

ILS용 100 MHz 대역 Cartesian Feedback 선형 전력증폭기 설계

Cartesian Feedback - Linearized Power Amplifier for 100-MHz-Band ILS

김 수 경 · 구 경 현*

SuKyung Kim · Kyung Heon Koo*

요 약

본 논문은 Cartesian feedback 선형화 방법을 적용하여 ILS용 100 MHz 대역 전력증폭기의 IMD(intermodulation distortion)와 PAE(power-added efficiency)의 특성을 개선하였다. 전력증폭기, I/Q 변조기와 복조기를 시뮬레이션하고, 전력증폭기를 제작하여 측정한 결과는, 시뮬레이션과 유사한 특성을 얻었으며 요구성능 규격을 만족하였다. 변조 주파수가 90 Hz와 150 Hz이며 AM(amplitude modulation) 변조도가 각각 20 %인 변조 신호에서, Cartesian feedback 선형 전력증폭기는 45 dBm 출력에서 IMD가 -43.95 dBc 특성을 보였고, 선형화 적용으로 28.22 dB의 IMD 개선 효과가 있었다. 또한 전력증폭기의 PAE는 40.12 %의 고효율 특성을 얻었고, 기존 설계된 전력증폭기와 비교하면 15.74 %의 PAE 개선 효과를 확인하였다. 협대역 AM 변조 신호를 사용하는 계기착륙시설(ILS: instrument landing system) 송신부에, 설계한 Cartesian feedback 선형 전력증폭기를 적용하여 IMD 및 PAE 성능 개선이 가능함을 확인하였다.

Abstract

This study aimed to improve the characteristics of intermodulation distortion (IMD) and power-added efficiency (PAE) of a 100-MHz-band instrument landing system (ILS) power amplifier using Cartesian feedback linearization. The power amplifier, I/Q modulator, and demodulator circuits were simulated. The characteristics of the manufactured amplifier were similar to the simulation results and met the required performance specifications. In a modulation signal with modulation frequencies of 90 Hz and 150 Hz, and amplitude modulation (AM) depths of 20 % each, the designed Cartesian feedback - linearized power amplifier achieved an IMD characteristic of -43.95 dBc at an output power of 45 dBm. This indicates an IMD improvement of 28.22 dB compared to that of the nonlinear amplifier. Moreover, the designed power amplifier exhibited a high-efficiency characteristic with a PAE of 40.12 %, indicating an improvement of 15.74 % compared with the PAE of the previously designed power amplifier. This study confirmed that the IMD and PAE characteristics can be improved by employing the designed Cartesian feedback - linearized power amplifier in the transmitter of an ILS that uses narrowband AM signals.

Key words: Cartesian Feedback, Linearization, High Efficiency, Power Amplifier, ILS

I. 서 론

최근 5G 통신 등 고품질 오디오와 비디오가 결합된 멀티미디어 서비스에 대한 요구가 급속히 증가하였다. 무

「이 연구는 2022년 한국공항공사 재원으로 수행된 연구임.」

한국공항공사(Korea Airports Corporation)

*인천대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Incheon National University)

· Manuscript received April 16, 2024 ; Revised April 22, 2024 ; Accepted April 24, 2024. (ID No. 20240416-0039)

· Corresponding Author: Kyung Heon Koo (e-mail: khkoo@inu.ac.kr)

선 통신 환경에서의 다중경로 페이딩에 강하고, 고속 데이터 전송률을 갖는 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing)과 같은 다중 반송파를 사용하는 시스템은 높은 PAPR(peak to average power ratio) 특성을 갖는다. 이로 인하여 시스템 설계시 전력증폭기는 선형적인 특성을 만족하기 위하여 더 높은 OBO(output back-off) 설계가 필요하게 되고, 그로 인하여 전력증폭기의 효율이 나빠지게 된다^[1]. 선형화 방식 중 오랜 시간 사용했던 아날로그 Feedforward 전력증폭기는 구조가 복잡하고 비용이 많이 든다. 따라서 최근에는 DPD(digital pre-distortion) 전력증폭기에 대한 연구가 많이 이루어지고 상용화 되어 왔다. 반도체 기술의 발전으로 DAC(digital to analog converter)와 ADC(analog to digital converter)의 광대역 고속 디지털 신호처리 기술이 급격히 향상되고, 아날로그 RF 회로의 집적화로 SDR(software defined radio) 기반의 DPD 기술이 지속적으로 발전하고 있다. 그리고 DPD에 주로 사용되는 DPA(Doherty power amplifier)는 더 높은 OBO(output back-off) 영역에서 고효율 특성을 얻기 위하여 3way 구조, 비대칭 Peaking amp 구조 그리고 복소부하 결합구조와 같은 연구들이 지속적으로 이루어졌다^{[1][2]}.

본 연구에서의 100 MHz 대역은 전기적 파장이 매우 길어서 DPA 적용은 구조적으로 어렵다. 소형화 및 구현이 용이하고 협대역 신호에서 IMD(intermodulation distortion)의 개선량에 효과적인 CFB(Cartesian feedback) 선형화 기술을 적용하여, AM(amplitude modulation)변조를 사용하는 계기착륙시설(ILS: instrument landing system) 전력증폭기의 IMD를 개선시키고 효율을 향상시키고자 하였다. 계기착륙시설은 항공기의 활주로 접근 및 착륙 유도용 표준시설로서 활주로까지 안전하게 유도하는 시스템이며, 로컬라이저(localizer)는 항공기에 방위각 정보를 제공하기 위한 Course와 Clearance 두 개의 송신 시스템이 필요하고, 주·예비 장비까지 고려하면 시스템 하나에 전력증폭기가 4개 장착된다. 따라서 송신 시스템의 안정적 변조도 특성을 유지하면서 전력 소모를 줄일 필요가 있다. 선형화 방식 중 하나인 CFB(Cartesian feedback)를 이용한 송신시스템 선형화는, 대역폭이 100 kHz 이하의 협대역 신호에서 IMD 개선에 효과적이다^[1]. 800 MHz 대역 TETRA(terrestrial trunked radio)용의 수십 kHz 신호 대역폭에서

CFB 선형화 관련 논문들이 발표되어 왔으며, 변조기의 이득 및 위상 불일치에 따른 출력 및 IMD 변화량을 측정·제시하였다^{[3]~[8]}. 일반적으로 변조기의 입력 I/Q 신호는 90° 위상 차로 변조기에 입력하고, DC offset 제어를 통해 변조신호내에 나타나지 않도록 제어를 하지만, 본 논문에서 적용하는 ILS용 CSB(carrier with side band) 전력증폭기는 측대파와 함께 전송되는 반송파를 제어해야 한다. 따라서 제작한 CFB 선형화기에는 AM 변조 합성신호를 I/Q에 동일한 위상으로 입력하고, DC offset 제어로 출력과 변조도가 변하지 않도록 제어하였다. Cartesian feedback 선형화 시험을 위하여 전력증폭기와 I/Q 변·복조기를 모델링과 시뮬레이션을 하여 IMD 개선량을 예측하였고, 제작하여 특성을 측정하였다. 변조기와 복조기는 상용 Evaluation 보드를 사용했고, 외부 DC offset 제어회로를 추가하여, 전력증폭기와 연동 시험하고 측정하였다.

II. Cartesian Feedback 선형화

일반적인 Cartesian feedback 선형화기를 그림 1에 제시하였다^[3]. 변조기의 입력에 인가된 I와 Q의 신호는 LO 반송파로 고주파의 신호로 변조되고, 변조기 출력은 전력증폭기로 전달되어 증폭이 되며, 방향성 결합기를 통하여 피드백 루프로 신호가 전달된다.

피드백 신호는 복조기를 거쳐서 기저대역 신호인 I'/Q' 신호로 변환되고, 그 신호는 오차증폭기의 입력으로 인가되는 I/Q 신호와 비교하여 차동 신호만큼 비선형 신호를

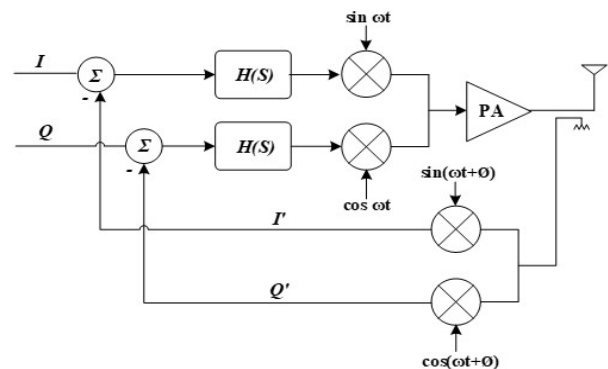


그림 1. Cartesian feedback 블록도

Fig. 1. Cartesian feedback block diagram.

발생하며, 이 신호는 다시 비선형 특성을 갖는 전력증폭기를 통과하면서 왜곡성분이 제거되고, 원하는 신호만 남게 된다. 지속적인 보상루프를 통하여 에러신호는 보정되고, 출력 신호는 안정화 된다. Cartesian feedback 시스템의 간략화된 등가도를 그림 2에 나타내었다. 순방향 경로에서 변조기 전력 증폭기의 왜곡 성분을 d_{FW} 로, 궤환 경로에서 복조기 등 다양한 소자들의 선형성 문제로 발생하는 왜곡 성분을 d_{FB} 로 나타내었다. 그리고 CFB 시스템 등가 블록도에서 G_e 는 오차증폭기, G_m 은 변조기 이득, G_a 는 전력증폭기 이득, 그리고 β 는 복조기와 기저 대역 증폭기에서 발생하는 궤환 경로 이득을 나타낸다. 개방루프 이득을 A 로 정의하면 $A = G_e G_m G_a$ 로 표현된다. 여기서 페루프 해석을 적용하여 풀이하고, 루프 이득($A\beta$)이 $A\beta \gg 1$ 로 가정할 때, 출력 신호 S_o 는 식 (1) 및 식 (2)로 표현할 수 있다^{[4]~[7]}.

$$S_o = \frac{AS_i + d_{FW} - Ad_{FB}}{1 + A\beta} \quad (1)$$

$$\approx \frac{AS_i}{\beta} + \frac{d_{FW}}{A\beta} - \frac{d_{FB}}{\beta} \quad (2)$$

CFB 선형화 시스템에서, 순방향 경로의 변조기와 전력증폭기의 왜곡 성분 d_{FW} 는 루프이득 $A\beta$ 로 나누어진다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 루프이득($A\beta$)을 충분히 크게 하면 순방향 왜곡 신호를 줄일 수 있다.

하지만 오차증폭기의 이득을 너무 높게 하면 시스템이 불안해지게 된다. 시스템의 안정도 향상을 위하여 신호 대역폭을 고려한 필터 설계 적용이 필요하다. 또한 궤환 루프에서 나타나는 왜곡성분 d_{FB} 는 피드백되어 그대로

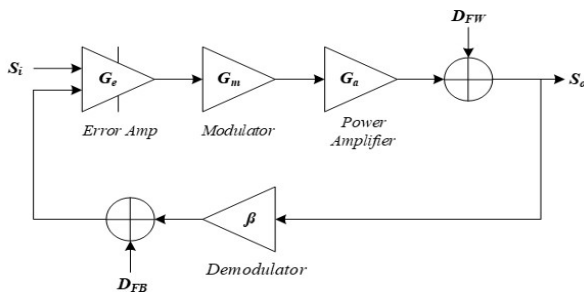


그림 2. Cartesian feedback 시스템 등가도

Fig. 2. Equivalent model of Cartesian feedback system.

증폭기에 인가되고 출력 신호에 더해지기 때문에 페루프의 복조기나 기저대역 증폭기, 감쇄기 등의 소자에서 왜곡이 발생하지 않도록 선형성이 우수한 부품으로 설계해야 한다.

III. 전력증폭기 및 변·복조기 설계

AM 변조방식을 사용하는 시스템의 변조기와 복조기를 모델링하고, 오차증폭기를 설계하였다. CFB 선형화를 적용한 전력증폭기를 시뮬레이션하여 IMD 개선 효과를 예측하였다.

3-1 요구규격

표 1은 주요 요구성능 목표 규격이다. 계기착륙시설 로컬라이저 전력증폭기의 주파수는 108 MHz~112 MHz이며, 입력신호는 90 Hz+150 Hz의 합성 오디오 신호원이다. 각각의 변조 주파수는 20 %의 변조도를 가질 때 반송파 대비 변조톤의 상대 출력비는 -19.98 dB 이다. 반송파 출력은 45 dBm, IMD는 -40 dBc 이하, CFB 선형화기의 IMD 개선량은 26 dB 이상, 그리고 PAE(power added efficiency)는 35 % 이상을 설계 목표로 하였다.

3-2 전력증폭기 설계

최종단 증폭기의 출력과 IMD 특성을 측정하기 위해서 구동증폭기를 포함한 전력증폭기를 설계하였으며, 전체 4단 전력증폭기의 설계를 그림 3에 제시하였다. 구동증폭기는 BIF7, BIF1, TQP7M1905 연속으로 구성하여 3단 증

표 1. 요구성능 규격

Table 1. Specification of required performance.

Items	Specification
Freq. range	108 ~ 112 MHz
Pout	45 dBm
Modulation freq. & mod. depth	90 Hz, 150 Hz, 20 %
IMD	-40 dBc max.
Improvement of IMD	26 dB min.
PAE	35 % min.

Item	Pin	PAD	AMP	PAD	V ATT.	PAD	AMP	AMP	AMP	LPF+CPL	Pout
		-	BI7	PAD	Var. Att.	T.PAD	BLF1	TOP7M 9105	MRFE6V 100R6	LPF+CPL	
P1dB[dBm]			20			23.5	23.5	30	50		
Pout [dBm]	-17	-20.5	1.5	-3.5	-10.5	-13.5	1.5	21.5	45.5	45	45
Gain [dB]		-3.5	22	-5	-7	-3	15	20	24	-0.5	
Back-off[dB]			18.50				22.00	8.50	4.50		

그림 3. 전력증폭기 gain budget

Fig. 3. Gain budget of power amplifier.

폭기로 설계되었고, 가변감쇄기 블록으로 출력을 조정할 수 있도록 하였다. 3단 구동증폭기는 S2P 파일로 해석하였다. 최종단 트랜지스터는 저주파 대역에서 범용적으로 사용하는 NXP사의 LDMOS(laterally diffused metal oxide semiconductor) MRFE6VP100HR를 사용하였고, 50 V 동작 부품이다. PEP(peak envelope power)가 100 W이며, 이득은 25 dB 이상의 특성을 보인다. 제조사에서 제공하는 대신 호 모델 Library를 적용하고, ADS(advanced design system) 시뮬레이터로 대신호 특성을 해석하기 위하여 HB(harmonic balance) 시뮬레이션을 하였다. 그림 3은 전력증폭기의 이득과 출력 특성이다. 증폭기 출력은 45 dBm이고 OBO(output back-off)는 트랜지스터 기준으로 4.5 dB(45.5 dBm)이다. CFB 전력증폭기는 I/Q 변조기의 낮은 출력(-17 dBm \pm 3 dB)을 고려하여 62 dB의 이득을 갖도록 4단 증폭기로 설계하였다. 그림 4는 최종단 트랜지스터의 정합 회로이고, 그림 5는 시뮬레이션 결과이다. CFB 선형화기의 IMD 개선량을 26 dB로 목표하였기 때문에, 45 dBm 출력에서 전력증폭기의 IMD는 -14 dBc 이하를 목표로

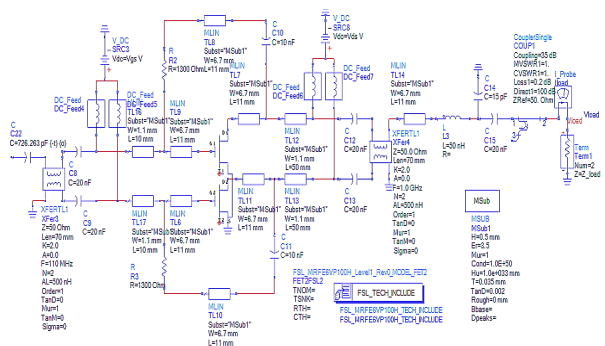


그림 4. 최종단 증폭기 시뮬레이션

Fig. 4. Final stage amplifier simulation.

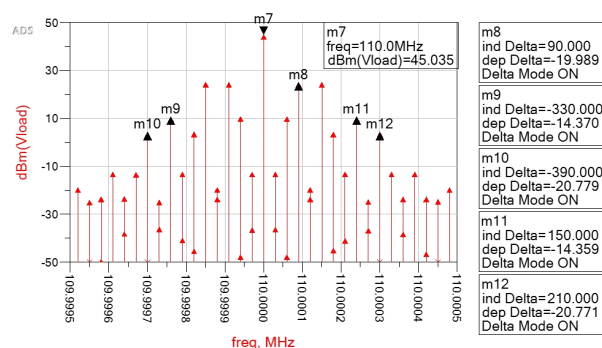


그림 5. CFB 증폭기의 IMD 특성

Fig. 5. IMD characteristics of CFB amplifier.

하였다. 이때 증폭기의 개별 변조신호 변조지수는 20 % 특성을 유지하도록 I/Q 변조기 신호원의 DC와 Amplitude를 조정하였다.

그림 5는 CFB 전력증폭기의 시뮬레이션 결과이다. 반송파와 변조신호원(90 Hz, 150 Hz)의 혼변조 성분들은 ± 30 Hz의 배수 주기로 나타나며, 90 Hz와 150 Hz의 고조파 성분들도 더해진다. 이 모든 신호를 본 연구에서는 IMD로, 변조신호 크기를 기준으로 dBc로 정의했다. CFB용 전력 증폭기는 출력 45 dBm(M7), 변조도 20 % (M8)에서 IMD는 변조신호대비 -14.36 dBc(M11)이다.

3-3 I/Q 변 · 복조기 및 전력증폭기 연동 시뮬레이션

I/Q 변조기와 복조기의 성능은, 이득과 위상의 오차로 인한 출력변화 및 좌·우 IMD 불일치 특성이 나타난다는 시뮬레이션 및 측정 값들이 발표되어 왔다^{[5]~[7]}. 그림 6은 Cartesian feedback 시스템 특성을 분석하기 위하여 설계한 I/O 변조기와 복조기 설계를 보여주고 있다.

입력 변조신호(I, Q)는 동일한 위상으로 인가하고, 변조도 제어를 위하여 DC와 AC Amplitude를 조정하였다. 인가신호와 복조신호를 비교하는 오차증폭기를 설계하고, 위상오차를 보정하기 위하여 복조기의 LO 입력에 위상가변기를 적용하고, 복조된 기저대역 신호와 피드백 신호의 크기를 조절할 수 있도록 설계하였다.

그림 7 및 그림 8에서 변조기 입력신호(I , Q), 복조기 신호(I_{DE} , Q_{DE}) 그리고 오차증폭기의 출력 신호(I_E , O_E)를 측정하였다. 변조기와 복조기의 신호가 이득과 위

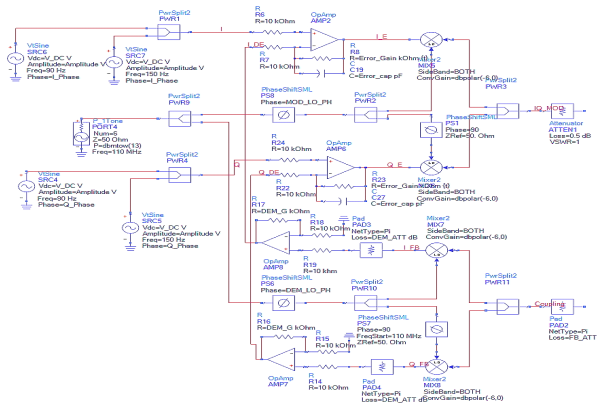


그림 6. CFB I/Q 변조기 & 복조기
Fig. 6. CFB I/Q modulator & demodulator.

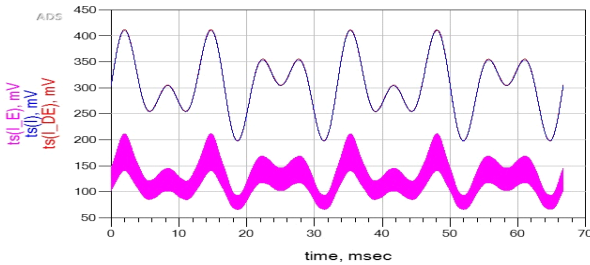


그림 7. I & I_DE & I_E 신호 시뮬레이션
Fig. 7. I & I_DE & I_E signal simulation.

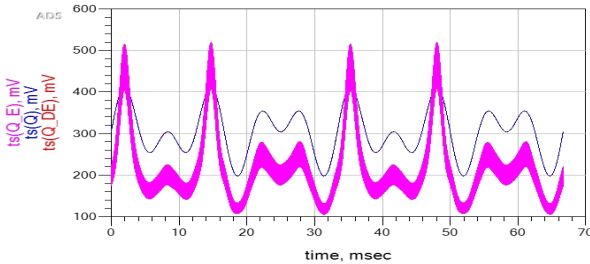


그림 8. Q & Q_DE & Q_E 신호 시뮬레이션
Fig. 8. Q & Q_DE & Q_E signal simulation.

상이 동일해지면 오차 증폭기의 출력 신호는 안정화 된다. 이때 오차증폭기 출력은 왜곡돼 있음을 확인할 수 있었다. 그림 9는 CFB 전력증폭기의 시뮬레이션 결과이며, 표 2에서 CFB 선형화 전의 IMD 특성(그림 5)과 비교하여 정리하였다. 전력증폭기만의 -14.36 dBc이고, CFB 선형화 -55.23 dBc IMD 특성을 얻었으며, IMD 개선량은 40.87 dB, 다른 차수까지 고려한 IMD 개선량은 37.90 dB

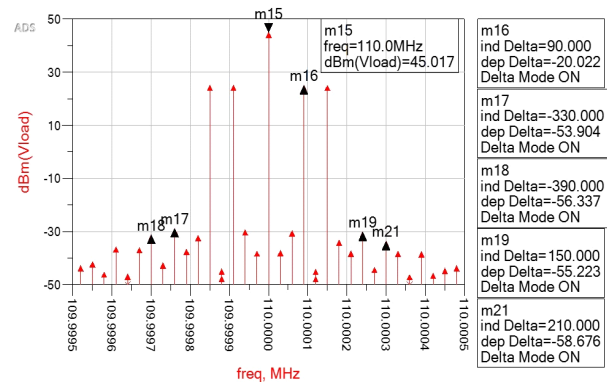


그림 9. CFB 전력증폭기 특성
Fig. 9. Characteristics of CFB power amplifier.

표 2. CFB 개루프와 폐루프의 IMD 특성
Table 2. IMD characteristics of CFB open loop and closed loop.

Items	IMD	
CFB open loop [Fig. 5]	-14.36 dBc (M11)	-20.77 dBc (M10)
CFB closed loop [Fig. 9]	-55.23 dBc (M19)	-58.67 dBc (M21)
Improvement of IMD	40.87 dB	37.90 dB

이다. 차수에 따른 IMD 개선량의 좌우 불균형 특성이 있었다.

IV. 제작 및 측정

제작한 전력증폭기 및 Cartesian feedback 선형화 시험을 위한 전체 시험 구성을 그림 10에서 보여주고 있다. 설계한 CFB용 전력증폭기는 3단 구동 증폭기이고, 최종단은 MRFE6VP100HR을 사용하였다. 증폭기의 안정도 향상 및 넓은 대역폭 특성을 위하여 RC 부궤환 회로를 적용하였다. 입력은 25 ohm, 출력은 50 ohm의 Balanced to balanced transmission line transformer와 페라이트 코어를 사용하였고, 출력단 페라이트 코어는 열에 의한 특성 변화가 많기 때문에 열전달이 우수한 동체질 플레이트에 직접 방열을 하였다. 출력단에서 인덕터와 커패시터로 IMD와 효율 특성 매칭을 하였다. 전체 증폭기 이득은 62 dB이고 최종단 트랜지스터의 이득은 24 dB이다. 또한

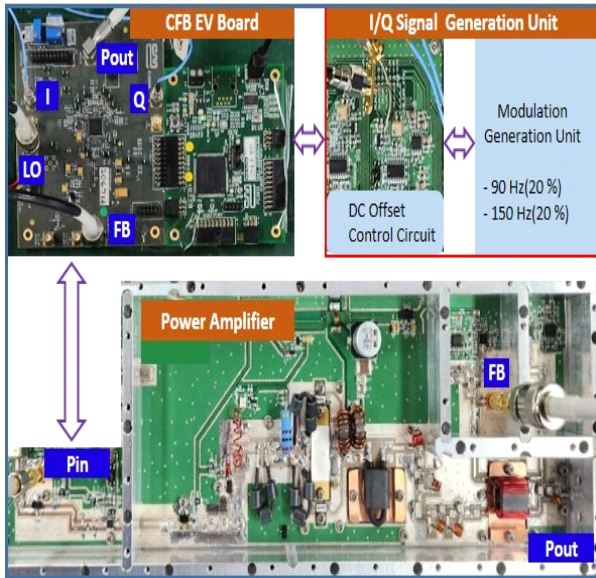


그림 10. CFB 전력증폭기 시험 구성
Fig.10. CFB power amplifier test configuration.

Cartesian feedback 시험을 위하여 I/Q 변조기·복조기는 CML사의 CMX998 chip이 적용된 Evaluation 보드를 사용하였다. 주파수는 범위는 30 MHz~1 GHz이고, 신호대역폭은 200 kHz까지 적용 가능하며, GUI를 이용하여 변조기와 복조기의 이득은 30 dB까지 가능하며, L/O 위상은 348.75° 위상 조절이 가능하다. 오차증폭기는 기본 설정값이 있으며, 외부소자를 튜닝하면서 이득을 조정하였다. 변조신호 발생기는 합성신호(90 Hz+150 Hz)를 생성하며, GUI로 변조도 개별 제어를 할 수 있다. I/Q 신호는 동기상으로 입력하고, 인가 신호에 부가 회로를 연동하여 I/Q 신호의 DC offset을 조정하였다.

4.1 측정 결과

CFB 선형 전력증폭기의 연동시험 측정 결과를 그림 11에서 제시하였다. CFB I/Q 변조기 신호를 생성하여 전력증폭기에 인가하고 측정한 결과는 Open loop로, 그 신호를 복조하여 CFB 선형화로 혼변조 IMD 특성을 개선한 측정된 결과는 Closed loop로 표시된 그래프이다. 출력 45 dBm에서 IMD는 -43.95 dBc 특성을 얻었고, CFB 선형화로 28.22 dB IMD 개선 효과를 보였다. 표 3에서 요구성능 대비 시뮬레이션 및 제작·측정값을 비교 정리하였다.

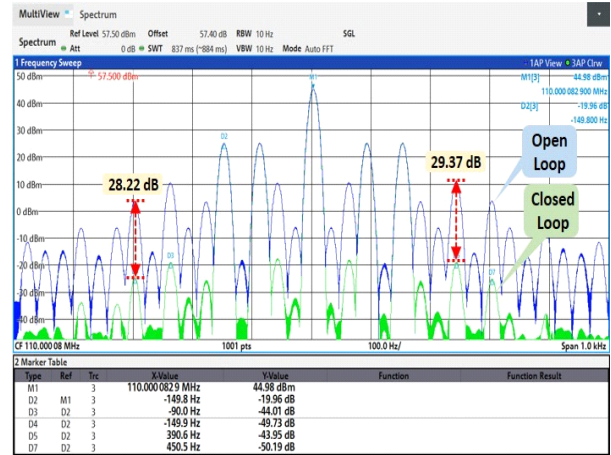


그림 11. CFB 개루프와 폐루프의 전력증폭기 특성
Fig. 11. Power amplifier characteristics of CFB open-loop and closed-loop.

표 3. 요구성능 대비 시뮬레이션 및 측정값 특성
Table 3. Characteristics of simulation & measurement compared to required performance.

Items		Specification	Simulation	Measurement
Freq. range		108 ~ 112 MHz		
Pout		45 dBm		
Mod. depth (90 Hz, 150 Hz)		20 % (-19.98 dBc)		
IMD (@ mod. signal ref.)	Open loop	-14 dBc max.	-14.36 dBc -20.77 dBc	-14.16 dBc -21.51 dBc
	Closed loop	-40 dBc max.	-55.23 dBc -58.67 dBc	-43.95 dBc -49.73 dBc
Improvement of IMD		26 dB min.	40.87 dB 37.90 dB	29.37 dB 28.22 dB

3-1 설계 목표에서 CFB 전력증폭기의 요구 성능을 제시하였고, CFB 선형화 시뮬레이션으로 IMD 개선이 가능함을 확인하였다. 45 dBm 출력에서, 시뮬레이션은 37.90 dB, 제작·측정 결과는 28.22 dB의 IMD 특성이 개선되었다.

4.2 연구결과 비교

기준에 설계·제작한 아날로그 변조신호 제어방식의 J급 전력증폭기는 출력 45 dBm에서 PAE가 24.4 %였다^{[9],[10]}. 본 논문에서의 CFB 선형 전력증폭기의 특성과 비교하여 표 4에 정리하였다. PAE는 40.12 %로 기존 제작

표 4. J급 전력증폭기와 CFB 전력증폭기 효율 비교
Table 4. Efficiency comparison between Class J and CFB power amplifier.

Items	Class J PA ^[9]	CFB PA
Freq. range	108~112 MHz	
Pout	45 dBm	
Modulation depth (90 Hz, 150 Hz)	20 % (-19.98 dBc)	
IMD (@ mod. signal ref.)	-38 dBc max.	-43.95 dBc
PAE	24.38 %	40.12 %
Improvement of PAE	15.74 %	

표 5. 이전 CFB 연구 결과들과 비교
Table 5. Comparison with previous CFB works.

Ref.	Freq.	Input signal	Pout	Improvement of IMD
[4]	900 MHz	80 kHz, 2 tone	37 dBm	35 dB min.
[6]	800 MHz	CQPSK : 6.25 kHz BW 2 kHz, 2 tone	34.8 dBm 35 dBm	20 dB min. 30 dB min.
[7]	800 MHz	TETRA: 25 kHz BW	30 dBm	30 dB min.
[8]	860 MHz	12.5 kHz, 2 tone	43 dBm	22.4 dB min.

한 전력증폭기보다 15.74 % 개선되었다. 또한 표 5에서는 이전 CFB 선형화 연구 결과들을 정리하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 전력증폭기 효율을 개선하기 위하여 Cartesian feedback 선형화 방법을 연구하고, 전력 증폭기, I/Q 변조기와 복조기 회로를 모델링하여 시뮬레이션하고, 제작하여 특성을 측정한 결과, 시뮬레이션과 유사한 특성을 얻었고, 요구성능 규격을 만족함을 확인하였다. 특히, CFB 루프제어를 위한 오차증폭기 및 위상 제어뿐만 아니라, AM 변조도 제어를 위하여 DC offset 회로를 적용하여 반송파의 크기를 정밀 제어하였다. 변조 주파수가 90 Hz와 150 Hz이며 AM(amplitude modulation) 변조도가 각각 20 %인 변조 신호에서, CFB 선형 전력증폭기는 45 dBm

출력에서 28.22 dB의 IMD 개선 효과가 있으며, PAE는 40.12 %의 고효율 특성을 얻었다. 기존 제작한 J급 전력증폭기와 비교하여 15.74 % 개선 효과를 얻었다. 향후 증폭기의 안정도 향상을 위하여 LO 위상제어, 오차증폭률 조정, 그리고 주파수 특성에 맞는 부가필터 구현에 관한 검토 및 개선연구가 더 진행되어야 한다. 전력증폭기의 혼변조 IMD를 개선하기 위하여 CFB 선형화를 적용하여, 계기착륙시설용 송신부의 IMD 및 효율 개선에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] Steve C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, 2nd ed. Norwood, MA, Artech House, pp. 397-426, 2006.
- [2] J. S. Kim, W. J. Choi, Y. C. Choi, H. S. Oh, and Y. G. Yang, "3.5 GHz high-efficiency asymmetric Doherty power amplifier design using a complex combining load", *The Journal of Korean Institute of Electronics Engineering and Science*, vol. 32, no. 8, pp. 708-716, Aug. 2021.
- [3] B. Razavi, *RF Microelectronics*, Saddle River, NJ, Prentice-Hall, pp. 313-320, 1998.
- [4] J. S. Mandeep, A. Lokesh, S. I. S. Hanssan, M. N. Mahmud, and M. F. Ain, "Design of Cartesian feedback RF power amplifier for L-band frequency range", *Progress in Electromagnetics Research B*, vol. 2, pp. 207-222, Nov. 2008.
- [5] J. L. Dawson, T. H. Lee, "Cartesian feedback for RF power amplifiers linearization", in *Proceeding for the 2004 American Control Conference*, Boston, MA, Jul. 2004, pp. 361-366.
- [6] M. S. Kim, H. J. Cho, G. H. Ahn, S. C. Jung, H. C. Park, and J. H. Van, et al., "High-power Cartesian feedback transmitter design for 860 MHz band", *The Journal of Korean Institute of Electronics Engineering and Science*, vol. 18, no. 2, pp. 183-190, May 2007.
- [7] M. S. Kang, Y. J. Chong, and S. H. Oh, "Design of Cartesian feedback loop linearization chip for UHF

band", *The Journal of Korean Institute of Electronics Engineering and Science*, vol. 21, no. 5, pp. 510-518, May 2010.

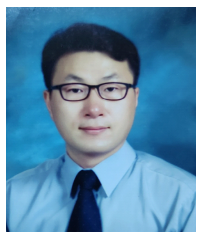
- [8] D. S. Oh, J. Y. Kim, S. H. Chun, and J. H. Kim, "A study on 800 MHz 1 W Cartesian feedback linearized power amplifier for TETRA signal", *The Journal of Korean Institute of Electronics Engineering and Science*, vol. 7, no. 4, pp. 76-85, Aug. 2007.

- [9] S. K. Kim, K. H. Koo, "Design and amplitude modulation characteristics with bias of class J power amplifier for CSB", *Journal of Advanced Navigation Technology*, vol. 27, no. 6, pp. 849-845, Dec. 2023.

- [10] S. K. Kim, K. H. Koo, "System analysis and power amplifier design for ILS localizer", *Journal of Advanced Navigation Technology*, vol. 28, no. 1, pp. 116-112, Feb. 2024.

김 수 경 [한국공항공사/차장]

<https://orcid.org/0009-0000-8136-0996>



1997년 2월: 인천대학교 전자공학과 (공학사)

1999년 8월: 인천대학교 전자공학과 (공학석사)

2012년 7월: 한국공항공사 항행장비사업센터 연구원

2012년 3월~현재: 인천대학교 전자공학

과 박사과정

[주 관심분야] 전력증폭기 설계, 레이더, 항행시스템 설계 등

구 경 현 [인천대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-9506-9243>



1981년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1983년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)

1991년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)

1987년~현재: 인천대학교 전자공학과 교

수

[주 관심분야] 마이크로파 회로 및 시스템 설계, 고효율 전력증폭기 설계, 항행시스템 설계 등