

논문 2014-51-9-6

무인항공기 가시선 데이터링크 Ku 대역 RF 송수신 시스템 설계

(Ku-Band RF Transceiver System Design for UAV Line-Of-Sight Datalink)

최 재 원*, 김 지 훈*

(Jaewon Choi[©] and Jihoon Kim)

요 약

본 논문에서는 무인항공기 가시선 데이터링크 Ku 대역 RF 송수신 시스템을 설계하였다. RF 송수신 시스템은 송수신반, RF 전단반, 고출력증폭반으로 구성되어 있다. 송수신반은 주파수 상/하향 변환 기능과 채널 변경 기능을 제공하며, RF 전단반은 송/수신 신호 이중화, 안테나 선택, 소신호 증폭, 수신신호 외 주파수 필터링 기능을 제공한다. 고출력증폭반은 Ku 대역 전력증폭과 송신출력 가변(고/중/저/Mute) 기능을 제공한다. 송수신반의 주파수 상/하향 변환은 슈퍼헤테로다인 방식으로 구현하였다. RF 송수신 시스템은 대용량 고속 데이터의 신뢰성 있는 송수신을 위하여 광대역 고선형 특성을 갖도록 설계하였다. 또한, 무인항공기 운용 환경에 따른 주파수의 선택적 사용을 위하여 채널 변경이 가능하도록 설계하였다.

Abstract

In this paper, ku-band RF transceiver system is designed for the unmanned aerial vehicle(UAV) line-of-sight(LOS) datalink. The RF transceiver system is consisted of the transmitting and receiving unit, RF front-end unit, and high power amplification unit. The transmitting and receiving unit has the functions of frequency up/down converting and channel changing. The RF front-end unit has the functions of transmitting and receiving signal duplexing, antenna selection, small signal amplification, and frequency filtering excluding the receiving signal. The high power amplification unit has the functions of ku-band power amplification and transmitting power variation(High/Middle/Low/Mute). The frequency up/down converting of transmitting and receiving unit is designed by using the superheterodyne method. The RF transceiver system is designed to obtain the broadband and high linearity properties for the reliable transmission and reception of high data-rate and high speed data. Also, the channel changing function is designed to use selectively the frequency as the operation environment of UAV.

Keywords : Unmanned aerial vehicle (UAV), line-of-sight (LOS) datalink, RF transceiver, high data-rate, broadband

* 정회원, 국방과학연구소 제 7기술연구본부 UAV 체계개발단
(Agency for Defense Development Unmanned Aerial Vehicle Systems PMO)

© Corresponding Author(E-mail: choijw@add.re.kr)

접수일자: 2014년7월27일, 수정일자: 2014년7월30일, 수정완료: 2014년8월28일

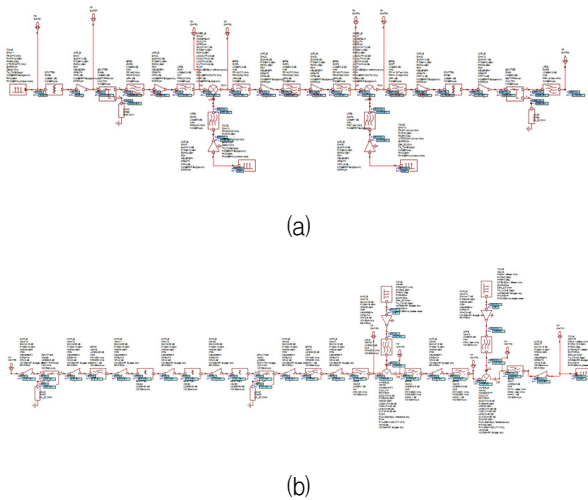


그림 3. 송수신반 회로도 (a) 상향 변환 회로, (b) 하향 변환 회로

Fig. 3. Schematic of transmitting and receiving unit (a) Up converter, (b) Down converter.

되어 있다. 송수신반의 주파수 상/하향 변환 기능과 채널 변경 기능 등은 AWR 社의 VSS(Visual System Simulator)를 이용하여 설계 및 확인하였다. 그림 3은 VSS 상의 송수신반 회로도를 보여준다. 그림 3 (a), (b)는 각각 상향 변환 회로 및 하향 변환 회로를 보여준다. 상향 변환 회로는 슈퍼헤테로다인 방식을 적용하였고, 혼합기, 필터, 증폭기, 톤 신호 발생기 등을 통하여 1차/2차 주파수 변환 회로를 모의하였다. 실제 구현에서는 기준주파수 발생기와 PLL 회로 등을 적용하였지만, 시뮬레이션 상에서는 톤 신호 발생기로 대체하였다. 하향 변환 회로도 상향 변환 회로와 동일한 방식으로 1/2차 주파수 변환 회로를 모의하였다. 실제 구현도 동일한 방식을 사용하였다. 상향 변환 회로의 중간주파수(f_{IF})는 x.xGHz이며, 하향 변환 회로의 중간주파수(f_{IF})는 x.xGHz이다. 운용 주파수 대역은 Ku 대역이다. 그림 4는 상향 변환 회로의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 4 (a)는 모뎀단에서 송수신반으로 전달되는 상향 변환 회로 입력신호를 보여준다. 그림 4 (b)는 송수신반에서 고출력증폭반으로 전달되는 상향 변환 회로 출력신호를 보여준다. 상향 변환 회로 입력 신호는 점유 대역폭 99.0% 기준으로 고정 IF에서 -35dBm이며, 출력 신호는 점유 대역폭 99.0% 기준으로 가변 RF에서 -3.5dBm이다. 출력 신호는 -10 ~ -3.5dBm의 범위 내에서 가변이 가능하도록 설계하였다. 이는 고출력증폭반의 출력을 제어하기 위함이며, 3단 이상의 제어가 가

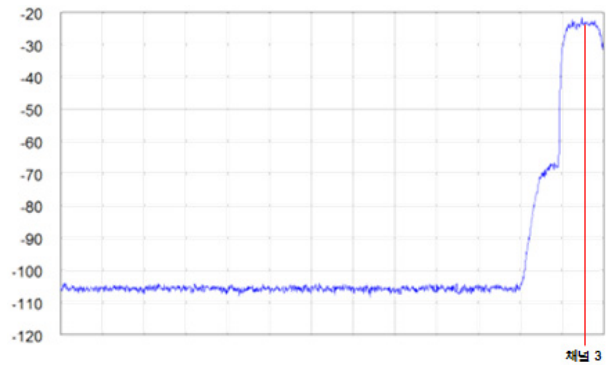
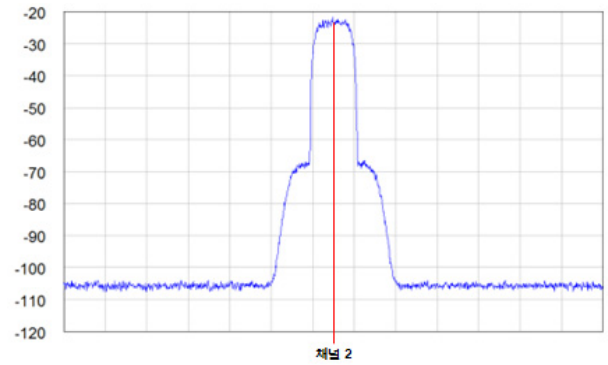
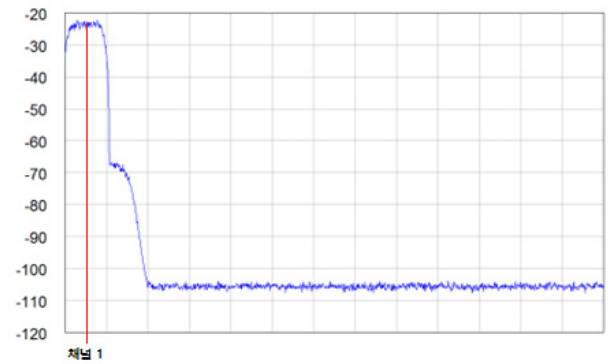
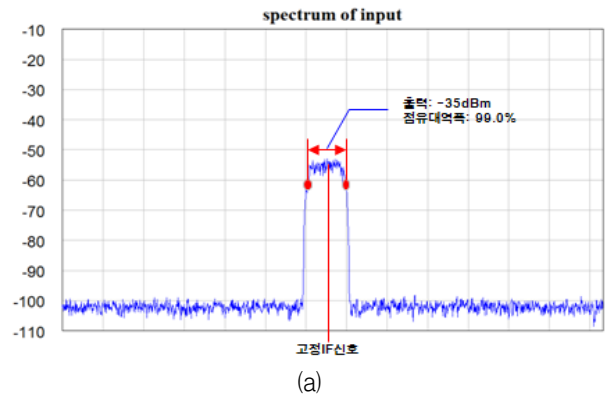


그림 4. 상향 변환 회로 시뮬레이션 결과 (a) 상향 변환 회로 입력 신호, (b) 상향 변환 회로 출력 신호

Fig. 4. Simulation results of up converter (a) Input signal of up converter, (b) Output signal of up converter.

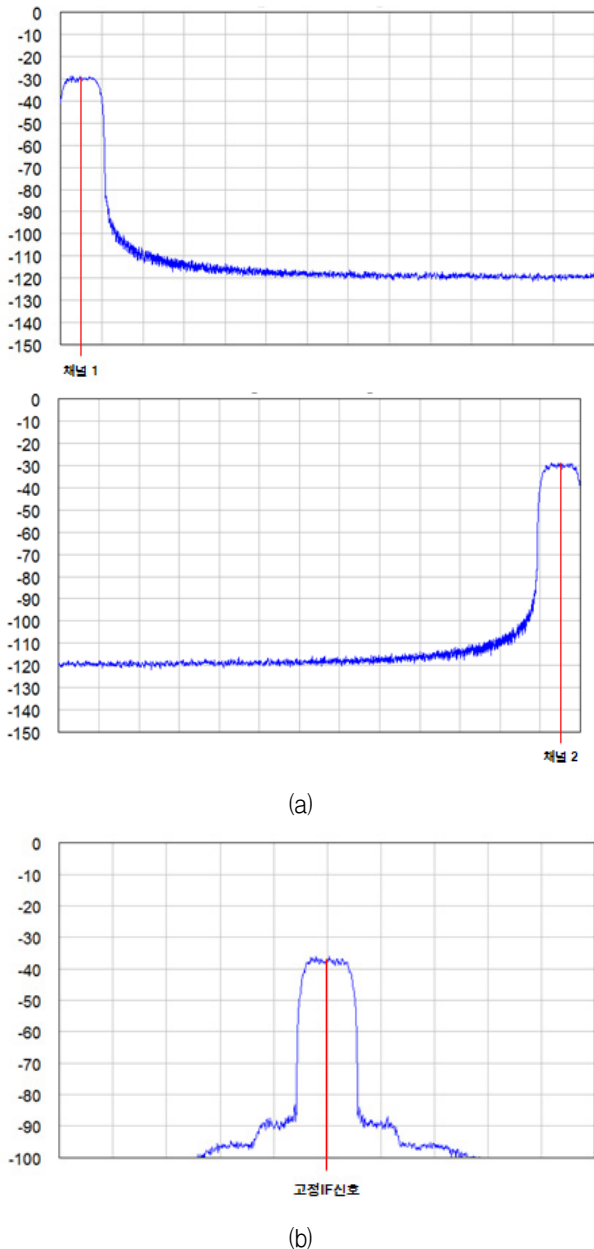


그림 5. 하향 변환 회로 시뮬레이션 결과 (a) 하향 변환 회로 입력 신호, (b) 하향 변환 회로 출력 신호
Fig. 5. Simulation results of down converter (a) Input signal of down converter, (b) Output signal of down converter.

능하도록 설계하였다. 그림 4 (b)에서 보듯이, 상향 변환 회로 출력 신호는 채널 1, 2, 3 등으로 운용 주파수 대역폭 내에서 채널 가변이 가능하도록 설계하였다. 주파수 변경 해상도는 1MHz이다. 주파수 변경을 위하여 사용되는 전압 제어 발진기의 위상 잡음 특성은 $-70\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{kHz}$ 이상, $-80\text{dBc}/\text{Hz}@10\text{kHz}$ 이상, $-90\text{dBc}/\text{Hz}@100\text{kHz}$ 이상, $-100\text{dBc}/\text{Hz}@1000\text{kHz}$ 이상

표 1. 송수신반 구현을 위해 사용된 부품 사양 및 용도

Table 1. Specification and use of components used to implement transmitting and receiving unit.

품명	PN	용도
전압 제어 발진기	HMCxxxLPx	Ku 로컬 주파수 생성
	ADFxxxx-x	로컬 주파수 생성
	ADFxxxx-x	로컬 주파수 생성
PLL	ADFxxxx	로컬 주파수 고정
	HMCxxxLPx	로컬 주파수 고정
Ku-대역 구동 증폭기	HMCxxxLCx	RF 신호 증폭
Ku-대역 저잡음 증폭기	NExxxxSxx	RF 신호 저잡음 증폭
Ku-대역 혼합기	HMCxxxLCxB	Ku 상/하향 변환
OCCO	MVxxx	기준 주파수 생성
SAW 필터	SLxxxxV	IF 신호 필터링
	TBOxxxxA	LO 신호 필터링
L-대역 혼합기	SYM-xxDMHW	L-대역 상/하향 변환
구동 증폭기	Gallxx	IF AGC를 위한 증폭

이다. 주파수 안정도는 $\pm 0.1\text{ppm}$ 이하이다. 그림 5는 하향 변환 회로의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 5 (a)는 RF 전단반에서 송수신반으로 전달되는 하향 변환 회로 입력신호를 보여준다. 그림 5 (b)는 송수신반에서 모뎀단으로 전달되는 하향 변환 회로 출력 신호를 보여준다. 하향 변환 회로 입력 신호는 점유 대역폭 99.0% 기준으로 가변 RF에서 -10dBm 이며, 출력 신호는 점유 대역폭 99.0% 기준으로 고정 IF에서 -17dBm 이다. 그림 5 (a)에서 보듯이, 하향 변환 회로는 채널 1, 2 등의 운용 주파수 대역폭 내 가변 채널 신호를 입력받아 고정 IF로 하향 변환할 수 있도록 설계하였다. 주파수 변경 해상도는 1MHz이며, 전압 제어 발진기의 위상 잡음과 주파수 안정도 특성은 상향 변환 회로와 동일하다. 표 1은 송수신반 구현을 위해 사용된 전압 제어 발진기, PLL, 저잡음 증폭기, 혼합기, 증폭기 등의 부품 사양 및 용도를 설명하고 있다.

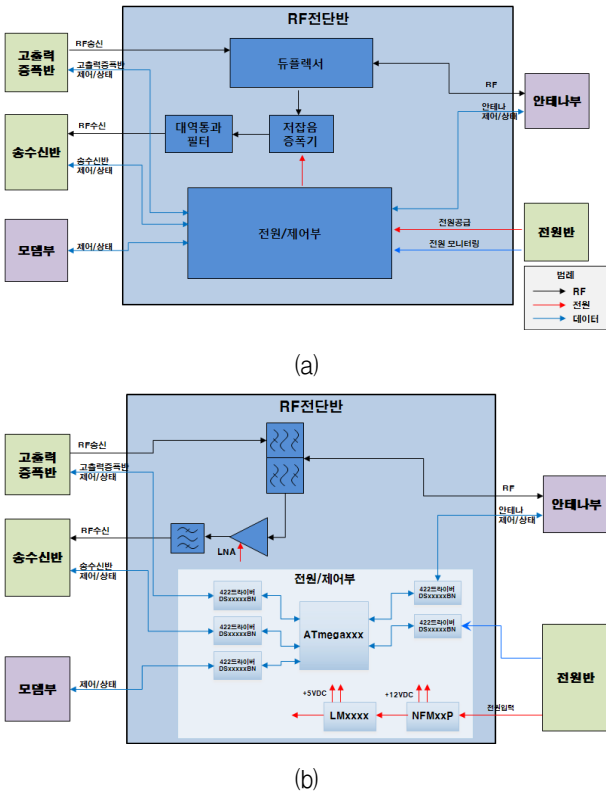


그림 6. RF 전단반 (a) 기능 블록도, (b) 구성도
 Fig. 6. RF front-end unit (a) Functional block diagram, (b) Compositional block diagram.

2. RF 전단반 설계

본 장에서는 RF 송수신 시스템 중 RF 전단반 설계에 대하여 서술하였다. 그림 6은 RF 전단반 기능 블록도 및 구성도를 나타낸다. RF 전단반은 고출력증폭기의 출력 신호를 안테나부로 전달하고, 안테나부로부터 수신된 신호를 저잡음 증폭기로 전달하기 위한 즉, 송수신 신호 분리를 위한 듀플렉서, 수신 신호의 저잡음 증폭을 위한 저잡음 증폭기, 운용 주파수 대역 외의 신호 제거를 위한 대역통과필터, 전원/제어부 등으로 구성되어 있다. RF 전단반의 저잡음 증폭기는 Agilent 사의 ADS(Advanced Design System)를 이용하여 설계하였다. 그림 7 (a)는 저잡음 증폭기의 회로도를 보여준다. 저잡음 증폭기는 ATFxxxx를 사용하여 구현하였다. 그림 7 (b)는 저잡음 증폭기의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 저잡음 증폭기 입력 단에서의 잡음 정합 서클과 출력 단에서의 이득 정합 서클을 보여준다. 입력 단은 잡음 정합을 해서 최소 잡음지수를 얻을 수 있도록 설계하였고, 출력 단은 이득 정합을 해서 최대 이득을 얻을

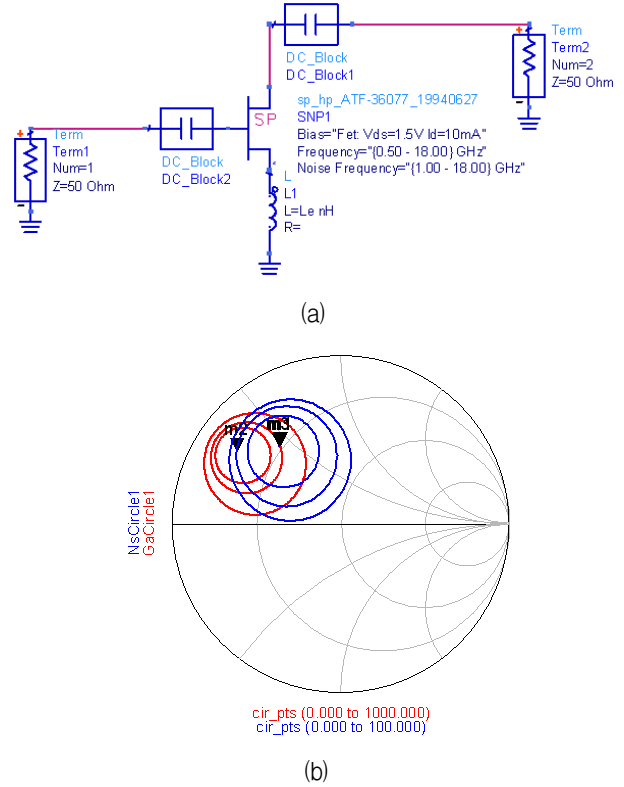


그림 7. 저잡음 증폭기 (a) 회로도, (b) 시뮬레이션 결과
 Fig. 7. Low noise amplifier. (a) Schematic, (b) Simulation result

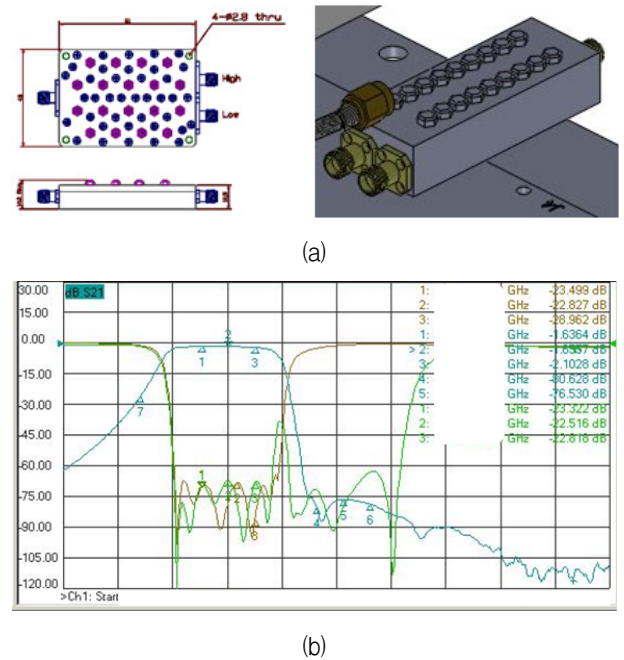


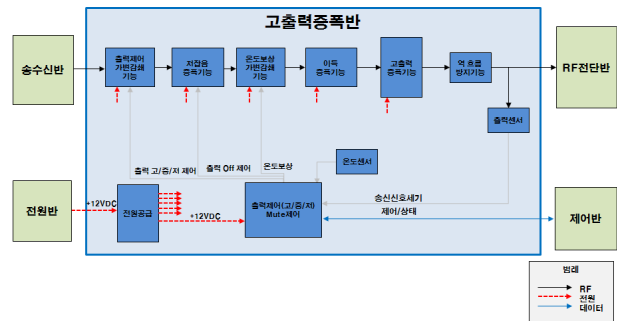
그림 8. 듀플렉서 및 수신용 대역통과필터
 (a) 형상, (b) 시뮬레이션 결과
 Fig. 8. Duplexer and receiving band pass filter. (a) Configuration, (b) Simulation result.

표 2. RF 전단반 구현을 위해 사용된 부품 사양 및 용도

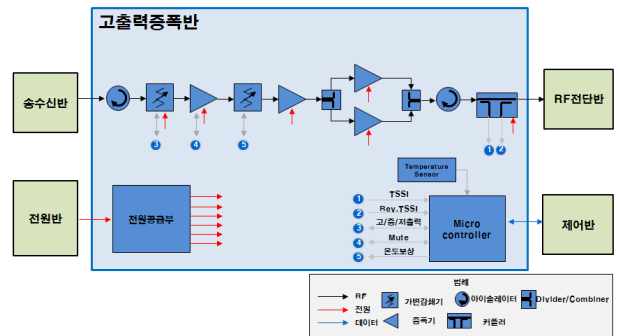
Table 2. Specification and use of components used to implement RF front-end unit.

품명	PN	용도
Micro Controller	ATmegaxxx	제어 프로세서
TCXO	TX-Bx-x.xDx	클럭 생성
RS-422 Tx Driver	AMxxLSxxAI	RS-422 송신 드라이버
RS-422 Rx Driver	AMxxLSxxAI	RS-422 수신 드라이버
4 UART Chip	TLxxCxxxBPN	Data 버스를 4CH UART 변환
D-Flip Flop	xxHCTxxxPW	Data 버스의 버퍼 역할
Bus Transceiver	xxHCTxxxPW	외부 신호의 버퍼 역할
EMI Filter (+12V)	NFMxxPCxxxFxHx	스위칭 전도 노이즈 차폐
Regulator	LMxxxxLD	보조 전원 생성
OP-AMP	ADxxxxAR	아날로그 전압 센싱
CONNECTOR	DCMMxxPD	전원 및 신호 입출력
Isolated 422 Transceiver	ADMxxxxE	외부 연동 422트랜시버

수 있도록 설계하였다. 저잡음 증폭기의 이득, P1dB 및 잡음지수는 각각 30dB 이상, 15dBm 및 1.5dB(Typical) 이하이다. 그림 8은 듀플렉서 및 수신용 대역통과필터의 형상 및 시뮬레이션 결과를 보여준다. 듀플렉서는 송수신 신호 이중화 및 분리를 위하여 사용하였고, 대역통과필터는 대역 외 신호 제거를 위하여 사용하였다. 그림 8 (b)에서 보듯이, 사용 대역 내에서 삽입손실은 3dB 이하, 분리도는 -65dBc 이상의 특성을 갖는다. 위에서 설계한 저잡음 증폭기, 듀플렉서, 대역통과필터와 별도의 전원/제어부의 구성을 통하여 RF 전단반을 설



(a)



(b)

그림 9. 고출력증폭반 (a) 기능 블록도, (b) 구성도
Fig. 9. High power amplification unit (a) Functional block diagram, (b) Compositional block diagram.

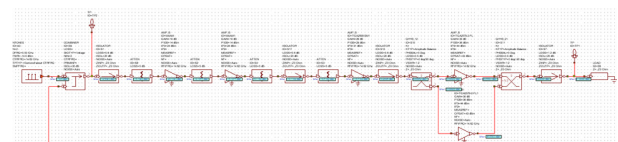


그림 10. 고출력증폭반 회로도
Fig. 10. Schematic of high power amplification unit.

계하였다. 표 2는 RF 전단반 구현을 위해 사용된 TCXO, RS-422 송수신 드라이버, Regulator, Bus Transceiver 등의 부품 사양 및 용도를 설명하고 있다.

3. 고출력증폭반 설계

본 장에서는 RF 송수신 시스템 중 고출력증폭반 설계에 대하여 서술하였다. 그림 9는 고출력증폭반 기능 블록도 및 구성도를 나타낸다. 고출력증폭반은 3단 이상의 출력제어를 위한 가변감쇄기, 저잡음 증폭기, 온도 보상을 위한 가변감쇄기, 이득 증폭을 위한 구동 증폭기, 출력 증폭을 위한 고출력 증폭기, 송신 신호의 역흐름 방지를 위한 아이솔레이터, Divider/Combiner, 커플러 등으로 구성되어 있다. 고출력증폭반의 출력, 이득, IMD3 등의 특성은 AWR社의 VSS(Visual System

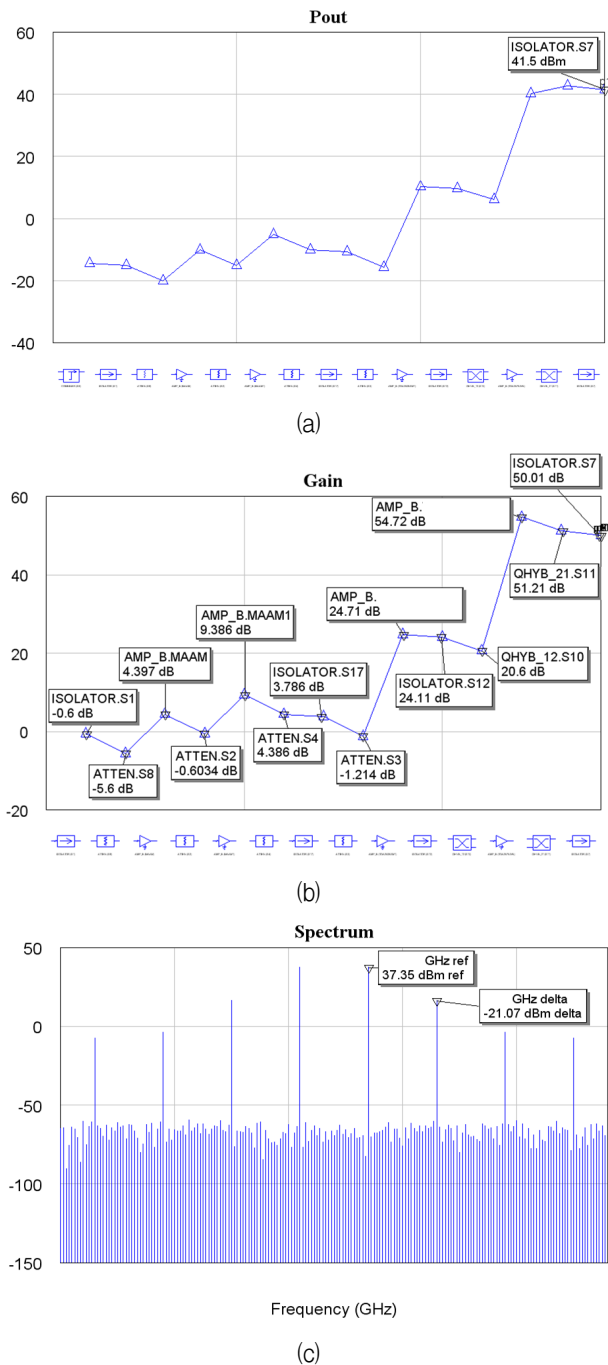


그림 11. 고출력증폭반 설계 결과
 (a) Stage 별 출력 전력, (b) Stage 별 이득,
 (c) 선형성
 Fig. 11. Simulation results of high power amplification unit (a) Output power at each stage, (b) Gain at each stage, (c) Linearity(IMD3).

Simulator)를 이용하여 설계 및 확인하였다. 그림 10은 고출력증폭반 회로도를 보여준다. 그림 10에서 보듯이, 각 증폭단 사이에 감쇠기를 구성하였고, 이득 증폭을

위한 구동 증폭기를 직렬 3단으로 구성하였다. 전력 증폭을 위한 전력 증폭기는 병렬로 2단 구성하였다. 전력 증폭기의 병렬 2단 구성은 TGAxxxx-x-FL 소자를 사용하였다. 본 소자는 특정 주파수 대역 내에서 포화 전력 43dBm, 소신호 이득 35dB, PAE(Power Added Efficiency) 27% 등의 특성을 갖는다. 그림 11은 stage 별 출력 전력 및 이득과 선형성 특성 등의 고출력증폭반 설계 결과를 보여준다. 고출력증폭반의 입력 신호 세기는 -10dBm이다. 아이솔레이터, 감쇠기, 구동증폭기, 전력증폭기 등을 거쳐서 나온 최종단의 출력전력은 41.5dBm이다. 본 출력 세기는 선형성 확보를 위하여 2dB back-off 한 값이다. 출력전력 41.5dBm에서 IMD3는 약 -21dBc이다. 전체 전력증폭반의 이득은 약 50dB이다.

III. 결 론

본 논문에서는 무인항공기 가시선 데이터링크 Ku 대역 RF 송수신 시스템을 설계하였다. RF 송수신 시스템은 송수신반, RF 전단반, 고출력증폭반으로 구성되어 있다. 송수신반은 주파수 상/하향 변환 기능과 채널 변경 기능을 제공하며, RF 전단반은 송/수신 신호 이중화, 안테나 선택, 소신호 증폭, 수신신호 외 주파수 필터링 기능을 제공한다. 고출력증폭반은 Ku 대역 전력증폭과 송신출력 가변(고/중/저/Mute) 기능을 제공한다. RF 송수신 시스템은 대용량 고속 데이터의 신뢰성 있는 송수신을 위하여 광대역 고선형 특성을 갖도록 설계하였다. 또한, 무인항공기 운용 환경에 따른 주파수의 선택적 사용을 위하여 채널 변경이 가능하도록 설계하였다. 무인항공기 가시선 데이터링크 Ku 대역 RF 송수신 시스템은 약 -21dBc의 선형성을 갖으며, 1MHz의 주파수 변경 해상도로 400MHz 이상의 주파수 대역폭에서 채널 변경이 가능하다. 최종 출력전력은 2dB back-off해서 약 41dBm이다.

REFERENCES

[1] B. Kim, J. Kim, D. Lee, T. Kim, I. Kim, "Analysis and design of ku-band airborne video transceiver system for smart-UAV," The Korean Institute of Communications and Information Sciences, vol. 29, no. 7A, pp. 807-813, 2003.

- [2] I. Hwang, K. Yu, and H. Kim, "The analysis of RF system and communication link for improvement in reliability of smart UAV data-link," The Korean Institute of Communications and Information Sciences, vol. 30, no. 2A, pp. 66-79, 2005.
- [3] N. Zhu, J.-Y. Cai, W.-Q. Wang, "A new method of developing high-performance ku-band radar transceiver," IET International Radar Conference, pp. 1-4, 2009.
- [4] Z. Zhang, G. Zhao, X. Zeng, H. Sun, X. Lv, "A transceiver for ku band digital monopulse radar system," International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, pp. 979-982, 2010.
- [5] J. Del Castillo, J. R. Larranaga Sudupe, "Radar transceiver module for QUASAR UAV based polarimetric SAR system," Proceedings of the 7th European Microwave Integrated Circuits Conference, pp. 552-555, 2012.
- [6] J. D. Miller, "A ku-band up converter/SSPA," IEE Colloquium on Solid-State Power Amplifiers, pp. 7/1-7/3, 1991.

저 자 소 개



최재원(정회원)
2006년 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사 졸업.
2008년 숭실대학교 정보통신공학과 석사 졸업.
2011년 숭실대학교 전자공학과 박사 졸업.

2012년~현재 국방과학연구소 선임연구원.
<주관심분야 : UAV 데이터링크, RF 회로, 안테나, 메타물질, 무선 전력 전송>



김지훈(정회원)
1996년 숭실대학교 정보통신공학과 학사 졸업.
1998년 숭실대학교 전기공학과 석사 졸업.
2001년~현재 국방과학연구소 선임연구원.

<주관심분야 : UAV 데이터링크, 안테나, 네트워크>