

밀리미터파(Ka 밴드) 복합모드 탐색기용 고출력 펄스형 진행파관 증폭기(TWTA) 설계 및 제작

Design and Fabrication of a High-Power Pulsed TWTA for Millimeter-Wave(Ka-Band) Multi-Mode Seeker

송성찬 · 김선기* · 이성욱* · 민성기*

Sung-Chan Song · Sun-Ki Kim* · Sung-Wook Lee* · Seong-Ki Min*

요 약

Ka-대역 밀리미터파 복합모드 탐색기에 적용할 수 있는 진행파관 증폭기(traveling wave tube amplifier: TWTA)는 고전압생성부(high voltage power supply: HVPS), 변조부(grid modulator), 제어부(command & control), 고조파부(RF assembly)로 구성되는 고출력 펄스형 송신기이다. 펄스 반복 주파수(pulse repetition frequency: PRF)와 전원공급기 스위칭 주파수가 동기/가변되어 -17.9 kV 고전압을 생성하는 고전압 전원 공급기와 RF 펄스 변조를 위한 고속 그리드 스위칭 변조기를 설계하였다. 체적이 3.18 L로 소형화로 제작된 TWTA는 그리드 on/off 신호의 상승/하강시간이 최대 18.5 ns 이하 고속 펄스 스위칭 특성을 가지고, 첨두전력은 564.9 W 이상으로 고출력 성능을 보였다. 또한 PRF와 PRF/2 범위 내에서 -68.4 dBc 이하의 우수한 불요파 성능을 확인하였다.

Abstract

The traveling wave tube amplifier (TWTA), which can be applied to the Ka-band millimeter-wave multi-mode seeker, consists of an high voltage power supply(HVPS), a grid modulator, a command and control, and an RF assembly. We designed a power supply that generates a -17.9 kV high voltage by synchronizing the pulse repetition frequency(PRF) and power supply switching frequency(i.e. synchronization frequency), and a high-speed grid-switching modulator for RF pulse modulation. The TWTA, which is fabricated through miniaturization with a volume of 3.18 L, has high pulse switching characteristics of up to 18.5 ns. The maximum rise/fall time of the grid on/bias signal and peak power is more than 564.9 W. Moreover, an excellent spurious performance of -68.4 dBc or less was confirmed within the range of PRF and PRF/2.

Key words: Ka-Band, Millimeter-Wave, Seeker, TWT, TWTA, HVPS

I. 서 론

유도탄 맨 앞부분에 장착되어 종말유도단계에서 표적

을 탐지, 포착, 추적하는 레이더 센서인 탐색기는 고해상도와 소형화 요구로 마이크로파에서 밀리미터파 탐색기로 발전되고 있다^[1]. 하지만 마이크로파 Ku-대역 대비 밀

한화시스템(Hanwha Systems)

*(주)빅텍(Victtek)

· Manuscript received March 25, 2019 ; Revised April 8, 2019 ; Accepted April 11, 2019. (ID No. 20190325-027)

· Corresponding Author: Sung-Chan Song (e-mail: sungchan.song@hanwha.com)

리미터와 Ka-대역에서 상대적으로 높은 대기 감쇄율과 송수신 경로 손실로 인해 탐색기 최대 탐지거리 성능이 제한된다. 이에 유도탄 작은 공간 내 장착이 가능하도록 소형화되면서, 수 백 W급 고출력 송신신호를 증폭하는 송신기가 필요하다. 반도체 설계 및 공정기술의 발전으로 Ka-대역에서 GaN 기반의 반도체 전력 증폭기가 개발되고 있지만^{[2]~[4]} 출력, 효율, 소형화(크기, 무게) 등의 성능 면에서 진공관 소자 기술을 사용하는 진행파관 증폭기를 뛰어넘지 못하고 있다. 또한 해외 선진국에서는 Ka-대역 진행파관 증폭기를 개발하여 유도무기체계에 적용하여 시험하고 있지만^{[5],[6]}, 국내 개발 수준은 수십 kV 절연을 유지하는 동시에 소형/경량화 설계, 고속 고전압 피드백 회로 설계, 펄스 반복 주파수(pulse repetition frequency: PRF) 가변으로 인한 동적 부하 특성 및 저 잡음 설계와 같은 기술적 어려움을 겪고 있다.

본 논문에서는 Ka-대역 밀리미터파 복합모드 탐색기용 소형, 고출력, 펄스형 진행파관 증폭기(TWTA) 개발을 위해 고전압 출력 캐패시터 용량을 최소한으로 줄이면서 음극전압 라인(line) 및 로드(load) 레귤레이션 특성을 개선하기 위해 고전압 출력단에 응답속도가 빠른 선형 제어 방식인 포스트 레귤레이터(post regulator)를 사용했다. 또한 고전압을 생성하기 위한 풀-브리지 컨버터(full-bridge converter)의 스위칭 노이즈와 불요파(spurious)를 제거하기 위해 스위칭 주파수를 PRF에 동기화 맞추어 동작시키고, LC 직렬공진회로에 추가하여 PRF에 동기되어 가변되는 스위칭 주파수 전 대역에서 영(zero) 전류 스위칭이 가능하도록 설계하였다. II장에서 진행파관 증폭기의 핵심 구성 요소 중 하나인 고 전압 전원공급기의 설계 기법과 내부 하드웨어 구성에 대해 설명하였다. III장에서는 본 논문에서 기술한 설계 방식을 적용하여 제작한 진행파관 증폭기의 형상과 시험 결과를 보여주었고, IV장은 결론을 기술하였다.

II. 진행파관 증폭기의 구성과 설계

그림 1은 진행파관 증폭기(TWTA)의 기능 블록도로, TWT를 구동하기 위해 안정된 고전압전원을 생성하는 고전압 생성부와 외부 PRF 신호를 받아 TWT의 그리드(grid) 전압을 on/off 제어하는 변조부, 송신기 전원 인가 및 차단

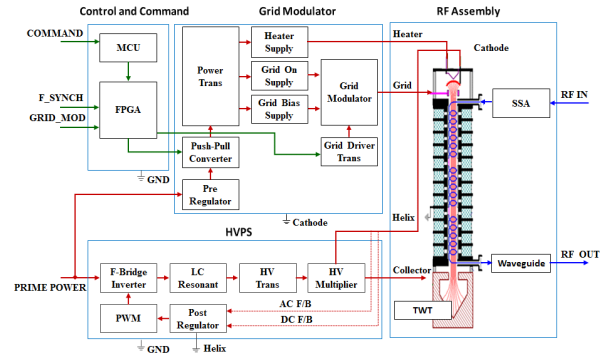


그림 1. TWTA 기능블록도
Fig. 1. Function block diagram of TWTA.

절차를 제어하고 송신기 상태를 모니터링하는 제어부, RF 소 신호를 고출력으로 증폭하는 고조파부로 구성되어 있다.

2-1 고전압생성부

고전압생성부는 외부에서 직류전원(prime power)을 입력받아 TWT를 구동시키기 위한 캐소드(cathode), 콜렉터(collector) 전압을 안정적으로 생성하는 기능을 수행하며, 풀-브릿지 컨버터, LC 직렬 공진회로, 고전압변압기(HV transformer), 고전압정류부(HV rectifier), 포스트 레귤레이터로 구성되어 있다.

직류전원을 교류전원으로 변환하는 풀-브리지 컨버터는 잡음을 줄이고, 효율을 높이기 위해 외부동기 제어가 가능한 위상 천이 컨버터(phase shift converter)를 구성했으며, 동적 부하조건에서 고전압 안정도 및 과도응답 특성을 개선하기 위해 그림 2와 같이 피드백 탐지 시스템(Feedback Detection System, i.e. TWT)을 통해 받은 직류(DC)/교류(AC) 전압을 저전압 레벨로 포스트 레귤레이터와 PWM IC를

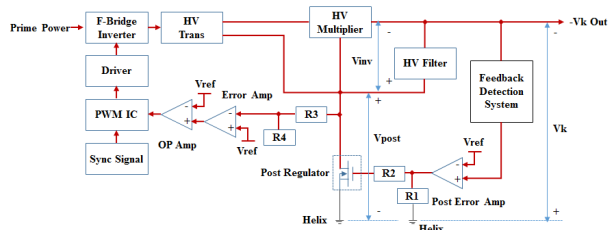


그림 2. 고전압 생성부 회로 계통도
Fig. 2. Feedback circuit schematic of HVPS.

제어한다.

일반적인 피드백 시스템은 캐소드 전압(V_k)을 수천 또는 수만 배 높은 분압비로 분압하여 피드백 신호를 받기 때문에 V_k 전압의 작은 변화량을 제어하기 어렵다. 본 논문에서 설계한 피드백 탐지 시스템은 R, C의 주파수 및 임피던스 특성을 이용한 DC 피드백과 AC 피드백을 설계에 적용하여, 기존의 피드백 시스템에서 감지하지 못하는 미세한 전압 변화량을 감지해 캐소드 전압을 정밀하게 제어한다.

기존의 피드백 시스템에서는 정귀환(positive feedback) 방식을 사용하면 레귤레이션 오류로 출력전압이 발진하거나 차단되는 경우가 발생하여 부귀환(negative feedback) 방식이 많이 사용된다. 본 장비의 포스트 에러 증폭기(post error amp)는 정귀환 방식을 사용했으나, 2-폴(pole) 2-제로(zero) 구조의 보상 회로로 구성하여 넓은 주파수 대역에서 안정적으로 출력이 유지되도록 설계하였다. 포스트 에러 증폭기 설계 시, 1-폴 1-제로 구조의 보상 회로는 고속 펄스 부하에서 레귤레이션 범위를 벗어날 수 있어 적합하지 않다. 따라서 보상회로는 2-폴 2-제로 이상의 구조로 설계하였고, 고속 응답 특성에 맞게 에러 증폭기는 고 이득(high gain)/높은 단위시간당 출력전압의 최대변화량(high slew rate)를 가진 부품으로 선정하였다^{[7],[8]}.

TWT 구동용 고전압생성부는 캐소드 전압을 정밀하게 제어하고, 리플 전압을 줄이기 위해 포스트 레귤레이터를 많이 사용한다. 연속파(continuous wave)용 TWT에서는 1차 측에 프리 레귤레이터(pre regulator)가 있는 경우 사용하지 않기도 하지만, 펄스 타입의 TWT에서는 필수적인 구성품 중 하나이다. 다양한 듀티 변화에 대해 캐소드 전압 리플을 줄이려면 고전압 캐패시터 용량이 커져야 하지만, 이것은 TWT 아킹 시 방전 에너지가 커서 TWT를 손상시킬 수 있다. 또한, 항공용 어플리케이션에서는 크기와 중량 제한으로 인해 캐패시터를 필요한 용량보다 적게 사용하는 경우가 많이 발생한다. 포스트 레귤레이터는 캐소드 출력 라인에 직렬로 연결되어 빠른 응답 속도와 정밀한 제어로 캐패시터 용량이 부족하거나, 캐소드 전압이 수백 V 이내로 변동될 경우, 즉각적인 전압 보상이 가능하다.

포스트 레귤레이터는 피드백 회로에 의해 FET를 선형(불포화)영역에서 동작시키는 선형 제어 회로이며, 캐소드 전압이 변동되는 만큼 반대 방향으로 전압을 인가해

캐소드 전압을 일정하게 제어한다.

그림 3은 펄스 타입의 TWT에서 부하량이 변동될 때 포스트 레귤레이터가 Droop를 보상하는 모습을 보여준다. V_{inv} 는 고전압변압기의 정류단 출력이고, V_{post} 는 포스트 레귤레이터의 드레인-소스 전압, V_k 는 캐소드 전압을 나타낸다. Droop가 발생하면 정귀환 회로에 의해 포스트 레귤레이터가 양(+)의 방향으로 변동된 전압만큼 보상을 하여 레귤레이션을 수행하며, 최종 출력전압 V_k 는 $V_{inv} - V_{post}$ 로 레귤레이션된다^[9].

그림 4와 같이 -18 kV 의 높은 캐소드 전압에서는 과도구간 또는 스위칭 시 수백 볼트의 overshoot/undershoot가 발생할 수 있다. 따라서, 포스트 레귤레이터의 V_{ds} 는 이러한 과도 상태 전압 변화를 충분히 보상할 수 있도록 약 $1,200\text{ V}$ 의 전압 변동이 가능하게 설계하였다.

2-2 변조부

변조부는 고전압생성부에서 공급받은 캐소드 전위를

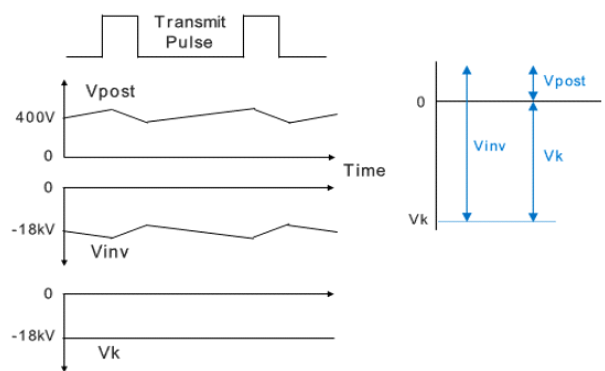


그림 3. 포스트 레귤레이터 동작 개요
Fig. 3. Post regulator operation overview.

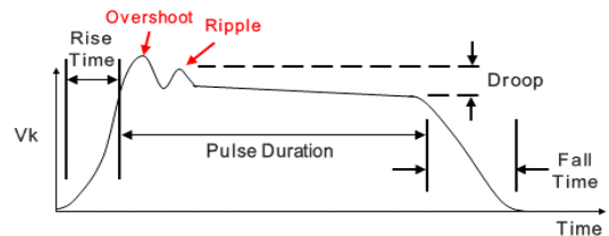


그림 4. 스위칭 구간에서의 over/undershoot
Fig. 4. Over/undershoot in switching section.

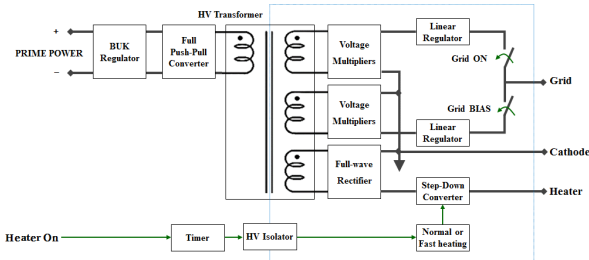


그림 5. 변조부 구성도
Fig. 5. Block diagram of grid modulator.

기준으로 그리드와 히터(heater) 전원을 생성해 전원인가 시퀀스에 맞게 공급하는 기능을 수행하며, TWT 캐소드 건(gun)을 가열하여 열전자를 활성화시키는 히터 전원부, 빔 전류를 가속화시키거나 차단하는 기능을 수행하는 그리드 on/off 전원부로 구성된다.

그림 5와 같이 회로를 간소화하기 위해 한 개의 고전압 변압기로 히터, 그리드 on, 그리드 off 전원을 모두 생성한 후 2차측에서 정밀한 레귤레이터를 사용해 출력전압을 안정화시킨다. 이어서 응답속도가 빠르고 스위칭 노이즈가 없는 선형 레귤레이터를 사용해, 가변되는 PRF에 따라 안정적인 그리드 전원, -400 V에서 +155 V의 펄스를 출력한다. 그리드 변조기의 스위칭 속도는 TWT와 스위칭 소자의 출력 캐패시터를 충·방전하는 순시 전류량에 따라 달라진다. 즉 적은 전류로 빠른 스위칭 속도를 얻고, 스위칭 손실을 줄이기 위해 출력 캐패시턴스(C_{oss})가 15 pF로 매우 작은 값을 가진 FET를 선정했으며, 목표 성능인 20 ns 이하의 스위칭 속도를 만족하기 위한 순시전류는 식 (1)과 같다⁹⁾.

$$i = C \frac{d_v}{d_t} = 1.5 A_{pk} \tag{1}$$

$$C = 30pF(C_{OSS} * 2) + 30pF(TWT \text{ capacitance})$$

$$d_v = 500 V, d_t = 20nsec(max)$$

2-3 제어부

제어부는 크게 MCU와 FPGA로 구성된다. TWTA는 송신 중에 고전압이나 히터가 먼저 차단되면 TWT에 심각한 손상을 줄 수 있기 때문에 전원 인가 및 차단 시퀀스

제어가 매우 중요하다. 따라서 여러 변수가 있는 복잡한 로직을 단순화시켜 신뢰성이 높은 FPGA로 로직처리하고, MCU는 FPGA에서 수신된 정보로 장치 전반적인 운용 및 제어, 통신과 같은 외부 인터페이스를 수행한다. 또한, 고속 FPGA는 수 kHz에서 수백 kHz까지 가변되는 PRF 신호를 받아 그리드 on/off 스위치를 제어하기 위한 펄스 신호를 생성하고, 고장 발생 시 송신 off 후 고 전압을 즉시 차단해 HVPS와 TWT를 안정적으로 보호할 수 있는 고장보호 기능을 수행한다.

2-4 고조파부

고조파부는 반도체 전력 소자를 패키징하여 자체 제작한 SSA와 입력 RF 신호를 SSA로 증폭된 구동신호를 고출력 신호로 증폭하는 TWT와 최종 고출력 증폭된 신호를 안테나로 전송하고, WR-28 도파관 인터페이스로 구성된다. TWT는 Teledyne 社 제품을 사용하였다.

III. 제작 및 시험 결과

그림 6은 제작한 Ka-대역 TWTA 실물사진이며, 최적의 기준 제작된 크기는 265 mm×174 mm×92 mm(가로×세로×높이)이고, 체적은 3.18 L이며, 저압부와 고전압부 사이는 20 kV 이상의 절연내력을 갖고 있다. 그림 7은 TWT를 연동하여 고전압 인가 시, V_{post} 및 캐소드 전압(V_k)을 DC 모드로 측정된 파형이다. V_{post} 전압이 정상 출력되어 귀환 회로가 정상동작하는 것을 알 수 있으며 V_k 전압이 -17.9 kV로 레귤레이션 되는 것을 확인할 수 있다.

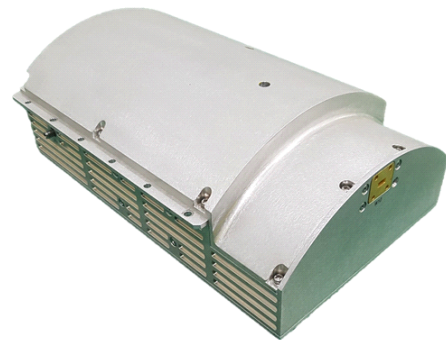


그림 6. 제작된 TWTA 사진
Fig. 6. Picture of manufactured TWTA.

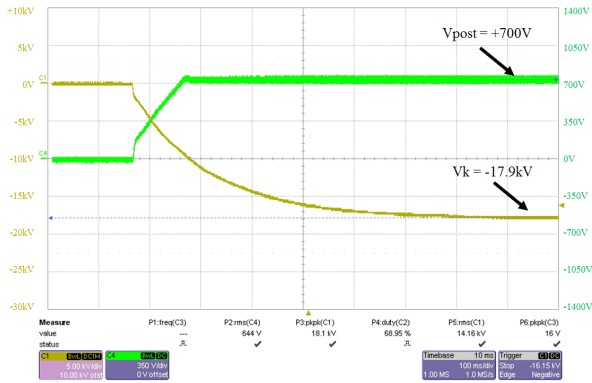


그림 7. Vpost(Post Vds) 및 Vk 전압(DC 모드)
Fig. 7. Vpost(Post Vds) & Vk voltage(DC mode).



그림 9. RF 출력 첨두전력
Fig. 9. RF out peak power.

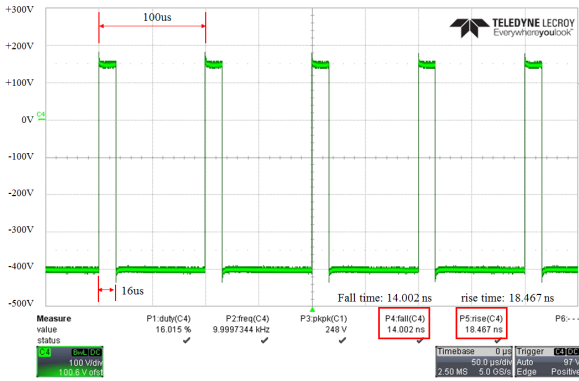


그림 8. 그리드 변조기의 스위칭 출력파형
Fig. 8. Switching output waveform of grid modulator.

그림 8은 PRF 10 kHz(i.e. 펄스반복주기=100 μ s)와 펄스폭 16 μ s 조건에서 측정된 그리드 출력 스위칭 파형이며, 상승 시간 18.5 ns 이하와 하강시간 14.0 ns 이하의 고속 스위칭 특성을 보인다.

그림 9는 PRF 10 kHz, 펄스폭 16 μ s, 듀티 16 % 조건으로 TWTA의 첨두전력(peak power)을 40 dB 도파관 커플러와 5.2 dB 삽입손실을 갖는 RF 케이블을 연결해 측정된 결과를 보여준다. 측정된 결과는 12.32 dBm이고, 커플러와 RF 케이블 손실을 보상하면 최종 첨두전력은 57.52 dBm(564.9 W)이다. 이때 평균효율은 28.9 %이다. 그림 10은 고전압 전원공급기의 스위칭 노이즈에 의한 불요파 측정결과를 보여준다. PRF와 PRF/2 사이에서 -68.4 dBc 이하의 우수한 불요파 특성을 확인하였다.

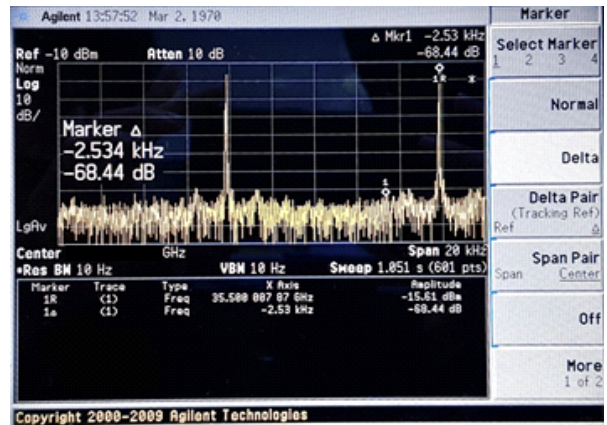


그림 10. 불요파 측정 결과
Fig. 10. The measured spurious.

표 1. 제작된 TWTA 측정 결과 비교

Table. 1. Comparison of our manufactured TWTA with reference paper.

Div.	Ref. [10]	Ref. [11]	This paper
Frequency(GHz)	Ka-band(30~31)	Ka-band	Ka-band
Peak power(W)	502	436	564.9
Spurious(dBc)	-50	-60	-68.4
Phase noise (dBc/Hz)	-50	-	-61.02
NPD(dBm/Hz)	-76	-	-110.2
Size(L*W*H) (mm ³)	566.9×285.5×280.9	-	265×174×92

Ka 대역 고출력 펄스형 TWTA의 특성을 본 논문과 비교하여 표 1에 나타내었다^{[10],[11]}. Teledyne사 TWT를 사용하여 제작한 해외와 국내 TWTA를 비교 대상으로 선정하였으며, 첨두전력, 불요파, 위상잡음, beam off 잡음 전력 밀도(noise power density: NPD) 및 크기를 비교하였을 때 본 논문의 TWTA의 성능이 우수함을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 Ka-대역 밀리미터파 복합모드 탐색기에 적용 가능한 진행파관 증폭기(TWTA)의 내부 구성과 설계 기법에 대해 기술하였다. 본 설계 내용을 반영하여 체적 3.18 L로 소형 TWTA 제작하여, 전기적 성능시험을 통해 -17.9 kV 고전압 안정성, 첨두전력 564.9 W RF 고출력 성능, 최대 상승/하강시간 18.5 ns 이하의 고속 스위칭 특성, -68.4 dBc 이하의 불요파 특성 등 우수한 성능을 확인하였다. 향후 제작된 TWTA의 신뢰성을 입증하기 위해 온도시험 및 진동/충격시험 등 환경시험을 수행할 예정이다.

References

[1] W. H. Licata, "Missile seekers for strike warfare beyond the year 2000," *RTO SCI Lecture Series*, RTO-EN-018, Jun. 2001.

[2] C. Y. Ng, K. Takagi, T. Senju, K. Matsushita, H. Sakurai, and K. Onodera, et al., "A 20-watt Ka-band GaN high power amplifier MMIC," in *2014 44th European*

Microwave Conference, Rome, Oct. 2014, pp. 1348-1351.

[3] *Microwave Product Digest*. Ka-bane Gan SSPA, 2018. Available: <http://www.mpdigest.com/2018/08/20/ka-band-gan-sspa>

[4] 지홍구, 노운섭, 최윤희, 광창수, 염인복, 서인중, 박형진, 조인호, 남병창, 공동육, "GaN HPA MMIC 기반 Ka 대역 25 W SSPA 설계 및 제작," *한국전자과학회논문지*, 26(12), pp. 1083-1090, 2015년 12월.

[5] *Microwave Journal*. Thales Launches 500 W Ka-band TWT, 2010. Available: <http://www.microwavejournal.com/articles/9237-thales-launches-500-w-ka-band-twt>

[6] MBDA Missile Systems. Comparison B1-B1NT Infographics, 2017. Available: <https://www.mbda-systems.com/wp-content/uploads/2017/01/2017-01-Comparison-B1-B1-NT-Infographics.pdf>

[7] 김희준, *스위치모드 파워서플라이*, 경기, 성안당, pp. 112-122, 2012년.

[8] 김희준, *스위치 전원의 기본 설계*, 경기, 성안당, pp. 149-165, 2011년.

[9] L. Sivan, *Microwave Tube Transmitters*, London, Springer US, pp. 265-274, 1994.

[10] Teledyne Microwave Solutions. 502W Ka-band TWTA. Available: https://www.teledynemicrowave.com/images/Amplifiers/500W_Ka-Band_TWTA.pdf

[11] 박동선, 김진호, 이원형, 권혁만, 안효창, "Ka 대역 저잡음 고출력 송신기 설계," *한국군사기술학회 추계학술대회*, 대전, 2017년, pp. 393-400.

송 성 찬 [(주)한화시스템(주)/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0965-2091>



2001년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
 2003년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
 2002년 11월~현재: 한화시스템(주) 수석연구원
 [주 관심분야] 진행파관 증폭기(TWTA), 밀리미터파(Ka 밴드) 탐색기 시스템 등

김 선 기 [(주)빅텍/주임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8186-1846>



2016년 2월: 홍익대학교(세종) 전자공학과 (공학사)
 2016년 2월~현재: (주)빅텍 기술연구소 주임연구원
 [주 관심분야] 고전압전원공급기, 마이크로파 밀리미터파 전력증폭기 모듈, 진행파관 증폭기

이 성 옥 [(주)빅텍/부장연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4608-2753>



2001년 2월: 서울시립대학교 전자전기공학부 (공학사)

2001년 2월~현재: (주)빅텍 기술연구소 부장연구원

[주 관심분야] 고전압전원공급기, 마이크로파 밀리미터파 전력증폭기 모듈

민 성 기 [(주)빅텍/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2271-0698>



2013년 6월: 군산대학교 전기공학과 (공학사)

2013년 10월~현재: (주)빅텍 기술연구소 선임연구원

[주 관심분야] 고전압전원공급기, 진행파관 증폭기, 그리드 모듈레이터, 고속 스위칭