

수직적 모드 변환을 이용한 W-대역 4-Way 도파관 전력 결합기

W-Band 4-Way Waveguide Power Combiner Using Perpendicular Mode Conversion

강봉모 · 김완식* · 이주영* · 김기철** · 정재수** · 정진호

Bongmo Kang · Wansik Kim* · Juyoung Lee* · Kichul Kim** · Jaesoo Jung** · Jinho Jeong

요 약

본 논문에서는 미래 통신에 필요한 빠른 데이터 전송뿐만 아니라, 다양한 무기체계에 고출력으로 적용 가능하도록 W-대역에서 동작하는 광대역 저 손실의 4-way 도파관 전력 결합기를 설계 및 제작하였다. 이 전력 결합기의 모드 변환부에서 입력 도파관의 전자기파를 90° 회전하여 출력 도파관으로 분배한다. 이 모드 변환부는 소형으로 설계되어 작은 삽입 손실을 가지게 된다. 또한, 네 개의 출력 도파관이 입력 도파관을 기준으로 완벽한 대칭을 이루기 때문에 출력 단자로의 삽입 손실과 위상에서 불균형성이 작은 장점이 있다. 그뿐만 아니라, 유전체나 흡수체를 사용하지 않으므로 손실이 작고 허용 전력이 높으며, 제작이 비교적 간단하다. 설계된 전력 결합기는 측정 결과, W-대역 전체에서 0.99 dB 이하의 삽입 손실과 14.0 dB 이상의 입력 반사 손실 등 우수한 특성을 보였다.

Abstract

In this study, a broadband, low-loss, 4-way waveguide power combiner operating in the W-band is designed and fabricated. The electromagnetic fields in the input waveguide are rotated by 90 degrees and distributed to the output waveguides by using the mode converter. In addition, four output waveguides are placed symmetrically along the input waveguide to minimize the imbalances in the insertion loss and phase shifts. It achieves low insertion loss and high power-handling capability, because it consists of metals without dielectric substrates or absorbers. The fabricated power combiner shows excellent performance, with an insertion loss of less than 0.99 dB and a return loss of more than 14.0 dB across the full W-band.

Key words: Power Combiner, Waveguide, W-Band, Mode Conversion

I. 서 론

W-대역은 공기 중 감쇄가 작고, 파장이 짧은 장점이 있어 상업용/군사용 고해상도 레이다 및 이미징(검색 보

안)에 많이 활용되고 있다^{[1][2]}. 또한 미래 통신에 필요한 빠른 데이터 전송뿐만 아니라, 다양한 무기체계에 고출력으로 적용 가능하도록 우수한 성능을 갖는 고출력 신호원이 필수적이다. 하지만, 반도체 전력 증폭기의 출력 전

「본 연구는 국방과학연구소 계약번호 UG200003ED에 의하여 지원된 과제로 수행되었습니다.」

서강대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Sogang University)

*LIG 넥스원(주) (LIG Nex1 Co., Ltd.)

**국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

· Manuscript received March 11, 2021 ; Revised March 29, 2021 ; Accepted April 2, 2021. (ID No. 20210311-022)

· Corresponding Author: Jinho Jeong (e-mail: jjeong@sogang.ac.kr)

력은 주파수의 제공에 반비례하므로 W -대역에서 고출력을 얻기 어렵다. 따라서 전력 결합기를 이용하여 여러 개의 전력 증폭기의 전력을 결합하는 방법이 널리 활용된다^[3]. 전력 결합기는 손실이 작고 광대역 특성을 가져야 한다. W -대역에서는 손실이 작은 구형 도파관을 이용하여 전력 결합기가 설계되고 있다. 가장 간단한 형태의 도파관 전력 결합기로 Tee-junction이 있으며, 두 개의 전력 증폭기를 결합할 수 있다^[4]. 결합하는 전력 증폭기의 개수를 증가시키기 위해서 이 Tee-junction을 이전 형태로 결합할 수 있으나, 이 경우 도파관 길이가 길어져서 손실이 증가하는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 프로브 혹은 TE_{01} 모드 변환기를 이용해 방사형 형태로 전력을 결합하는 구조가 제안된 바 있다^{[5][6]}. 이 구조는 많은 전력 증폭기를 결합할 수 있고, 균등한 전력 분배, 위상에서의 불균형성이 작은 장점이 있다. 하지만 이를 W -대역에서 사용하기 위해서는 매우 작은 직경의 프로브가 필요하여, 제작이 어렵고 가공 오차에 특성이 민감하게 변하는 문제가 있다. 또한 사용되는 유전체에 의해 삽입 손실이 증가하고, 최대 허용 전력이 작은 단점이 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 유전체를 사용하지 않으며, 간단한 형태의 모드 변환부를 가지는 소형 저 손실 W -대역 4-way 전력 결합기를 제시한다. 이 모드 변환부는 수직으로 입사하는 전자기파의 모드를 90° 회전시키는 기능을 한다. 이를 통해 도파관 입출력을 서로 수직으로 배치할 수 있어 전력 결합 모듈 구성 시 도파관 길이를 최소화하여 손실을 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 이 전력 결합기는 모드 변환을 위하여 유전체 기판을 사용하지 않고 금속으로만 이루어진 매우 단순한 구조로서, 손실이 작고 허용 전력이 높으며 제작 과정이 단순한 장점이 있다^[7]. 본 연구에서는 제시된 전력 결합기를 전자기 시뮬레이터 HFSS(high frequency structure simulator, ansys)로 설계하였다. 제작된 W -대역 전력 결합기는 측정 결과, 저 손실 광대역 특성을 보였다.

II. 4-Way 전력 결합기 설계

기존의 방사형 전력 결합기는 출력 도파관과 같은 평

면에 입력 도파관이 있어 이를 90° 꺾어 수직으로 만들어 주어야 한다. 이는 전력 결합 모듈의 크기를 키울 뿐만 아니라, 삽입 손실을 저하시키는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 그림 1과 같은 4-way 전력 결합기를 제안한다. xy 평면에 네 개의 출력 도파관이 서로 90° 를 이루고 있으며, 이에 수직인 z 축으로 입력 도파관이 있다. 입력 도파관의 E -평면은 x 축과 45° 각도를 이루고 있다.

입력 도파관의 TE_{10} 모드의 전자기파는 전기장이 수평 방향을 가지게 되며, 모드 변환부에 의해 전자기장이 90° 회전하여 네 개의 출력 도파관으로 분배된다. 모드 변환부는 다섯 개의 도파관이 결합되는 부분으로, 중앙에 금속 재질의 정사각기둥이 전력 분배 및 전기장 회전 기능을 한다. 그림 2(a)는 모드 변환부에서 전기장이 회전하고 분배됨을 보여준다. 그림에서 단자 2, 5의 전기장 방향은 서로 같고, 3, 4와는 180° 위상차를 가지는 것을 알 수 있다. 그림 2(b)는 도파관 내부 전기장의 세기를 나타낸다. 입력 전력이 출력 도파관으로 동일한 세기로 분배됨을 알 수 있다.

이 전력 결합기는 출력 도파관이 입력 도파관과 완벽한 대칭 구조를 이루기 때문에, 네 개의 출력 단자로의 삽입 손실과 위상에서 불균형성이 작다는 장점이 있다. 그리고 이 결합기는 유전체나 흡수체를 사용하지 않으므로 손실이 작고 허용 전력이 높으며, 제작이 비교적 간단하다는 장점이 있다.

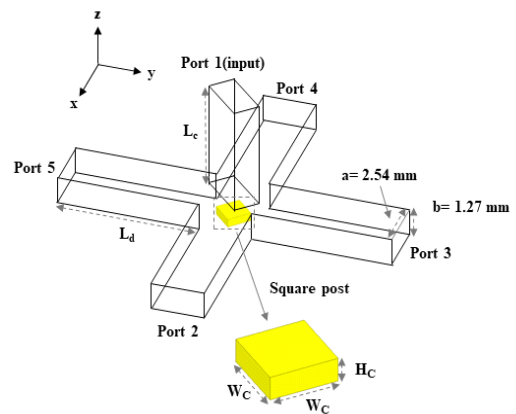


그림 1. 4-way 전력 결합기 구조

Fig. 1. Structure of 4-way power combiner.

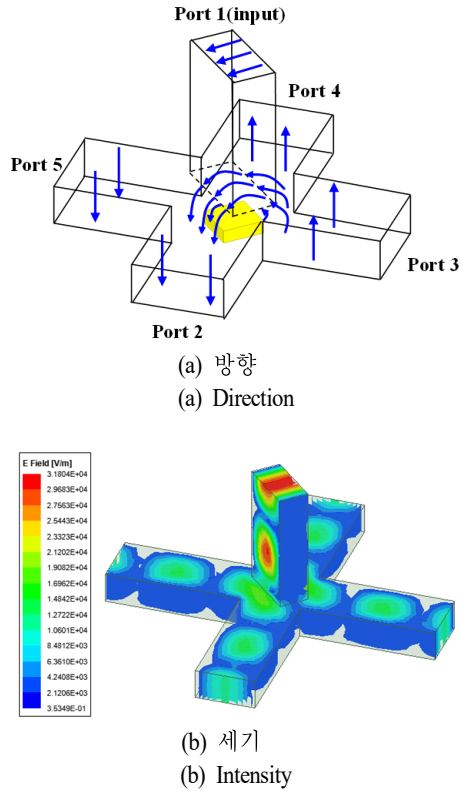


그림 2. 모드 변환부의 전기장 분포

Fig. 2. Electric field distribution in mode conversion part.

이 전력 결합기의 설계 변수에는 정사각형 기둥의 크기로 가로, 세로의 길이(W_c)와 높이(H_c)가 있다. 본 논문에서는 상용 시뮬레이터를 통해 이 치수를 최적화하였다.

그림 3은 W_c , H_c 가 전력 결합기의 입력 반사 손실($-20\log |S_{11}|$) 특성에 미치는 영향을 보여준다. 그림 2(a)에서 H_c 가 증가함에 따라 임피던스 정합 주파수가 증가하는 것을 알 수 있다. $H_c=0.38$ mm일 때, 가장 광대역 특성을 보인다. 반면, 그림 2(b)에서 W_c 는 1.14 mm를 중심으로 ± 0.08 mm 변했을 때, 임피던스 정합 주파수에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

시뮬레이션에서 최적화된 전력 결합기의 치수를 표 1에 제시하였다. 그림 4(a)는 최적화된 전력 결합기의 특성을 보여준다. W-대역 전체에서 11.3 dB 이상의 입력 반사 손실을 가지며, 0.45 dB 미만의 삽입 손실($-20\log |S_{21}|$)을 보여준다. 출력 단자 간의 격리도의 경우, 그림 4(b)와 같이, 마주 보는 단자 간의 격리도(S_{42})가 제일 낮으며,

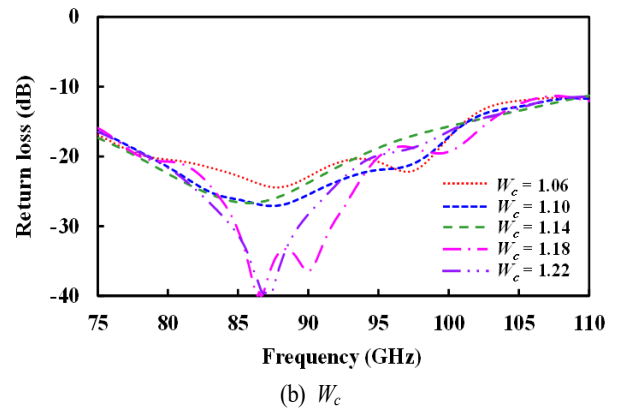
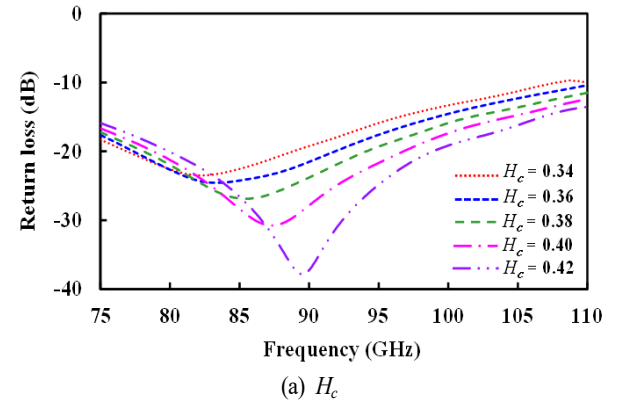


그림 3. 금속 정사각기둥의 크기에 따른 시뮬레이션 결과 (단위: mm)

Fig. 3. Simulation results depending on the size of the square metal post (Unit in mm).

표 1. 최적화된 4-way 전력 결합기의 치수 (mm)

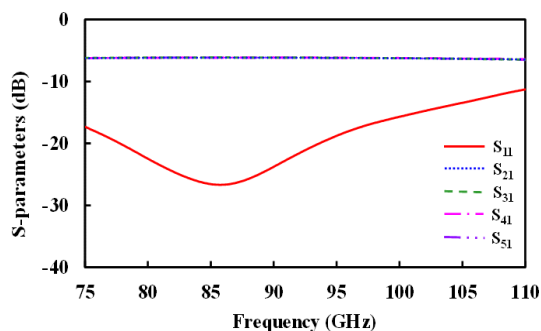
Table 1. Dimensions of the optimized 4-way power combiner (in mm).

| L_d | L_c | H_c | W_c |
|-------|-------|-------|-------|
| 18.73 | 15.00 | 0.38 | 1.14 |

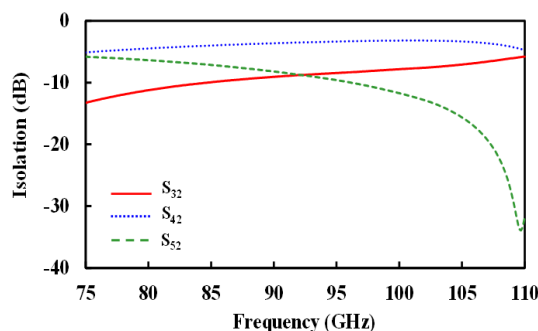
W-대역에서 3.3 dB 이하이다. 출력 단자의 반사 손실은 그림 4(c)에 제시하였으며, W-대역에서 9.4 dB 이상의 값을 가진다.

Ⅲ. 제작 및 측정

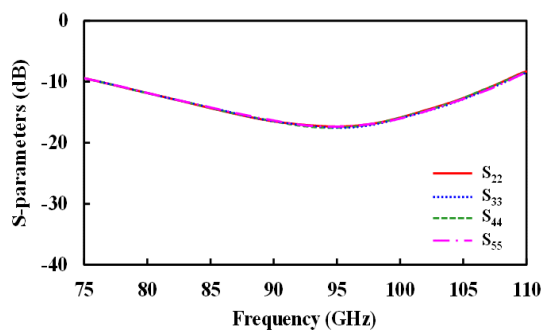
그림 5(a)는 제작된 4-way 전력 결합기 지그이다. 이 지



(a) 입력 반사 손실, 삽입 손실
(a) Input return loss, insertion loss



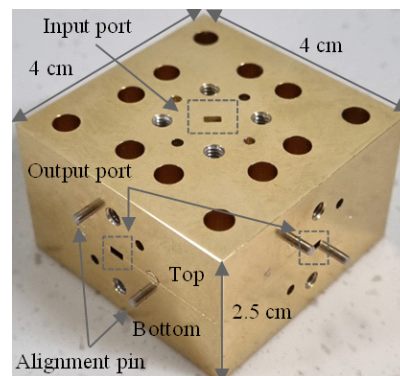
(b) 격리도
(b) Isolation



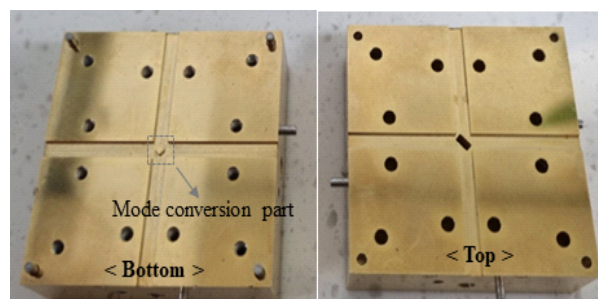
(c) 출력 반사 손실
(c) Output return loss

그림 4. 최적화된 4-way 전력 결합기의 시뮬레이션 결과
Fig. 4. Simulation results of optimized 4-way power combiner.

그는 그림 5(b)와 같이 출력 도파관의 H-평면 중앙에서 분리된 두 개의 알루미늄 블록으로 제작되었다. 지그 표면은 W-대역에서의 표피 깊이(skin depth)보다 충분히 두껍게 도금되었다. 지그 전체 크기는 $4.0\text{ cm} \times 4.0\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ 이다. 제작한 4-way 전력 결합기의 S-parameters는 도파



(a) 외부 모습
(a) External view



(b) 내부 모습
(b) Internal view

그림 5. 제작된 4-way 전력 결합기
Fig. 5. Fabricated 4-way power combiner.

관 입출력을 갖는 벡터 네트워크 분석기로 측정되었다. 측정 전 W-대역 도파관을 이용하여 TRL(through-reflect-line) 기법으로 보정되었다.

제작된 4-way 전력 결합기는 입력 단자가 출력 도파관에 수직이다. 따라서 90° E-plane bend를 사용하여 입력 반사 손실 및 삽입 손실을 측정하였다. 나머지 단자는 종단(termination)을 연결하였다. 90° E-plane bend는 back-to-back으로 연결하여 측정 시, W-대역에서 반사 손실은 29.0 dB 이상의 반사 손실, 0.27 dB 이하의 삽입 손실 특성을 보인다. 아래 측정 결과에서 90° E-plane bend의 삽입 손실은 보정되었다. 종단은 W-대역에서 28.1 dB 이상의 반사 손실 특성을 보인다.

그림 6은 제작된 4-way 전력 결합기의 S-parameters 측정 결과를 보여준다. 그림 6(a)에서처럼 전력 결합기의 입력 반사 손실은 W-대역에서 14.0 dB 이상으로 넓은 대역

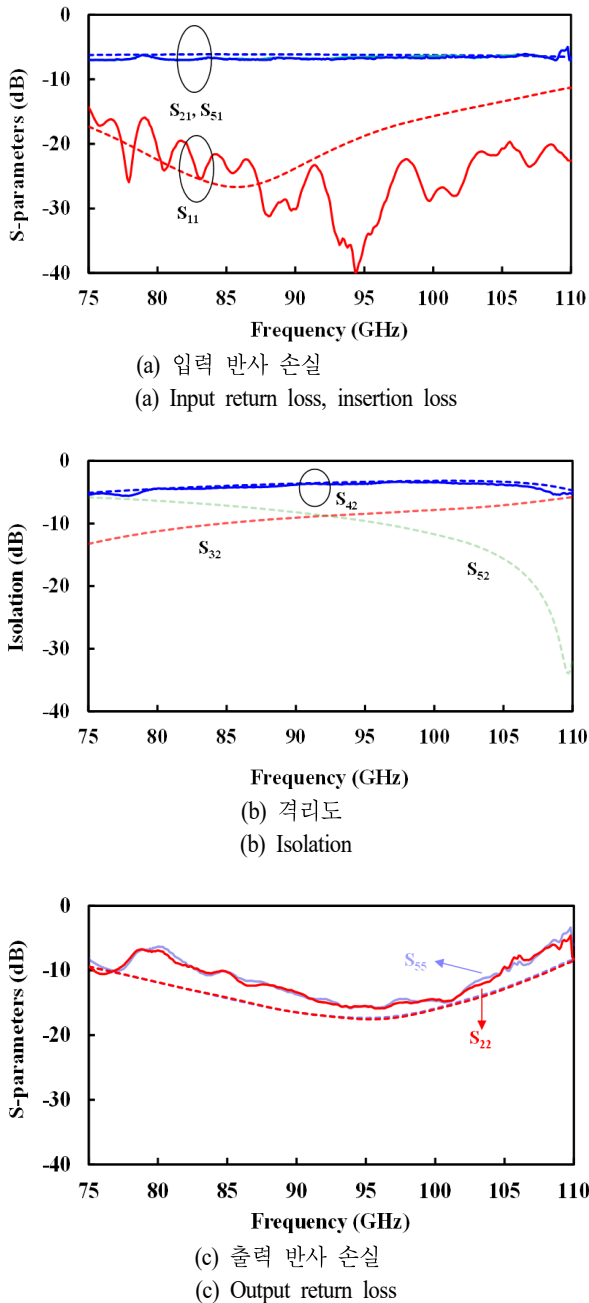


그림 6. 4-way 전력 결합기의 시뮬레이션(파선)과 측정(실선) 결과

Fig. 6. Simulated(slotted) and measured(solid) results of 4-way power combiner.

폭을 가진다. 삽입 손실의 경우, 79.0 GHz에서 0.25 dB로 가장 낮다. 이는 94.4 %의 높은 전력 결합 효율에 해당하는

다. 이 주파수에서의 삽입 손실의 불균형성은 0.03 dB, 위상의 불균형성은 5°로 매우 낮은 편이다. W-대역 전체에서 이 전력 결합기의 삽입 손실은 0.99 dB 이하로 시뮬레이션보다 약 0.5 dB 높다. 이러한 차이는 H-평면 중앙에서 나누어진 두 개의 지그를 결합할 때 발생할 수 있는 불충분한 접촉에서 주로 기인한다는 것을 시뮬레이션과 측정을 통해 알 수 있다^[8]. 격리도의 경우, 그림 6(b)에서처럼, 마주 보는 단자간의 격리도는 약 3.4 dB로 시뮬레이션은 측정 결과를 잘 예측하고 있다. 그림 6(c)는 출력 반사 손실을 나타낸다. W-대역에서 4.3 dB로 우수한 특성을 보이고 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 전자기장을 90° 회전하는 모드 변환부를 이용한 소형 저 손실 W-대역 4-way 전력 결합기를 설계 및 제작하였다. 모드 변환부의 금속 사각기둥의 크기를 최적화하여 임피던스 정합 대역폭을 최대화하였다. 측정된 전력 결합기는 시뮬레이션과 비슷한 결과를 보이며, 전체 W-대역에서 14.0 dB 이상의 입력 반사 손실과 0.99 dB 이하의 우수한 삽입 손실 특성을 보였다. 따라서 설계된 전력 결합기는 W-대역 고출력 전력 결합기에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] A. E. Fathy, S. W. Lee, and D. Kalokitis, "A simplified design approach for radial power combiners," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 1, pp. 247-255, Jan. 2006.
- [2] K. Song, Y. Fan, and Z. He, "Broadband radial waveguide spatial combiner," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, no. 2, pp. 73-75, Feb. 2008.
- [3] G. Zhai, B. Shi, "Compact low loss millimeter wave 8-way radial waveguide power combiner," in *IEEE Region 10 Conferences(TECON)*, Penang, Nov. 2017, pp. 1598-1601.
- [4] J. Li, L. Li, L. Lu, H. Shi, H. Huo, and A. Zhang,

"Four-way waveguide power divider design for W-band applications," *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, vol. 28, no. 5, p. e21242, Jan. 2018.

- [5] J. R. Montejó-Garai, J. A. Ruiz-Cruz, and J. M. Rebollar, "5-way radial power combiner at W-band by stacked waveguide micromachining," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 905, pp. 91-95, Oct. 2018.
- [6] Q. X. Chu, D. Y. Mo, and Q. S. Wu, "An isolated radial

power divider via circular waveguide TE_{01} -mode transducer," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 12, pp. 3988-3996, Dec. 2015.

- [7] J. L. Cano, F. D. Paolo, A. Mediavilla, and P. Colantonio, "Full-band oversized turnstile-based waveguide four-way power divider/combiner for high-power applications," *Electronics*, vol. 8, no. 2, p. 193, Feb. 2019.
- [8] I. Stil, A. L. Fontana, B. Lefranc, A. Navarrini, P. Serres, and K. F. Schuster, "Loss of WR10 waveguide across 70~116 GHz," in *22nd International Symposium on Space Terahertz Technology*, Tokyo, Apr. 2012.

강 봉 모 [서강대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-9501-4338>



2020년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학부 (공학사)
2020년 3월~현재: 서강대학교 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] RF 집적회로 및 송수신 모듈 설계, 안테나 및 수동 회로 설계

이 주 영 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6793-812X>



2005년 2월: 광운대학교 전자공학부 (공학사)
2007년 2월: 광운대학교 전자공학부 (공학석사)
2007년 1월~현재: (주)LIG넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 초고주파 집적회로, 영상레이더, 위성시스템

김 완 식 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2198-8754>



1991년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학사)
1993년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학석사)
2004년 2월: 건국대학교 정보통신공학과 (공학박사)
2001년 12월: 고등기술연구원 책임연구원

2005년 08월~현재: (주)LIG넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 초고주파 회로설계, RF/밀리미터파 시스템, MMIC, 레이더 및 관련 센서 시스템

김 기 철 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1652-5576>



2011년 2월: 광주과학기술원 (공학석사)
2016년 8월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학박사)
2007년 1월~2008년 11월: 삼성탈레스 연구원
2016년 10월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] RF 회로 및 전력증폭기, 통신용 초고주파 기술

정 재 수 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7094-7476>



1988년 2월: 경북대학교 (공학사)
1990년 2월: 경북대학교 컴퓨터공학 (공학 석사)
1990년 2월~현재: 국방과학연구소 책임 연구원
[주 관심분야] Computer Network Protocol, Mobile Ad-hoc System

정 진 호 [서강대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-2487-6958>



1997년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학사)
1999년 2월: 서울대학교 전기공학부 (공학 석사)
2004년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
2004년 10월~2007년 2월 : UC San Diego,

Post-doctoral Researcher

2007년 3월~2010년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 조교수
2010년 3월~현재: 서강대학교 전자공학과 교수
[주 관심분야] 마이크로파/밀리미터파/THz 집적회로 및 모듈, RF 전력증폭기, 무선전력전송, 라디오미터