 파일럿(Pilot) 신호 입력회로, 저전력 증폭회로, 세기 제어회로, 위상 제어회로 및 대전력 증폭회로로 Fig. 2와 같이 구성된다.

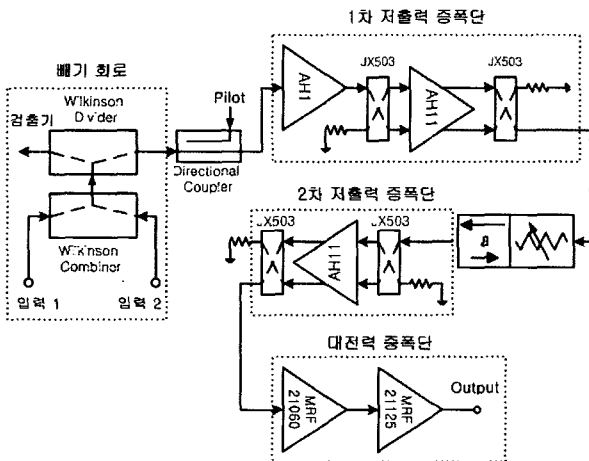


Fig. 2 Blockdiagram of error amplifier

각 부분의 기본적인 동작은 다음과 같다. LPA의 전치증폭기(preampifier)에서 기준으로 제공받은 신호와 주증폭기에서 증폭 과정을 거친 신호의 일정 부분은 에러증폭기의 입력 1과 2에 위상차 180°를 가지고 입력된다. 빼기회로에서는 Wilkinson 전력결합기를 이용하여 두 개의 신호를 결합하고 주증폭기에서 발생한 혼변조 신호만이 다음 Wilkinson 전력분배기에 입력된다. Wilkinson 전력분배기는 하나의 신호를 주증폭기에 존재하는 파일럿 신호의 세기 검출용으로 검출기에 제공하고, 다른 하나의 출력은, 20 dB 방향성 결합기를 통하여 제공된 새로운 파일럿 신호와 결합되어 Watkins-Johnson Communication사의 AH1과 AH11로 구성된 1차 저전력 증폭기에 의해 증폭된다. 1차 저전력 증폭된 신호는 가변 감쇠기와 가변 위상변환기를 통과하여 2차 저전력 평행증폭기인 AH11에 의해 증폭된다. 가변 감쇠기와 가변 위상변환기는 주증폭기의 지연선로에서 발생하는 신호 세기의 변화와 위상 변화를 보정해주는 역할을 수행한다. 저전력 평행증폭기 AH11의 출력 신호는 대전력 증폭용 트랜지스터인 Motorola사의 MRF-21060, MRF-21125를 사용하여 2.08~2.2 GHz 대역 내에서 안정적인 이득과 높은 이득 평탄도 특성과 낮은 혼변조 신호를 가지며 증폭하게 되며, 에러증폭기의 최종 설계사양은 Table 1과 같다.

Table 1 The design specifications of an error amplifier

순번	구분	규격	비고
1	사용주파수	2080~2200 MHz	
2	출력	35 dBm, avg.	3.1 Watt
3	이득	40 dB, min.	
4	이득 평탄도	< ± 0.5 dB	
5	최대입력전력	-15 dBm, Max	
6	입/출력 VSWR	< 1.5	
7	IMD	< -40 dBc @ 2tone, 1 Mhz Spacing	
8	DC input	27 ± 1 V	
9	Operation Temperature	0°C ~ +50 °C	
10	Operation Humidity	20 ~ 80 %	

## 3. 빼기회로 및 가변 위상 변환기, 가변 감쇠기

### 3.1 빼기회로

대전력 RF 증폭과정에서 발생하는 상호 변조 왜곡(IMD) 신호만을 검출하기 위한 회로는 마이크로스트립 선로를 이용하여 Wilkinson 전력결합기로 구현하였으며, 상호 변조 왜곡 신호 레벨을 검출기로 전송하기 위해 같은 형태의 전력분배기를 구성하여, Fig. 3과 같이 빼기회로를 구현하였다.(Pozar, 1991)

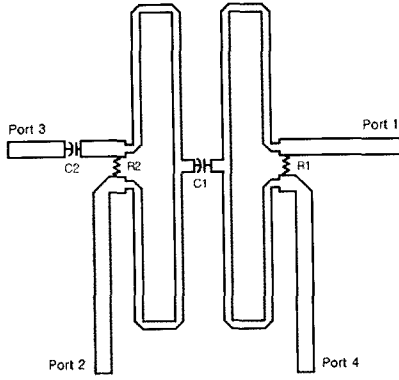
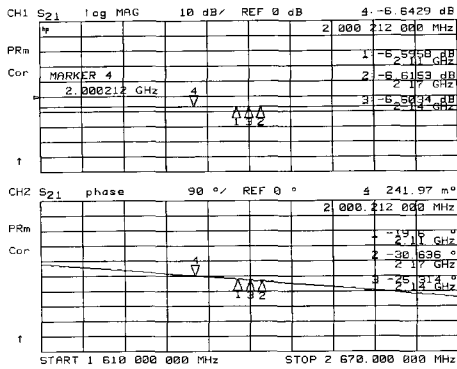
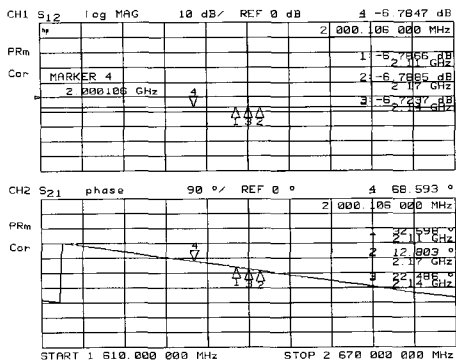


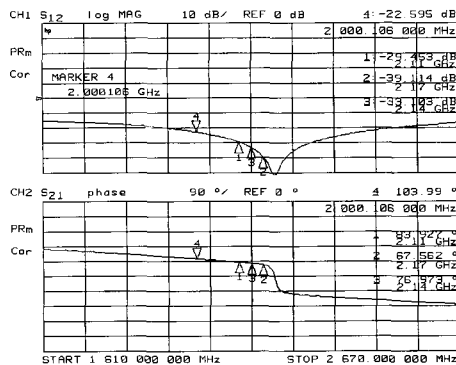
Fig. 3 Schematic of the design 4-port power combiner



(a) The insertion loss and phase at port 1-3



(b) The insertion loss and phase at port 4-3



(c) The isolation and phase characteristics at port 1-4

Fig. 4 The isolation, insertion loss and phase characteristics of the 4-port subtractor

각 포트별 입·출력으로, 포트 1에는 LPA의 주증폭기에서 주증폭과정을 거친 신호, 포트 4에는 전치증폭기에서 제공하는 기준신호가 각각 입력되고, 포트 3은 저전력 증폭기, 포트 2는 LPA의 검출기로 각각 출력 된다.

주파수 2.11 ~ 2.17 GHz 대역에서 입력 포트에서 출력 포트로의 통과 및 분리도를 회로망 분석기로 측정된 결과 Fig. 4와 같이, 포트 1과 4에서 입력된 신호는 -6 dB의 삽입손실을 가지고 포트 3으로 출력되었으며, 입력신호간의 분리도는 사용 주파수 대역에서 -29 dB 이하로 나타났다.

### 3.2 가변 감쇠기

상호 변조 왜곡 신호의 증폭 레벨의 조정을 위하여 저전력 증폭단의 출력 신호를 전기적으로 제어할 수 있도록 Mini-Circuits사의 RVA-2500 가변 감쇠기를 사용하였다. 가변 감쇠기의 바이어스 전압을 5 V로 하고 제어전압을 0 ~ 11 V까지 변화하였을 때, 2.08 ~ 2.2 GHz 주파수 대역에서 감쇠도를 측정된 결과 Fig. 5와 같이 나타났다.

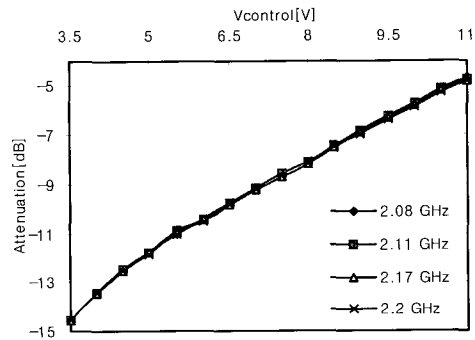


Fig. 5 The attenuation characteristics of the attenuator

### 3.3 가변 위상 변환기

가변 위상 변환기는 RF 신호가 소자를 통과할 때 발생하는 위상의 변화를 미세 조정하기 위해 설계 및 제작되었다. 본 논문에서는 Fig. 6과 같이 3 dB 방향성 결합기인 JX503을 이용한 반사형 구조로 외부 전압인가에 의해 Sony사의 바랙터 다이오드인 1T-362의 내부 커패시턴스 변화량을 이용한 위상변환기 회로를 설계 및 구현하였다(Hopfer, 1979), (Hardin, 1960).

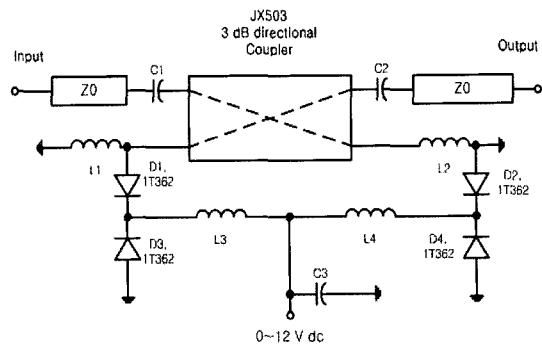


Fig. 6 The circuit of variable phase shifter

중심주파수 2.14 GHz에서 바이어스 전압에 따른 위상변화 및 통과도를 Fig. 7에 나타내었다.

제작되어진 가변 위상 변환기를 회로망 분석기를 이용하여 측정된 결과 2.08 ~ 2.2 GHz 주파수 대역에서 인가전압이 0 ~ 12 V의 변화를 가질 때 약 60° 범위에서 위상이 선형적으로 변화함을 알 수 있다. 이때 투과도는 1 dB 정도의 낮은 투과 손실, -11 dB 이하의 입·출력 반사손실로 나타냈으며, 3 dB Coupler 내부 손실을 제외하고는 손실 없이 측정되었다.

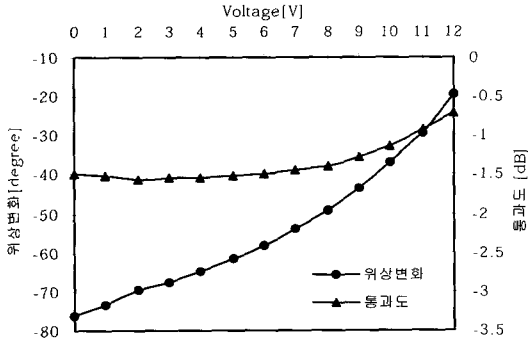


Fig. 7 The phase variation of variable phase shifter by bias voltage

#### 4. 저전력 증폭단의 설계 및 특성

배기회로에서 검출된 상호 변조 왜곡 신호의 세기는 미약하기 때문에 저전력증폭기를 통하여 일정한 레벨 이상으로 증폭하여 대전력증폭기로 전송되어야 한다. 본 논문에서는 저전력증폭기의 구현을 위해 Watkins-Johnson Communications사의 AH1과 평행증폭기로 구현되어야 하는 AH11을 사용하여 2단 증폭기로 설계하였다(Chang, 1983), (Edwards, 1992).

Fig. 8과 Fig. 9에는 각각 AH1과 AH11의 회로도 이다. 증폭기의 설계에 있어서는, 각 증폭단 사이에 삽입되는 DC 차단 회로로는 칩 캐패시터를 사용하였고, 드레인 단자에는 최소 삽입손실을 갖는 RF 초크를 구성하여 원하는 주파수 대역에서 바이어스 인가시 RF 신호가 바이어스 라인과 DC 전원부로 누출되는 것을 방지하도록 하였다.

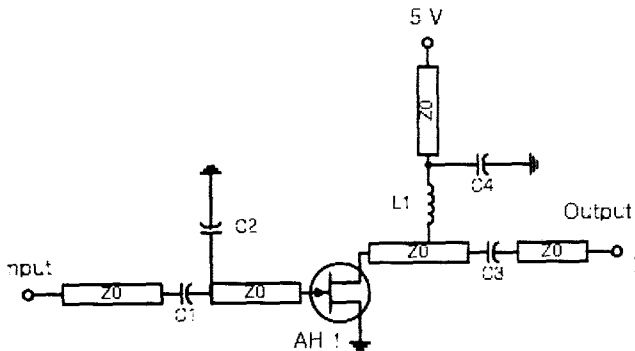


Fig. 8 The circuit of AH1

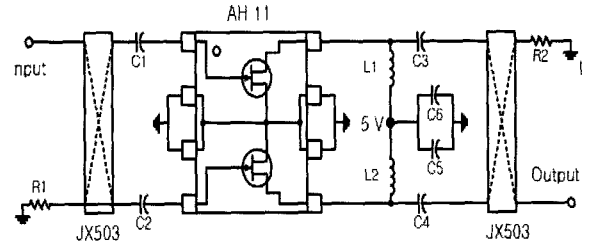


Fig. 9 The circuit of AH11

Fig. 10과 11은 중심주파수 2.14 GHz에서의 입력 신호전력 대 출력 신호전력의 변화 및 이득 변화를 나타내며, 제작된 저전력증폭기인 AH1과 AH11의  $P_{1dB}$ 는 각각 12 dBm과 15 dBm, 이득평탄도는  $\pm 0.5$  dB의 특성을 나타내었다. 또한 AH1과 AH11이 직렬로 연결된 저전력증폭단의  $P_{1dB}$ 는 3 dBm, 이득 평탄도  $\pm 0.5$  dB로 Fig. 12에 나타내었다.

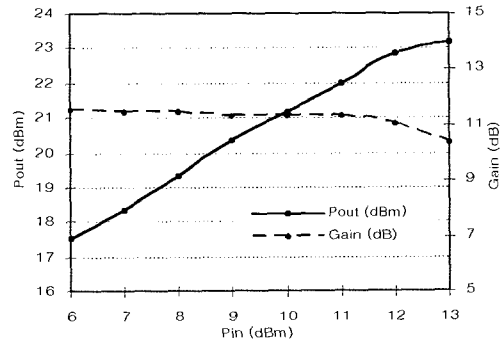


Fig. 10 The characteristics of AH1

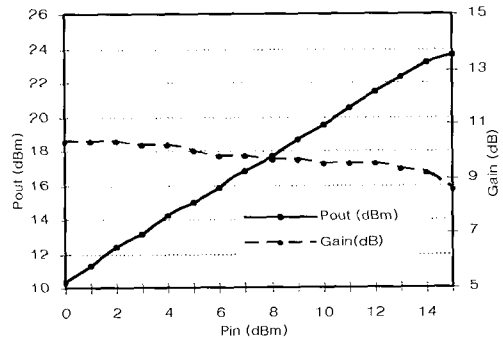


Fig. 11 The characteristics of AH11

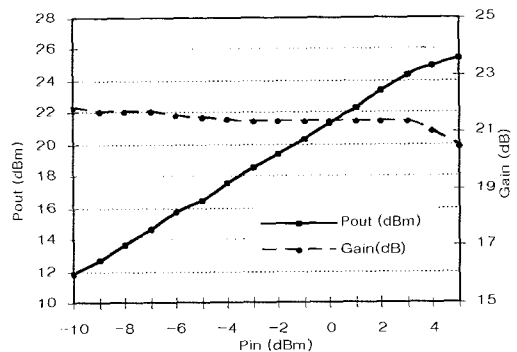
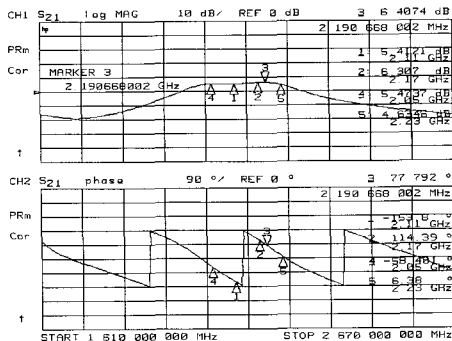


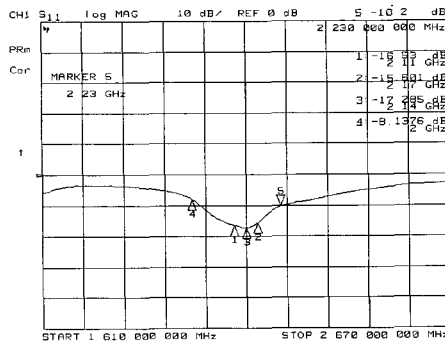
Fig. 12 The characteristics of driving amplifier

### 5. 대전력 증폭단의 설계 및 특성

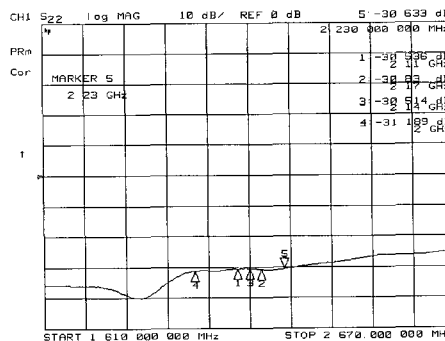
RF 전력증폭기의 출력이 30 Watt(44.8 dBm) 일 때, 3차 상호 변조 왜곡 신호가 충분한 여유를 고려하여 20 dBc로 나타나고, 빼기회로에서 주신호가 3차 상호 변조 왜곡 신호보다 작은 레벨로 감쇠되었다고 가정하면, 에러증폭기의 전체 전력은 선형전력증폭기(LPA)의 최종단인 전력결합기의 손실 10 dB를 포함하여 35 dBm이 되어야 한다. 따라서 에러증폭기는 35 dBm 출력에서 상호 변조 왜곡이 생기지 않는 충분히 Back-off된 A급 증폭기로 구성되어야 한다.



(a) The characteristics of gain



(b) The input return loss



(c) The output return loss

Fig. 13 The gain and return loss characteristics of high power amplifier

본 논문에서는 Motorola사의 LDMOS MRF-21060과 MRF-21125 RF 전력 증폭용 Power Transistor를 사용하여 전력증

폭기를 구현하였다. 제작된 대전력증폭단의 이득은 25 dB(측정시 20 dB 감쇠기 사용), 이득평탄도는  $\pm 0.7$  dB이고, 입·출력 반사손실은 -15 dB 이하로 Fig. 13에 나타내었다.

### 6. 특성 측정 및 성능평가

제작된 에러증폭기를 Fig 14에 나타내었다. 각 구성요소들은 RO4350 기판 위에 구현되어 알루미늄 기구물 안에 바이어스 회로와 함께 집적하였다. 제작시 RF 회로부의 바이어스 회로에 전원을 공급하기 위하여 내벽에 관통형 커패시터를 삽입하여 DC 전원에 의한 스퓨리어스 성분이 제거되도록 하였다.

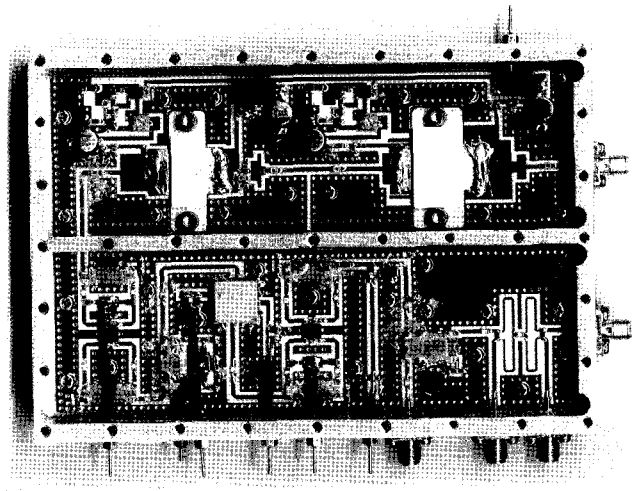


Fig. 14 The fabricated error amplifier

에러증폭기의 성능을 평가하기 위해 Giga-tronics사의 모델6000 신호발생기 2대와 HP사의 8563E 스펙트럼 분석기를 이용하여 Fig. 15와 같이 LPA Two-tone test 시스템을 구성하였다.

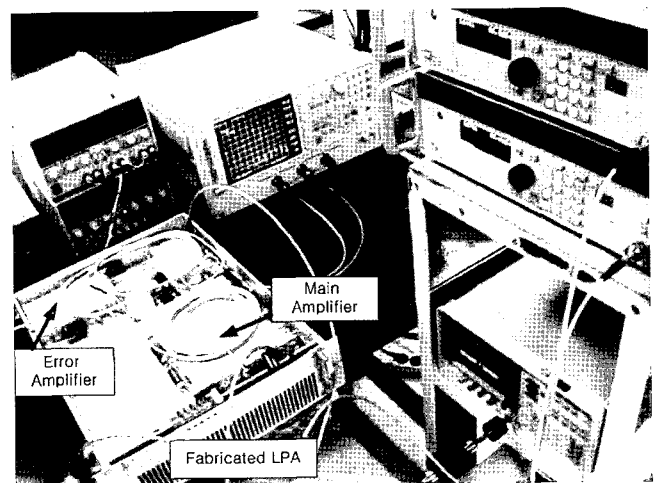
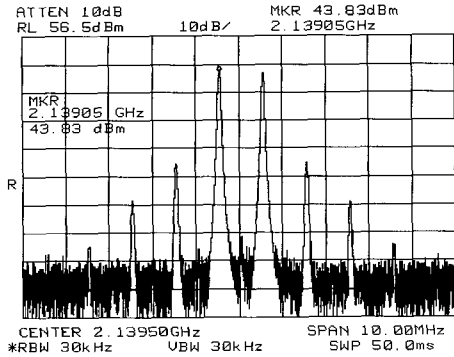


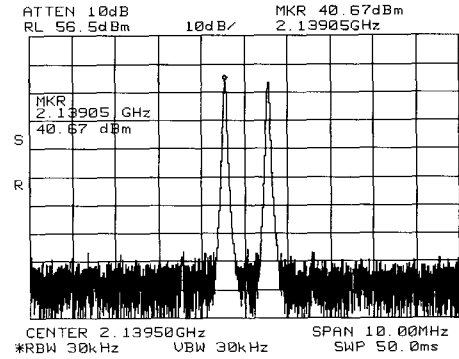
Fig. 15 The two-tone test system for LPA

각각 2139.5 MHz, 2140.5 MHz의 1 MHz 간격의 주파수 신호를 입력 하였을 때, 주증폭기의 출력 특성은 Fig. 16와 같이 43.83 dBm의 출력과 33.33 dBc의 3차 상호 변조 왜곡이 발생하였다.

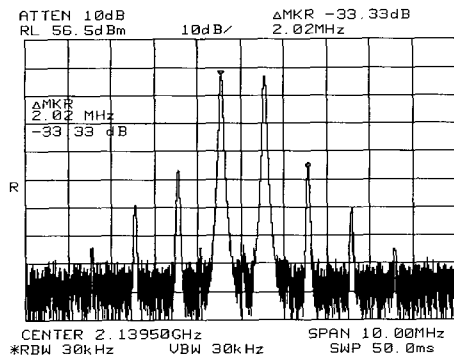
한 지연선로와 최종단의 전력 결합기에서 발생하는 손실이다. 이에 반해, 주증폭기에서 발생한 3차 상호 변조 왜곡 신호는 34 dBc에서 61 dBc로 제작된 에러증폭기로 인해 27 dBc 개선 되었음을 알 수 있다.



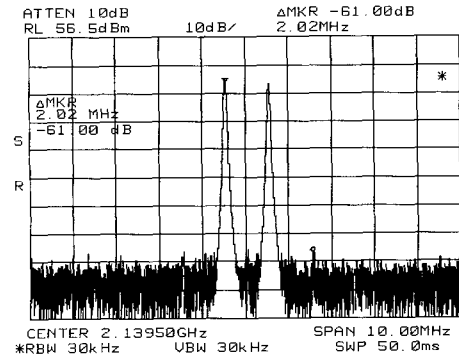
(a) The power characteristics of main amplifier



(a) The power characteristics of LPA



(b) The IMD characteristics of main amplifier



(b) The IMD characteristics of LPA

Fig. 16 The output characteristics of main amplifier

Fig. 18 The output characteristics of fabricated LPA

빼기회로의 검출 포트에서는 입력신호가 상쇄되어진 -40.3 dBm의 3차 IMD 신호가 Fig. 17과 같이 나타났다.

## 7. 결론

본 논문에서는 IMT-2000 기지국용 15 W 선형 전력증폭기의 구현을 위한 에러증폭기를 설계 및 제작하여, 그 성능을 평가하였다. IMT-2000 기지국의 송신 전력증폭기는 우수한 선형성이 요구되는데, 이를 만족하기 위하여 현재 개발된 선형화 방식에서 Feedforward 선형 전력증폭기가 가장 적합하다.

Feedforward 선형 전력증폭기의 에러루프에 사용된 에러증폭기는 상호 변조 왜곡 신호만을 검출하기 위한 빼기회로, RF 신호의 세기 및 위상을 제어하기 위한 가변 감쇠기, 가변 위상 변환기, 그리고 신호의 증폭을 위한 저전력증폭기, 대전력증폭기로 구성되었다.

제작된 에러증폭기는 45 dB 이상의 이득,  $\pm 0.66$  dB의 이득 평탄도, -15 dB 이하의 입력반사 손실 특성을 나타내었다. 또한 성능을 평가하기 위해 Feedforward 방식의 LPA에 적용한 결과 주증폭기의 3차 IMD 성분이 34 dBc에서 3차 IMD 성분이 61 dBc로 에러루프의 상쇄지수는 약 27 dB로 현재 국내에서 개발 중인 Feedforward 선형전력증폭기의 상쇄지수가 23

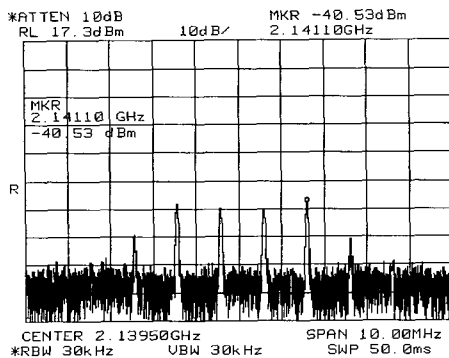


Fig. 17 The characteristics of subtractor

제작된 선형 전력증폭기의 출력특성은 Fig. 18과 같이 나타났다.

Fig. 18에서 LPA 출력전력이 주증폭기 출력전력보다 3.13 dBm 줄어들었음을 알 수 있다. 이는 에러루프를 형성하기 위

dB(박, 2002)임에 비해 4 dB 정도 개선되어 나타났다.

그러므로 제작되어진 에러증폭기는 Feedforward 방식의 선형 전력증폭기에 사용되어 RF 전력증폭기의 비선형 특성을 선형적으로 개선할 수 있음을 알 수 있다.

## 후 사

※ 이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단(과제번호 KRF-200-005-E00016) 및 2003년도 중소기업청 기술혁신과제(과제번호 부산-정5-1)의 지원에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- [1] 박용희, 이경희, 강상기(2002), “아날로그 Feedforward 선형화기를 이용한 IMT-2000대역 선형증폭기 설계” 전자공학회 논문집, 제 39권 TC편, 제 6호, pp. 285-291.
- [2] David. M. Pozar(1991), Microwave Engineering, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 395-400.

- [3] D. Myer(1998), “Ultra Linear/Feedforward Amplifier Design,” IEEE MTT-S Digest, pp. 1125-1127.
- [4] K. Chang(1983), C. Sun, “Millimeter-Wave Power-Combining Techniques,” IEEE Trans., Vol. MTT-31, pp. 91-107.
- [5] N. Potheary(1999), “Feedforward Linear Power Amplifier”, Artech House.
- [6] R. H. Hardin(1960), E. J. Downey, and J. Munushian, “Electronically variable phase shifters utilizing variable capacitance diodes,” Proc. IRE(Letter), Vol. 48, pp. 944- 945.
- [7] S. C. Cripps(1999), “RF Power Amplifier for Wireless Communications,” Artech House.
- [8] S. Hopfer(1979), “Analog Phase Shifter for 8-18 GHz,” Microwave journal, Vol. 22, pp. 48-50.
- [9] T. Edwards(1992), “Foundations for Microstrip Circuit Design,” John Wiley & Sons, pp. 267-276.

---

원고접수일 : 2003년 3월 31일

원고채택일 : 2003년 6월 4일