



레이더용 X-대역 고출력 전력 증폭모듈 설계

최선열*¹, 이복형**², 이광호*²

Design of X-band High Power Amplifier Module

Sun-Youl Choi*¹, Bok-Hyung Lee**², and Gwang-Ho Lee*²

요 약

전력증폭기의 성능은 새로운 기술의 개발로 끊임없이 발전하고 있다. 과거 진공관 형태로 시작한 전력증폭 모듈은 현대로 오며 고집적화 된 MMIC의 형태로 발전 하였으며, 최근에는 GaN 소자를 활용에 전력 증폭이 효율을 올리고자 하는 기법들이 연구되고 있다. 특히나 레이더는 일반적으로 X-대역을 많이 사용하게 되는데, 본 논문에 사용되는 전력 증폭모듈(Power Amplifier Module)은 높은 출력을 요구한다. 레이더의 출력에 따라 레이더 탐지거리에 밀접한 영향을 주기 때문에, 보다 먼 거리 까지 목표를 탐지하기 위해 높은 출력의 성능을 가지는 증폭모듈이 요구된다. 본 논문에서는 X-대역에서 사용 되는 고출력 전력 증폭모듈에 대해서 논할 예정이다. 대역 내 전력 최고치는 25W가 출력되었고, 불요파는 약 -65dBc, 2nd 고조파 -50dBc, 3rd 고조파 -70dBc 가 측정되었다.

Abstract

Today, Power amplifier performance has endlessly evolved to new techniques. In the Past, the power amplification module started in the form of a vacuum tube has been developed into a highly integrated MMIC type that has been modernized. In recent years, techniques for increasing the efficiency of power amplification using GaN have been studied. In particular, Airborn radars generally use the X-band, and the amplification module used here requires high power output. Since the radar output power affects radar detection distance closely, an amplification module with high output performance is required to detect the target to a longer distance. In this paper, we will discuss high power amplification module used in X-band. One of the key performance parameters are more than 25W over the whole frequency range. The spurious has 65dBc. The 2nd harmonic is measured about 50dBc, and The 3rd harmonic is measured about 70dBc.

Keywords

radar detection distance, PAM, power amplifier performance, harmonic, isolation, efficiency

* 한화시스템 시스템 부문

- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0002-4604-2973>

- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0001-8003-2800>

** 한화시스템 시스템 부문(교신전자)

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0410-9455>

· Received: Jun. 21, 2018, Revised: Aug. 13, 2018, Accepted: Aug. 16, 2018

· Corresponding Author: Bok-Hyung Lee

Dept. of Hanwha Systems 491-23, Gyeongdong-Ro, Namsa-Myun,

Cheoin-Gu, Yongin-City, Gyeonggi-Do, 17121, Korea

Tel.: +82-31-8020-7545, Email: bokhyung1228.lee@hanwha.com

1. 서 론

오늘날 방위 산업이 발달함에 따라서 국방력을 강화하기 위한 여러 기술들이 개발되고 있다. 그 중 레이더는 목표를 감지하고 위치를 찾기 위한 장비이다. 레이더의 탐지 거리가 멀수록 상대 전투기를 먼저 탐지하여 포격을 할 수 있기 때문에 레이더 성능 중 탐지거리가 가장 중요한 성능이다. 레이더의 원리는 목표를 향해 RF신호를 방사하고, 목표에 맞고 되돌아오는 신호를 분석하여 물체의 위치와 속도정보를 알아낸다. 즉, 더 높은 출력을 가진 레이더일수록 더 멀리 있는 목표를 식별 할 수 있다. 높은 출력을 가지기 위한 고출력증폭기는 과거 진공관 전력증폭기(마그네트론, 클라이스트론 등등)부터 개발이 되었다. 진공관 형태의 전력증폭기는 높은 고장률과, 높은 동작 전압을 필요로 했기에 신뢰성과 효율성에 있어 불리하다. 이를 개선한 것이 반도체소자를 이용한 전력증폭기이다. 상대적으로 낮은 전원 전압과 작은 면적에 설계/제작 할 수 있어 큰 장점을 가지고 있다. 또한 반도체 소자는 진공관 전력증폭기보다 선형도가 뛰어나고, 이와 관련된 고조파 성분 및 상호변호로 인한 왜곡현상이 적어 효과적인 설계를 할 수 있다. 반도체 소자 중 GaN(Gallium Nitride)는 Silicon 소자보다 높은 Band Gap 특성을 가지고 있어 고효율의 높은 출력을 가질 수 있다[1].

본 논문에서는 GaN 소자를 이용하여 증폭기를 구성하였다. 총 3단의 증폭기를 사용하였고, 최종 출력에서 나오는 비선형성을 줄이기 위해 LPF(Low Pass Filter)를 사용하여 고조파 성분을 줄였다.

또한 본 논문의 증폭모듈을 컨트롤 하기 위한 제어 보드를 제작하여 RS-232 통신을 통해 PRI(Pulse Repetition Interval), PW(Pulse Width)를 생성하였고, 모듈의 BIT(Built in Test) 정보를 주고받는 역할을 수행하였다. 설계과정에서 목표사양을 만족시키기 위한 여러 기능을 포함한 모듈형태로 설계하였다. 여러 대역의 증폭기가 개발되고 있지만, 본 논문에서는 레이더 X-대역 고출력 증폭모듈(PAM)에 대한 논할 예정이다. 다양한 검증을 통해서 설계에 반영할 부분을 도출하였다. 본 논문의 2장에서는 레이더용 X-대역 PAM에 적용할 전체 시뮬레이션을 수행하고, 그에 따른 제작 및 시험을 실시했으며, 최종으로 결과를 분석하고 최종 고려사항들을 제시 하였다. 마지막으로 3장에서는 결론을 맺었다.

II. 관련 연구

2.1 시뮬레이션

본 논문에서 설계된 X-대역 전력 증폭모듈의 회로도는 다음과 같다. 그림 1은 전력 증폭모듈의 설계 시뮬레이션 버짓이다. 목표사양을 만족시키기 위한 시뮬레이션 결과를 식 (1)을 근거로 필요한 전력 증폭 출력이 44dBm 정도가 계산 되었다.

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda}{(4\pi)^3 P_r}} \quad (1)$$

P_t 는 전송전력, P_r 은 반송전력, G_t 은 안테나 전송이득, G_r 은 안테나 반송이득, σ 은 RCS, 구하고자 하는 R은 목표와의 거리이다.

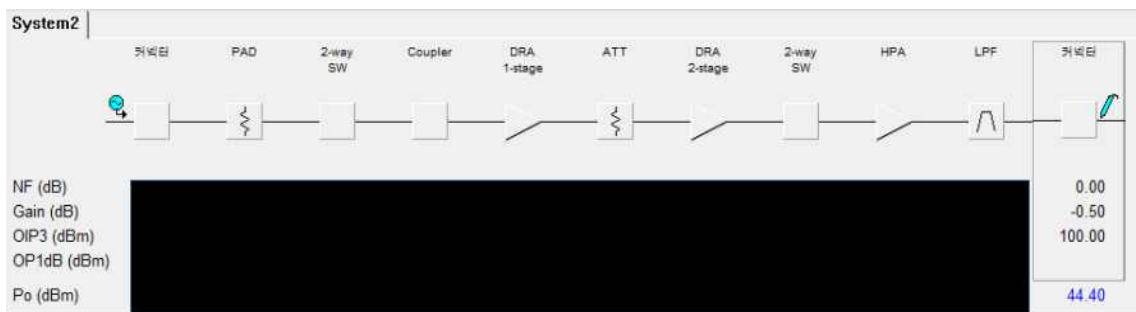


그림 1. PAM 버짓 시뮬레이션

Fig. 1. PAM budget simulation

표 1. 전력 증폭기 목표 사양
Table 1. Power amplifier target spec

	Contents	Target Spec
RF	Input Frequency	0 ~ 00 GHz(X-band)
	Input Power	+8 dBm
	Output Frequency	0 ~ 00 GHz(X-band)
	Output Power	44 dBm
	Droop	Less than 1 dB
	Spurious	Less than -60 dBc
	Harmonic	Less than 2nd : -40 dBc Less than 3th : -40 dBc
	VSWR	1.5 : 1

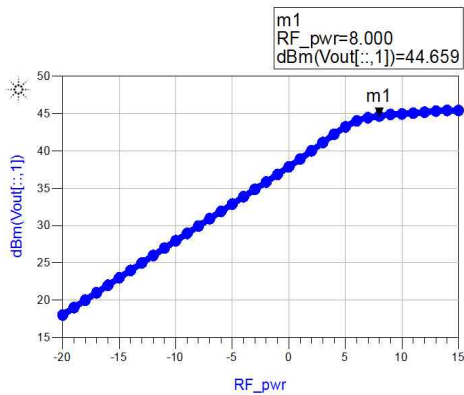


그림 2. 입출력 전력 시뮬레이션
Fig. 2. In/out power simulation

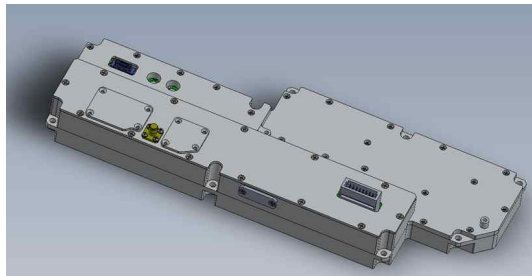


그림 3. PAM 형상
Fig. 3. PAM shape

본 논문의 증폭기는 최종 안테나 채널에서 출력되는 전송전력을 만들어 주는 T/R(Transmit/Receive) 모듈에 인가된다. 이를 위해 본 논문의 증폭기의 출력인 44dBm에 안테나 채널수를 나눈값이 안테나 T/R 모듈의 입력으로 들어가고, 최종 Pt(전송전력)에 영향을 준다. 전력 증폭 출력이 44dBm를 만족시키기 위해서 전체 3 stage를 사용 하였다. 앞쪽의 2 stage는 CMOS 증폭기를 사용 하였고, 마지막 증폭기는 GaN 소자를 이용한 고출력 증폭기를 이용해 설계 하였고 송신 단자와 수신단자는 서로 반대 방향에 위치하여 물리적으로 격리도를 확보 하였다 [2]. PAM이 사용하는 대역 외에 대한 주파수 성분을 줄이기 위해 필터를 사용하여 제거하였다[3]. 회로의 입출력 모니터링을 위해 커플러를 추가하였을 경우, 출력 손실을 0.5dB 정도로 예상 할 수 있다. 회로 시뮬레이션을 통해 전력포화영역에서 동작하도록 설계하였고, Sweep 후, 입출력 값을 확인 하며, 최종 출력 전력값 과 입력에 따른 출력 사용 범위를 확인 할 수 있으며, 그림 2에 결과로 나타내었다. 1dB의 입력 값은 약 8dBm 정도로 확인이 되었고 입력을 -20dBm부터 15dBm까지 Sweep을 하였을 때, 출력의 값은 약 44dBm출력을 얻었다. 그림 3은 증폭모듈의 형상이이고, 그림 4는 PAM의 블록도 이다.

2.2 전력 증폭모듈 구현 및 측정 결과

시뮬레이션 블록도와 동일하게 회로를 구현 하여 측정하였다. 그림 5 ~ 9까지는 측정한 파형이다. 측정한 파형을 표 2에 정리하였다. 대부분의 결과가 시뮬레이션 단계에서 예상한 결과와 유사하게 나온 것으로 확인 하였다.

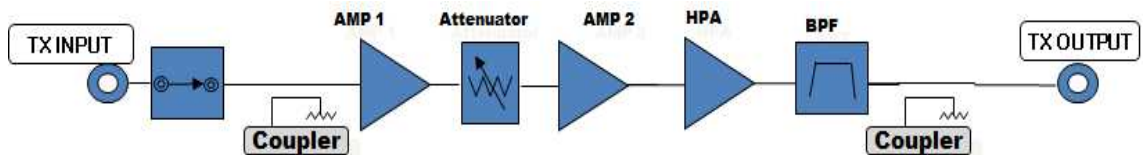


그림 4. PAM 회로 블록도
Fig. 4. PAM circuit block

22 레이더용 X-대역 고풍력 전력 증폭모듈 설계

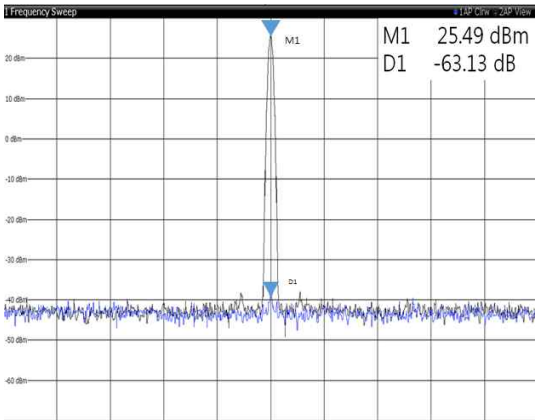


그림 5. 증폭모듈 Isolation
Fig. 5. PAM isolation

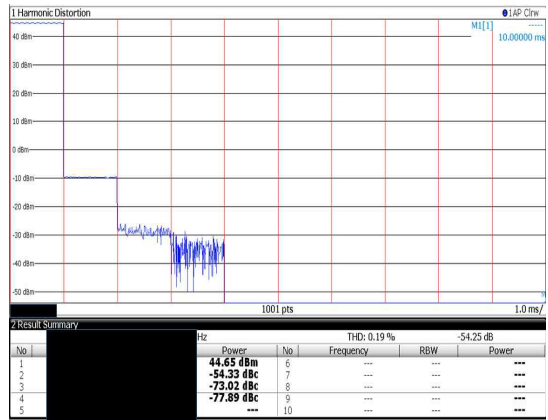


그림 8. 증폭모듈 고조파
Fig. 8. PAM harmonic



그림 6. 증폭모듈 출력전력
Fig. 6. PAM output power

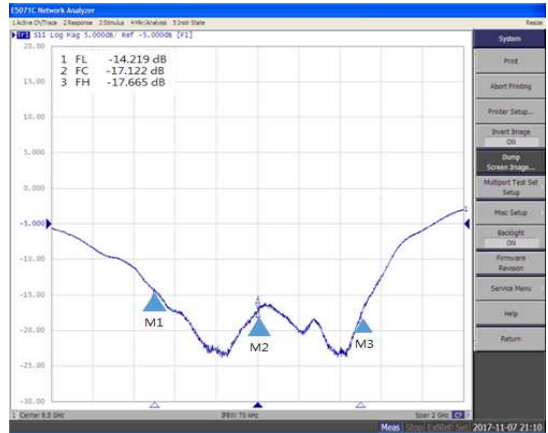


그림 9. 증폭모듈 정재파비
Fig. 9. PAM VSWR

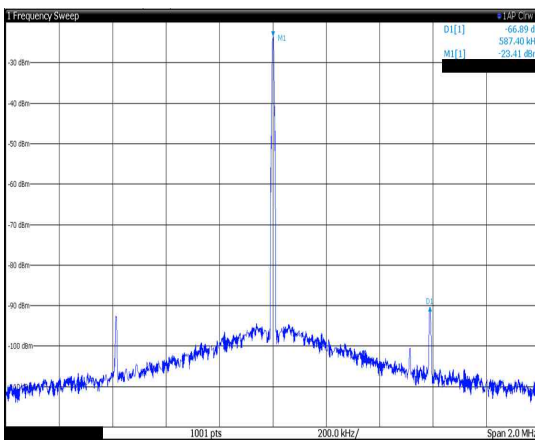


그림 7. 증폭모듈 불요파
Fig. 7. PAM spurious

표 2. 전력 증폭기 측정결과

Table 2. Power amplifier target spec

Contents		Target Spec	
RF	Input Frequency	0 ~ 00 GHz(X-band)	
	Input Power	+8 dBm	
	Output Frequency	0 ~ 00 GHz(X-band)	
	Output Power	44.69 dBm	
	Drop	0.65 dB	
	Spurious	-65.54 dBc	
	Harmonic	2nd	-54 dBc
		3th	-73 dBc
	VSWR	1.3 : 1	

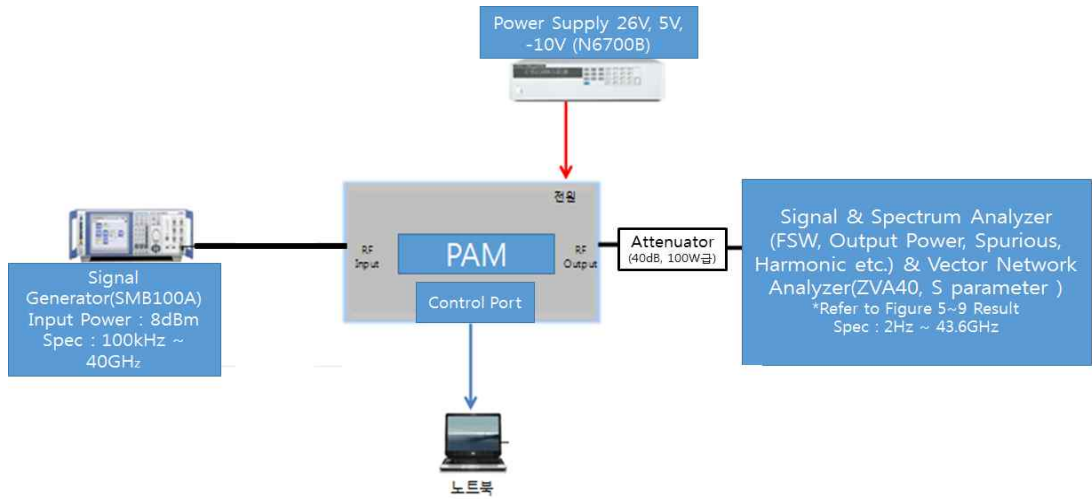


그림 10. 측정 구성도
Fig. 10. Test configuration

그림 10은 시험 측정 구성도이다. PAM의 측정을 위해 냉각판이 포함된 치구를 제작 후, 노트북 GUI를 통해 PAM을 제어 하였다. PAM의 입력은 X-대역의 신호를 발생시킬 수 있는 넓은 대역(100kHz ~ 40GHz)에 신호발생기를 통해 8dBm의 입력 전력을 인가하였으며, 스펙트럼 분석기 및 네트워크 분석기로 출력을 확인 하였다 출력확인 시, VSWR 및 시험환경 Cable 손실은 네트워크 분석기를 이용하였으며, 출력, 고조파, 불요파, 평탄도는 스펙트럼 분석기를 이용하였다. 확인 시 PAM의 출력 전력이 높기 때문에 계측기를 보호하기 위해 감쇄기를 통하여 계측기로 인가하였다[5].

2.3 측정 결과 분석

대부분의 결과가 시뮬레이션 결과와 유사하게 나옴을 확인하였다. 제작 시 선로 손실 등이 있지만 버짓 시뮬레이션 단계에서 반영되었기 때문에 출력이 거의 동일하게 측정되었다. 동작 구간 중 출력을 유지하기 위한 커패시터를 삽입하여 출력 Droop을 확보하였고, 사용된 전원 스위칭 회로로 불요파가 생성되었지만 목표 성능 내로 측정이 되었다. 이 부분은 회로의 튜닝으로 충분히 값을 더 확보 할 수 있다[6]. 입력의 변화에 안정된 출력을 얻기 위해 포화영역에서 동작하도록 설계되었다. 출력에 X-band

의 2nd 제거비 -30dBc 필터를 사용하여 고조파 성능을 확보하였다. 표 3에 목표대비 성능과 유사제품과 비교하여 정리하였다[7][8].

표 3. 결과 비교

Table 3. Result comparing

Contents	Target	PAM	Ref(9)	Ref(10)
Frequency	X-band	X-band	X-band	X-band
Output Power(dBm)	44	44.69	48	48
Power Gain	36	36.69	40	35
VSWR	1.5:1	1.3:1	1.5:1	1.5:1
2nd Harmonic(dBc)	-40	-54	-50	-
3rd Harmonic(dBc)	-40	-73	-50	-
Droop(dB)	1	0.65	1	-

2.4 설계 유의사항

입/출력을 기준으로 회로들이 대칭되게 설계 되는 것이 전기적 특성에 유리하다. 뿐만 아니라 증폭 모듈의 출력이 다음 단의 입력으로 들어갈 때 선로 손실을 고려해야 한다. 전기적 관점에서 보면 PAM 내부에 쓰인 능동소자들을 선형구간에서 사용을 해야 한다. 포화영역에서 사용을 하게 되면 고조파 성분이 높게 나타나기 때문에, 설계 시 목표성능에 대한 명확한 선택이 필요하다[9]. 성능시험을 할 때 시, 노트북 GUI(Graphical User Interface)를 통해 스

위치 컨트롤 및 동작을 확인을 할 수 있어야 한다. GUI를 통해 확인이 불가능하다면 TP(Test Point)를 PCB에 삽입하여 각 구간별로 동작을 확인 하는 것이 유리하다. PAM 내에 여러 능동소자 및 스위치가 쓰이기 때문에 디버깅하기 위해 이러한 부분은 필수이다. RF/아날로그 BIT를 구현하여 제어보드로 신호처리 후 확인하는 것도 방법이다.

III. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 레이더용 X-대역 고출력 증폭 모듈에 대한 M&S에서부터 실제 제작 및 측정 결과까지 내용을 기술하였다. 항공에 사용될 시 실제 항공에 탑재 되었을 때 발생하는 주위 환경에 대해서 고려해야 한다.

따라서 MIL-STD-461F, MIL-STD-810G 규격을 만족하는 EMI 차폐 기능이나 온도보상 기능을 갖는 모듈을 설계하기 위해서는 회로의 크기가 커지게 된다. 그에 따라 물리적인 커넥터 및 기구적으로 고려해야 할 사항이 증가하게 된다[10]. 따라서 환경 요소와 성능에 대한 부분도 동기에 소려한 설계가 필요하다. 본 PAM 설계과정을 통해 발생된 보완사항을 정리해서 추후 개발될 증폭모듈은 조금 더 최적화되고 강건한 설계를 진행할 예정이다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다. 회로 설계 프로그램을 통해 PAM의 전체 버짓 설계 및 회로 단위의 입출력 전력 및 특성 확인을 수행하였다. 제작 후 측정결과로 목표성능 출력레벨 44dBm 이상, 출력 평탄도 1dB 이하, 불요파 -60dBc 이하, 고조파 2nd, 3rd -40dBc 이하, 정재파비 1.5:1을 모두 만족하였고, 실제 측정값은 출력레벨 44.69dBm 이상, 출력 평탄도 0.65, 불요파 -65.54dBc, 고조파 2nd -54dBc, 3rd -73dBc, 정재파비 1.3:1이 측정되었다.

본 논문에서 제작한 레이더용 X-band 고출력증폭기는 레이더용으로 RF 신호를 증폭시키기 위한 모듈로 널리 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

[1] Behzad Razavi, "Principles of Data Conversion System Design", IEEE Press/Wiley, Mar. 2001.

[2] L. W. Couch, "Digital and Analog Communications Systems", Fourth Edition, New York, Macmillan pp. 353-475, Aug. 1962.

[3] H. T. Friis, "Noise Figure of Radio Receivers", Proc. Ire, Vol. 32, No. 7, pp. 419-422, Jul. 1944.

[4] J. Bussganag, L. Ehrman, and J. W. Graham, "Analysis of Nonlinear Systems with Multiple Inputs", IEEE, Vol. 62, No. 8, pp. 1088-1119, Aug. 1974.

[5] B. Razavi, "A Study of Injection Locking and Pulling in Oscillators", IEEE J. of Solid-State Circuits, Vol. 39, No. 9, pp. 1415-1424, Sep. 2004.

[6] R. Adler, "A Study of Locking Phenomena in Oscillators", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 36, No. 10, pp. 810-815, May 1973.

[7] M. S. Kim and Y. S. Koo, "Design of X-Band High Efficiency 60 W SSPA Module with Pulse Width Variation", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 23, No. 9, pp. 1079-1086, Sep. 2012.

[8] Y. G. Jang and M. S. Kim, "An implementation of 60W X-band Cascade SSPA for Marine Radar System", The Journal of Korea Institute of Electronic Communication Sciences. Vol. 7, No. 1 pp. 1-7, Feb. 2012.

[9] J. R. Long and M. A. Copeland, "The Modeling, Characterization, and Design of Monolithic Inductors for Silicon RF ICs", IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 32, No. 3, pp. 357-369, Mar. 1997.

[10] W. H. Sansen and R. G. Meyer, "Distortion in Bipolar Transistor Variable-Gain Amplifier", IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 8, No. 4, pp. 275-282, Aug. 1973.

저자소개

최 선 열 (Sun-Youl Choi)



2013년 2월 : 전북대학교
전자공학과(공학사)
2016년 8월 : 경북대학교
전자공학부(공학석사)
2016년 9월 ~ 현재 : 한화시스템
시스템 부문 연구원
관심분야 : RF 증폭기, RF

다기능칩, MMIC, Radar Hardware

이 복 형 (Bok-Hyung Lee)



1999년 2월 : 동국대학교
전자공학과(공학사)
2001년 2월 : 동국대학교
전자공학부(공학석사)
2006년 2월 : 동국대학교
전자공학부(공학박사)
2006년 2월 ~ 현재 : 한화시스템

연구원

관심분야 : 능동 위상 배열 시스템, RFIC, RF 고출력
증폭기 설계, 송수신 Front-End 설계

이 광 호 (Gwang-Ho Lee)



2014년 2월 : 한국항공대학교
정보통신공학과 학사 졸업
2016년 8월 : 한국항공대학교
정보통신공학과 석사 졸업
2016년 7월 ~ 현재 :
(주)한화시스템 연구원
관심분야 : AESA 레이더, 디지털

신호처리, VLSI 설계