

실시간 지연 소자를 이용한 광대역 고출력송신조립체 설계 및 제작

Design and Fabrication of Wideband High Power Transmission Board Using True Time Delay

정영훈 · 노연준* · 김민철 · 박성준 · 최주영 · 한재섭 · 최남우 · 김상수 · 강창현*

Younghoon Jeong · Yeonjun Noh* · Minchul Kim · Sungjun Park · Juyoung Choi ·
Jaesub Han · Namwoo Choi · Sangsu Kim · Changhyun Kang*

요 약

본 논문에서는 다중 위협 신호에 대응하기 위한 전자전용 광대역 능동위상배열 고출력송신조립체 설계 및 측정 결과를 기술하였다. 제안한 고출력송신조립체는 GaN 기반의 광대역 고출력 증폭소자를 적용하였고, 넓은 순시 대역폭 신호의 빔 편이 현상을 최소화하기 위해 실시간 지연 소자(TTD)를 이용한 위상배열 구조의 전자전용 재밍 송신 모듈을 설계하였다. 제작한 고출력송신조립체의 성능으로는 CW 신호에서 주파수 평균 15.4 W 이상의 출력 레벨을 가졌으며, 출력 평탄도는 최대 3.92 dB의 특성을 보였다. 또한, 입력 VSWR은 2:1 이하이며 채널간 격리도는 42.84 dBc 이상의 성능을 가졌다. 채널간 진폭 및 위상 정합도는 각 채널의 신호 크기와 위상에 대한 보정값을 적용하여 채널간 정렬을 이루었으며, 동작 주파수 대역에서 각각 2 dB, 2 ps 이하의 성능을 만족하였다.

Abstract

This study describes the design and measurement results of a wideband phased-array high-power transmission board for electronic warfare systems. The proposed high-power transmission board (HPTB) comprises a wideband gallium nitride (GaN) high-power amplifier and a true-time delay device to minimize the beam squint over wide bandwidths. The designed HPTB achieved an average output power level of more than 15.4 W with a continuous wave over the frequency range, and the flatness of the output power was up to 3.92 dB. In addition, when the input voltage standing wave ratio was less than 2:1, the isolation between the channels was more than 42.84 dBc. The amplitude and phase deviations between the channels were less than 2 dB and 2 ps, respectively.

Key words: Electronic Warfare, Phased Array, True Time Delay, High Power Amplifier, Wideband Transmitter

I. 서 론

현대의 전자전 장비는 통신시스템, 레이다, 유도무기 등 다양한 위협으로부터 아군을 보호하기 위한 고속의

광대역 스펙트럼을 갖는 전자전용 송신 시스템이 요구되고 있다. 기존의 전자전장비는 TWTA(travelling wave tube amplifier)나 클라이스트론(Klystron)과 같은 진공관 형태의 증폭기를 이용한 전자전 재머가 탑재되었다. 하지만

LIG넥스원(LIG Nex1 Co., Ltd)

*RFHIC(주)(RFHIC Co., Ltd)

· Manuscript received July 9, 2024 ; Revised July 22, 2024 ; Accepted August 25, 2024. (ID No. 20240709-063)

· Corresponding Author: Young-Hoon Jeong (e-mail: younghoon.jeong@lignex1.com)

TWT 기반의 증폭기는 긴 예열시간과 수 kV의 고전압 전원이 필요하며 높은 대기전력을 소모한다는 단점이 있다. 이러한 TWTA의 단점을 보완하기 위해 수십 V의 저전압을 사용하고, 빠른 동작 속도와 낮은 소모 전력을 갖는 GaN 기반의 화합물 반도체 소자를 적용한 광대역 재머에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[1][2]}.

최근 전자전 재밍 송신 안테나는 기계식 및 수동위상배열 안테나에서 능동위상배열 안테나로 대체되고 있다. 능동위상배열 안테나는 일부의 채널이 고장이 나더라도 전체 시스템에는 큰 영향이 없으며, 개별 채널의 크기와 위상을 변화시켜 다양한 빔 형성 및 조향이 가능하다는 장점이 있다. 위상배열 안테나의 빔 조향을 조절하기 위해서 저비용의 phase shifter가 적용되어왔다. 하지만, phase shifter를 이용한 위상배열 안테나의 경우 넓은 순시 대역폭을 갖거나 빔 조향각이 커질수록 주파수에 따른 신호의 빔 편이(beam-squint) 현상이 발생하게 되어 광대역 스펙트럼의 전자전 장비에 적용하기에는 어려움이 있다. 이러한 단점은 실시간 지연 소자(TTD, true time delay)를 이용하여 대체가 가능하고, 광대역 스펙트럼의 전자전 장비에는 필수적인 요소이다^{[3]~[5]}.

본 논문에서는 실시간 지연 소자를 이용하여 기존의 빔 편이 현상과 같은 단점을 보완하고 광대역 스펙트럼에 적용 가능한 능동위상배열 기반의 전자전용 고출력송신조립체를 제안한다. 논문의 구성은 다음과 같이 II장에서는 제안한 고출력송신조립체의 목표성능 및 설계방안에 대하여 기술하였으며, III장에서는 고출력송신조립체를 구성하는 단위 모듈 설계 및 결과에 대하여 다루었다. IV장에서는 제작한 고출력송신조립체의 주요 성능에 대해 측정 및 분석하였으며, V장에는 결론을 기술하였다.

II. 고출력송신조립체 설계

고출력송신조립체는 재밍신호발생기로부터 RF 신호를 인가받아 고출력 송신 신호로 증폭하고, 실시간 지연 소자를 이용해 주파수에 따라 신호크기 및 위상을 가변하여 C~Ku 대역의 광대역 전자전 빔조향 기능을 한다. 본 논문에서는 위상배열 안테나의 광대역 전자전 빔조향을 하기 위한 고출력송신조립체의 목표 성능을 표 1과 같

표 1. 고출력송신조립체 목표 성능

Table 1. Specification of high power transmission board.

No.	Parameter	Specification
1	Frequency	F~F+12 GHz
2	Output power	≥14 W, CW
3	Output flatness	≤4 dB
4	Input VSWR	≤2:1
5	RMS amplitude error	≤0.5 dB [RMS]
6	RMS TTD error	≤2 ps [RMS]
7	Channel isolation	≥30 dBc
8	Gain deviation	≤2 dB
9	Time delay deviation	≤2 ps

이 설계하였다. 송신 출력은 다양한 재밍기법을 운용하기 위해 100 % Duty 신호에서 각 채널별 주파수 평균 14 W 이상의 출력 레벨을 갖도록 설계하였고, 위상배열 안테나의 빔폭과 빔 포인팅 에러를 고려하여 채널간 진폭편차는 2 dB 이하, 채널간 시간지연편차는 2 ps 이하를 갖도록 설계하였다. 고출력송신조립체가 최대 방위각/고각 방향으로 조향하기 위해서는 시간지연 가변범위가 500 ps 이상 필요하며, 가변 범위에서의 크기오차 및 시간지연오차는 각각 0.5 dB[RMS], 2 ps[RMS] 이하를 갖도록 LUT(look-up table)를 적용하였다. 고출력송신조립체는 RF 구동증폭조립체, HPA(high power amplifier) 증폭모듈, 빔조향제어조립체로 구성되어 있으며, RF 구동증폭조립체는 하나의 입력 신호를 12채널로 분기하고, MFC(multifunction chip) 소자를 이용하여 주파수에 따라 신호크기 및 위상을 가변한다. HPA 증폭모듈은 GaN 반도체 소자를 사용하여 광대역의 고출력 신호로 증폭시키며, 빔조향제어조립체는 빔 조향각에 대한 정보를 입력받아 빔 연산을 수행하고 각 채널의 시간지연값을 제어한다. 고출력송신조립체는 표 2와 같이 0 dBm의 RF 신호를 입력 받아 최종 41.46 dBm(14 W) 이상의 출력을 보이도록 RF 버짓을 설계하였다. 광대역 동작 주파수에서 이득 평탄도를 맞추기 위해 공통의 path에 equalizer를 사용하였고, 최대 빔조향각에 대한 시간 지연 가변범위와 채널간 정렬을 고려하여 255 ps의 MFC 소자 3개를 사용하였다(그림 1)^[6].

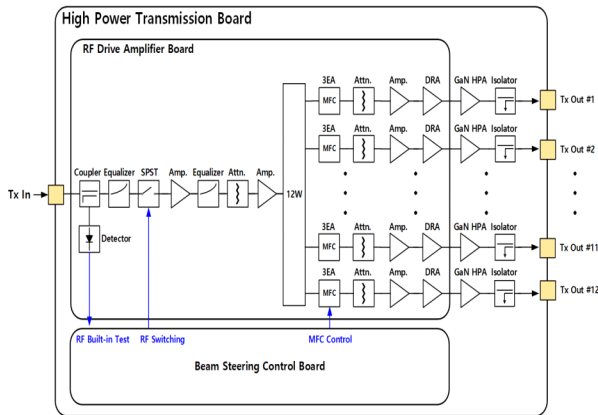


그림 1. 고출력송신조립체 기능블록도

Fig. 1. Block diagram of high power transmission board.

표 2. 고출력송신조립체 RF 버짓

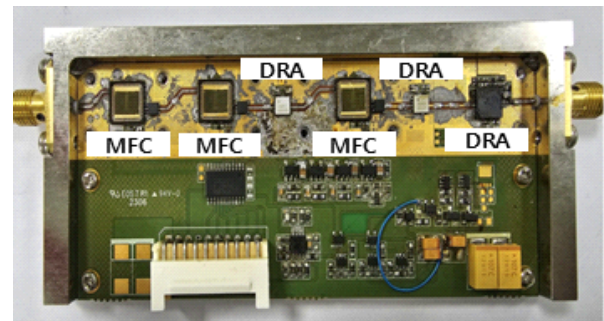
Table 2. RF budget of high power transmission board.

Stage	Gain [dB]	Output power [dBm]
Connector	—	0.0
Coupler	-1.5	-1.5
Attenuator	-5.5	-7
Equalizer	-5	-12
SPST	-2	-14
Attenuator	-5	-19
Drive amp.	17	-2
Equalizer	-5	-7
Attenuator	-3	-10
Drive amp.	17	7
2-way divider	-5	2
Drive amp.	17	19
3-way divider	-7	12
2-way divider	-5	7
MFC	-23	-16
Attenuator	-1	-17
MFC	-8	-25
Attenuator	-1	-26
Drive amp.	17	-9
MFC	7	-2
Attenuator	-1	-3
Drive amp.	17	14
Drive amp.	12	26
HPA	18	44
Isolator	-1	43
Outline PCB	-1	42
Connector	-0.3	41.7

Ⅲ. 단위모듈 설계 및 측정결과

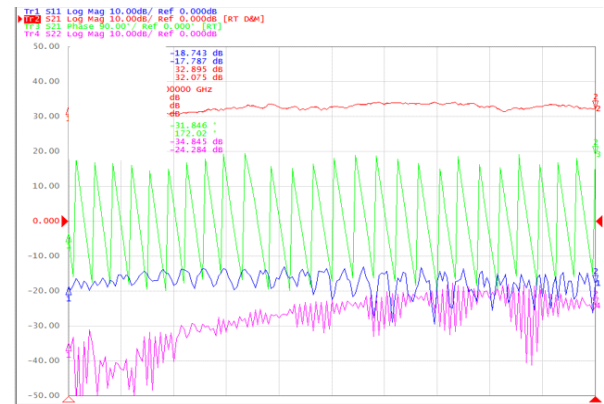
본 장에서는 고출력송신조립체를 구성하는 단위 모듈의 프로토타입 제작 및 측정 결과를 기술하였다. 그림 2는 RF 구동증폭조립체의 한 채널에 대한 제작사진 및 측정결과를 나타내었다. 각 채널은 빔조향 및 채널간 정렬을 위해 MFC 소자 3개가 구성되었으며 DRA(drive amplifier)가 선형 구간에서 동작할 수 있도록 전단에 감쇄기를 위치시켰다. 제작된 구동증폭모듈의 측정 결과는 전 주파수 대역에서 선형 이득은 30 dB 이상이며 입력 및 출력 반사손실은 약 -10 dB 이하의 측정결과를 확인하였다.

HPA 증폭모듈은 구동증폭모듈로부터 인가받은 RF 신호를 고출력으로 증폭하는 역할을 한다. HPA는 가장 높



(a) 구동증폭모듈 제작사진

(a) Photograph of fabricated drive amplifier module



(b) S-parameter 측정결과

(b) Measured S-parameter results

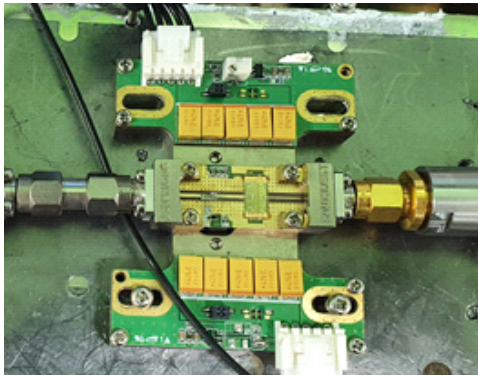
그림 2. 구동증폭모듈 제작 및 측정결과

Fig. 2. Fabrication and measurement results of drive amplifier module.

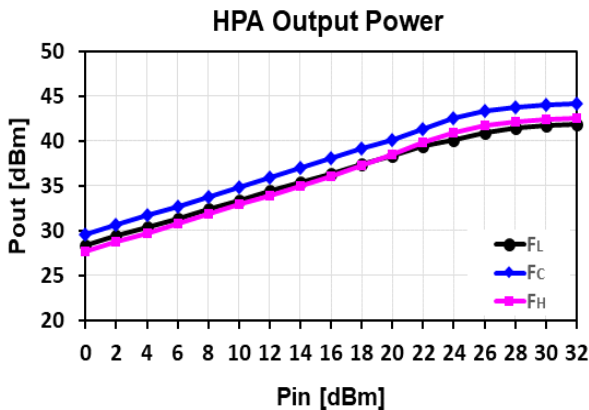
은 발열량이 발생되기 때문에 소자의 상태를 확인할 수 있도록 온도 및 전류 센서를 주변 회로에 구성하였고, 펄스 신호에서도 안정적으로 증폭할 수 있도록 charge capacitor를 구성하였다. 그림 3과 같이 프로토타입을 제작하여 입력레벨 대비 출력레벨을 측정한 결과, 동작 주파수 대역에서 출력전력이 선형적으로 증가하고 30 dBm의 입력레벨에서 41 dBm 이상의 포화전력을 보였다.

IV. 고출력송신조립체 제작 및 측정결과

그림 4는 고출력송신조립체의 제작사진이며, RF 구동



(a) HPA 증폭모듈 제작사진
(a) Photograph of fabricated high power amplifier module



(b) 입력 대비 출력레벨 측정
(b) Measured output power versus input power

그림 3. HPA 증폭모듈 제작 및 측정결과
Fig. 3. Fabrication and measurement results of high power amplifier module.

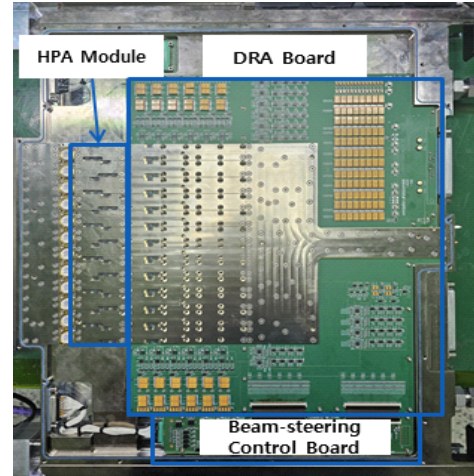


그림 4. 제작된 고출력송신조립체 제작사진
Fig. 4. Photograph of high power transmission board.

증폭조립체, HPA 증폭모듈, 빔조향제어조립체로 이루어져 있다. 제작된 고출력송신조립체의 성능 확인을 위하여 출력 레벨, 출력 평탄도, 입력 VSWR, 채널간 격리도, 채널간 진폭편차 및 시간지연편차 등을 측정하였다. 그림 5는 고출력송신조립체 12개 채널의 평균 출력레벨을 나타낸 그래프이다. CW 신호의 송신 출력은 각 채널에서 주파수 평균 41.7 dBm(14.7 W) 이상을 보였고 대역 내 출력 평탄도는 최대 3.92 dB로 목표성능을 만족하였다.

제작된 고출력송신조립체의 입력 반사손실은 전 주파수 대역에서 약 -15 dB 이하로 입력 VSWR이 2:1 이하의 규격을 만족하였다(그림 6). 표 3은 중심 주파수에서의 각 채널별 시간지연 가변범위(0~765 ps)에 따른 크기 및

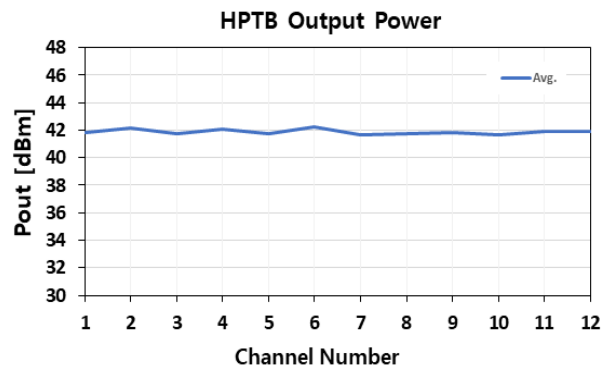


그림 5. 채널별 주파수평균 출력레벨
Fig. 5. Average output power for frequency of each channel.

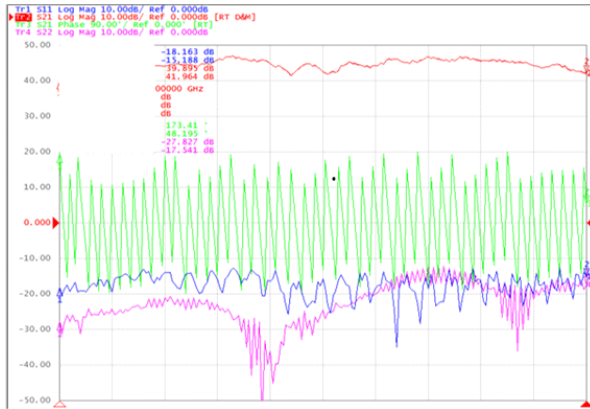


그림 6. 제작된 고출력송신조립체 S-parameter 측정결과
Fig. 6. Measured S-parameter results of HPTB.

표 3. 채널별 시간지연 가변범위에 대한 크기 및 위상 오차[RMS]

Table 3. Magnitude and phase RMS error over time delay range respect to channels.

Channel no.	RMS amplitude error [dB]	RMS TTD error [ps]
Ch01	0.19	1.68
Ch02	0.26	1.42
Ch03	0.28	1.35
Ch04	0.26	1.37
Ch05	0.21	1.11
Ch06	0.23	1.23
Ch07	0.17	1.02
Ch08	0.16	1.34
Ch09	0.17	1.32
Ch10	0.13	1.27
Ch11	0.21	0.72
Ch12	0.14	1.01

위상 오차를 나타내었다. 시간지연 가변에 의한 오차를 보상해주기 위해 자동화 프로그램을 통해 LUT를 추출하였으며, 모든 채널에서 크기오차는 0.5 dB[RMS] 이하, 시간지연오차는 2 ps[RMS] 이하를 가졌다. T/R 모듈의 채널간 간섭 및 진폭/위상 편차는 방사패턴과 빔 조향각에 영향을 주는 요소가 됨으로 제작한 고출력송신조립체의 채널간 격리도, 진폭 편차 및 위상 편차를 확인하였다. 채널간 격리도의 경우 그림 7과 같이, F+11 GHz에서 최대

42.84 dBc로 주변 채널에 의한 영향이 크지 않은 것으로 확인된다. 그림 8은 측정된 출력 레벨 및 위상의 중간값을 기준으로 각 채널별 진폭 편차와 시간지연 편차를 나

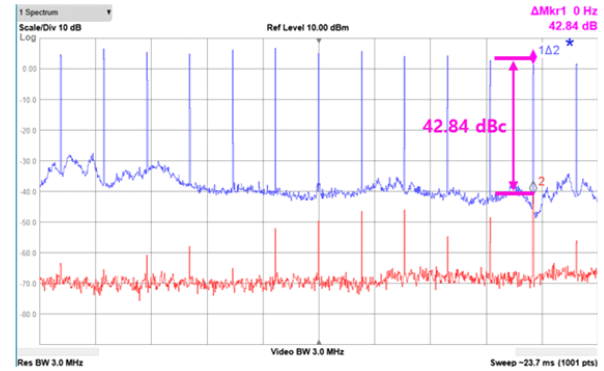
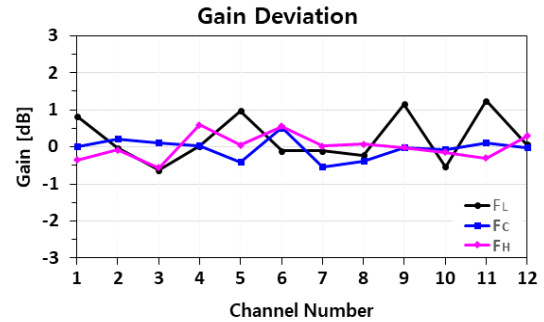
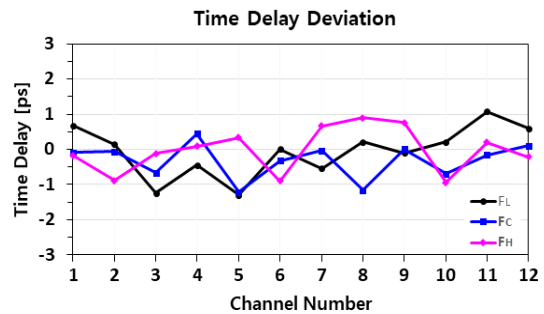


그림 7. 주파수별 채널간 격리도 측정결과
Fig. 7. Measured channel isolation by frequency.



(a) 채널간 진폭 편차
(a) Amplitude deviation between channels



(b) 채널간 시간지연 편차
(b) Time delay deviation between channels

그림 8. 채널간 진폭 및 시간지연 편차
Fig. 8. Gain and time delay deviation for each channel.

표 4. 전자전용 고출력 송신장치 비교

Table 4. Comparison of high power transmission systems.

Parameter	This work	Ref. [7]	Ref. [8]
Frequency	C~Ku band	2~6 GHz	2~6 GHz
Output power	14.7 W	52.4 W	22.3 W
Output flatness	3.92	—	—
Input VSWR	1.4:1	1.67:1	1.846:1
RMS amplitude error	≤ 0.28 dB [RMS]	—	—
RMS TTD error	≤ 1.68 ps [RMS]	—	—
Channel isolation	≤ 42.84 dBc	—	—
Gain deviation	≤ 1.25 dB	< 1.74 dB	< 1.313 dB
Time delay deviation	≤ 1.3 ps	$-9.12^\circ \sim 8.57^\circ$	$-6.5^\circ \sim 8.3^\circ$

타내었다. 제작된 고출력송신조립체의 채널간 진폭 편차는 $-0.57 \sim 1.25$ dB, 시간지연 편차는 $-1.30 \sim 1.07$ ps 이 내로 규격을 만족하였다(표 4).

V. 결 론

본 논문에서는 다중위협 신호를 대응하기 위해 반도체 증폭소자를 기반으로 한 광대역 위상배열 고출력송신조립체를 설계 및 제작, 측정 결과를 확인하였다. 기존의 긴 예열시간과 수 kV의 사용하던 TWTA에서 수십 V의 저전압과 빠른 동작속도를 갖는 GaN 기반의 화합물 반도체 소자로의 대체 가능성을 확인하였다. 제작한 고출력송신조립체는 주파수 평균 15.4 W 이상의 출력을 보였으며, 출력 평탄도는 3.92 dB 이하, 채널간 격리도는 42.84 dBc로 측정되었다. 채널간 진폭 편차는 $-0.57 \sim 1.25$ dB, 시간지연 편차는 $-1.30 \sim 1.07$ ps 이내에 분포하며 모든 목표성능을 만족하였다. 본 논문의 광대역 위상배열 고출력송신조립체는 다중위협으로부터 신속히 대응이 요구되는 전자전장비에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

References

[1] J. D. Kim, B. G. Kim, S. H. Yoo, K. W. Lee, M. S. Lee,

and W. Y. Lee, "Design of wide band 80 W solid state power amplifier using GaN HEMT," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 9, pp. 770-779, Sep. 2020.

- [2] J. Kim, S. Jung, S. Yoo, J. Jo, J. Lee, and W. Lee, et al., "Design and fabrication of S to C-band GaN solid state power amplifier for the electronic warfare," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 5, pp. 435-445, May 2021.
- [3] R. Rotman, M. Tur, and L. Yaron, "True time delay in phased arrays," *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, no. 3, pp. 504-518, Mar. 2016.
- [4] J. Jung, J. Ryu, J. Park, and J. Seo, "A study on configuration of true time delay phase shifter for wideband beam steering phased array antenna," *The Journal of Korean Institute of Military Science and Technology*, vol. 20, no. 3, pp. 413-420, 2017.
- [5] K. Sreenivasulu, A. Kedar, and B. Kuriokose, "T/R module technologies for radar EW and communication applications," in *2022 IEEE Microwaves, Antennas, and Propagation Conference(MAPCON)*, Bangalore, Dec. 2022, pp. 1578-1584.
- [6] J. C. Jeong, I. B. Yom, J. D. Kim, W. Y. Lee, and C. H. Lee, "A 6~18-GHz GaAs multifunction chip with 8-bit true time delay and 7-bit amplitude control," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 5, pp. 2220-2230, May 2018.
- [7] W. G. Seo, S. G. Park, J. R. Park, and C. S. Lee, "Design and fabrication of wideband phased array high power transmitter for the electronic warfare," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, vol. 23, no. 8, pp. 489-495, Aug. 2022.
- [8] K. N. Jang, S. W. Cho, J. D. Kim, J. H. Ko, Y. I. Jeon, and C. H. Kang, "Development of wideband high-power TRM for electronic warfare multiple threat jamming transceiver," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 10, pp. 888-893, Oct. 2021.

정 영 훈 [LIG 넥스원/연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8296-2892>



2020년 2월: 숭실대학교 전자정보공학부 (공학사)
2023년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학 석사)
2023년 1월~현재: LIG 넥스원 연구원
[주 관심분야] RF Devices, T/R Module, Radar, EW Systems 등

박 성 준 [LIG넥스원/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0297-615X>



2021년 2월: 호서대학교 전자디스플레이 공학부 (공학사)
2023년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학 석사)
2023년 1월~현재: LIG 넥스원 연구원
[주 관심분야] RF 집적회로 및 송수신 모듈 설계, 안테나 및 수동회로 설계 등

노 연 준 [RFHIC(주)/전문연구원]

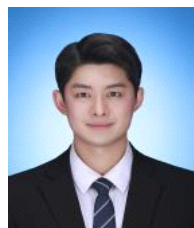
<https://orcid.org/0009-0006-0123-4193>



2013년 2월: 한국공학대학교 전자과 (공학사)
2020년 2월~현재: RFHIC(주) 전문연구원
[주 관심분야] RF, RF Power Amplifier, TRM 등

최 주 영 [LIG 넥스원/연구원]

<https://orcid.org/0009-0008-2776-2773>



2022년 8월: 숭실대학교 전자정보공학부 (공학사)
2022년 11월~현재: LIG 넥스원 연구원
[주 관심분야] 레이더 시스템, 능동위상배열 송수신기

김 민 철 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4801-0027>



2005년 2월: 성균관대학교 정보통신공학부 (공학사)
2007년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
2007년 1월~현재: LIG넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 레이더 시스템, 광자레이더, 능동위상배열 송수신기

한 재 섭 [LIG 넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4410-6240>



2005년 2월: 숭실대학교 정보통신공학과 (공학사)
2020년 8월: 연세대학교 통신방송공학과 (공학석사)
2004년 12월~2007년 4월: LG Philips LCD 엔지니어
2007년 10월~현재: LIG 넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 능동 위상 배열 안테나 시스템, 다기능 레이더

최 남 우 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8287-3312>



2002년 2월: 명지대학교 전자공학과 (공학사)

2002년 10월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 전자전 시스템, 신호처리, 방향탐지

강 창 현 [RFHIC(주)/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4433-8404>



2005년 2월: 순천향대학교 정보기술공학부 (공학사)

2004년 12월~현재: RFHIC(주) 전문연구원

[주 관심분야] 전자전 시스템, 레이더 시스템, RF 송수신 모듈

김 상 수 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2606-0947>



2008년 2월: 성균관대학교 정보통신공학부 (공학사)

2007년 12월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 전자전 시스템, 전자공격 기법 개발