

위성용 X 대역 Comblane 다이플렉서

X-Band Comblane Diplexer for Satellite

임정택* · 이현승*** · 이상록*,** · 임원규** · 이선익** · 김철영*

Jeong-Taek Lim* · Hyun-Seung Lee*** · Sang-Rok Lee*** ·

Won-Gyu Lim** · Sun-ik Lee** · Chul-Young Kim*

요 약

다이플렉서는 송신단과 수신단 사이에 높은 격리도 특성을 가지면서 안테나 단자와 연결되어 있어 송신 전력이 수신기에 미치지 못하도록 한 개의 안테나로 송수신을 겸용하기 위한 소자이다. 본 논문에서는 위성용 X 대역 다이플렉서를 설계하고 제작하였다. 먼저 송신기와 수신기의 대역통과 필터를 설계하고, 두 대역통과 필터를 결합하여 X 대역 다이플렉서를 설계하고 제작하였다. 측정 결과 삽입손실이 0.75 dB 미만이고 반사손실이 20 dB 이상인 것으로 나타났다. 그리고 채널격리도 특성은 수신단(Rx)에서 103 dB 이상으로, 격리도 요구 조건을 만족하였다.

Abstract

Diplexers are one of the key devices required to separate uplink and downlink signals in transceivers using a single grounded antenna. This study presents the design of an X-band diplexer for satellites. First, bandpass filters of the transmitter and receiver are designed. Next, an X-band diplexer is designed by combining the two bandpass filters. Simulation results show that the insertion loss is less than 0.75 dB and the return loss is more than 20 dB. Additionally, the channel isolation property is greater than 103 dB, thereby satisfying the requirements for diplexers.

Key words: Diplexer, Satellite Communication, Radio Frequency Distribution Unit, Low Orbit Satellite, Communication Component

I. 서 론

다이플렉서는 송신단과 수신단 사이에 높은 격리도 특성을 가지면서 안테나 단자와 연결되어 있어 송신 전력이 수신기에 미치지 못하도록 한 개의 안테나로 송수신

을 겸용하기 위한 소자이다^[1]. 위성용 S 대역(2~4 GHz) 주파수 자원의 부족으로 S 대역 사용이 어려워짐에 따라, 주파수 자원이 풍부한 X 대역을 위성용으로 사용하려는 추세이다. 위성용 X 대역(8~12 GHz) 고주파 분배기는 통신을 위한 필수 소자이지만, 현재까지 국내에서는 개발

「이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2021R1A4A1032580).」

「이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1A2C1004805).」

*충남대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Chungnam National University)

**한국항공우주연구원 위성분체개발부(Satellite R&D Division, Korea Aerospace Research Institute)

***원광대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Wonkwang University)

· Manuscript received September 10, 2021 ; Revised October 5, 2021 ; Accepted April 29, 2022. (ID No. 20210910-078)

· Corresponding Author: Chul-Young Kim (e-mail: cykim@cnu.ac.kr)

되지 않았다. 고주파에서 마이크로스트립과 같은 여파기 형태는 X 대역에서는 손실이 크며, 고전력을 전송하기 어려운 단점이 있다^[2]. 따라서 X 대역 위성용에 사용되기 위해서는 품질계수가 높고 낮은 삽입손실을 가지며, 고전력을 다룰 수 있는 공동형 공진기를 사용하는 것이 바람직하다^[3]. 본 논문에서는 위성용 X 대역 고주파분배기의 핵심인 다이플렉서를 설계하고 제작하였다.

II. 설계 및 제작

2.1 설계

위성 고주파분배기에서 가장 핵심적인 구성요소는 다이플렉서라고 할 수 있다. 다이플렉서는 하나의 경로를 두 개의 신호가 공유할 때 사용하게 된다. 즉, 같은 안테나를 이용하면서 송신단과 수신단을 분기하는 역할을 다이플렉서가 담당한다. 다이플렉서의 구조는 두 개의 대역통과 필터를 조합하고, 그 중간을 안테나(또는 cable)와 적절히 매칭시켜서 만든다^[4].

그림 1은 다이플렉서의 송신단과 수신단을 구성하는 필터를 설계하고 제작하기 위한 흐름도이다.

첫 번째 단계인 스펙결정 단계에서는, 송신단과 수신단 각각의 필터의 중심 주파수와 대역폭, 삽입손실 등을 결정한다. 표 1에 위성용 X 대역 diplexer의 규격을 나타내었다. 이것은 해외의 기 연구된 X 대역 다이플렉서들을 조사하여 설계할 다이플렉서의 규격을 결정한 것이다.

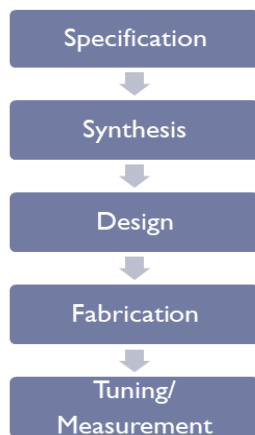


그림 1. 필터 개발을 위한 흐름도

Fig. 1. Filter development process.

표 1. 위성용 X 대역 다이플렉서 설계 사양

Table 1. Specifications of X band diplexer for satellite.

Parameters	Requirements
Operating frequency	RX: 7.5 GHz (± 50 MHz) TX: 8.1 GHz (± 50 MHz)
Insertion loss	<1.0 dB
Ripple at pass band	<0.1 dB
Return loss	>15 dB (VSWR: ≤ 1.5)
Channel isolation	>60 dB

두 번째 단계에서는, 정규화 주파수에서의 설계 파라미터를 합성하여 g 파라미터를 결정한다. 필터 설계에 활용되는 응답특성은 대표적으로 Chebyshev와 Butterworth가 있다. Butterworth형의 경우, 통과 대역에서 리플(ripple)이 존재하지 않아 중심 주파수에서의 삽입 손실에 이점이 있으나, 차단 대역에서의 감쇄도 및 통과 대역 상한과 하한에서의 삽입 손실 특성이 좋지 않다. 이에 반해 Chebyshev형의 경우, 통과 영역에 리플이 존재하나, 차단 대역에서의 감쇄도 특성이 매우 우수해 Butterworth형에 비해 적은 공진기 수로 같은 격리도 요구 조건을 만족시킬 수 있다^[5]. 표 1의 요구 사항을 충족하는 두 개의 대역통과 필터를 설계하기 위해서 차단 대역 감쇄도 특성이 우수한 Chebyshev형을 선택하였다. 대역통과 필터 설계를 위해서는 먼저 저역통과 기본형 필터 계수의 설계가 선행되어야 하며, 이는 식 (1)~식 (4)를 활용하였다^[6]. 수식에 적용하기 위한 공진기의 개수 n 을 구하기 위해서는 송수신 간 격리도 특성을 고려하는 것이 필요하다. 이것은 식 (5)를 통해 산출이 가능하다^[7].

$$\beta = \ln \left[\coth \left(\frac{\text{ripple}/\text{dB}}{17.37} \right) \right], \gamma = \sinh \left[\frac{\beta}{2n} \right] \quad (1)$$

$$a_k = \sin \left[\frac{(2k-1)\pi}{2n} \right], b_k = \gamma^2 + \sin^2 \left(\frac{k\pi}{n} \right) \quad (2)$$

$$g_0 = 1, g_1 = 2 \frac{a_1}{\gamma}, g_k = 4 \frac{a_{k-1} a_k}{b_{k-1} g_{k-1}} \quad (3)$$

$$g_{n+1} = \begin{cases} 1 & (\text{for } n - \text{odd}) \\ \coth^2 \left(\frac{\beta}{4} \right) & (\text{for } n = \text{even}) \end{cases}, k = 2, 3, \dots, n$$

$$n \geq \frac{L_A(\text{dB}) + L_R(\text{dB}) + 6}{20 \log(S + \sqrt{S^2 - 1})} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} L_A &= \text{Stopband Insertion Loss} \\ L_R &= \text{Passband Return Loss} \\ S &= \frac{\text{Reject Bandwidth}}{\text{Filter Bandwidth}} \end{aligned} \quad (5)$$

위성용 X 대역 다이플렉서 설계 사양에서 반사손실 (return loss) 15 dB는 무손실 필터인 경우, 리플로 환산하면 0.1 dB가 된다. 그림 2는 저역통과 프로토타입 필터를 보여준다. $N=5$, 리플 0.1 dB의 특성을 갖는 저역통과 프로토타입 Chebyshev 계수값은 $g_0=1, g_2=1.1468, g_3=1.3712, g_4=g_2, g_5=g_1, g_6=g_0$ 이 된다. 이 계수값을 이용하여 먼저 수신단(7.5 GHz)의 대역통과 필터를 그림 3에 나타내었다. 위성용 다이플렉서는 높은 파워를 사용하기 때문에 도파관(waveguide)이면서 comblinе cavity type 구조를 사용하였다. Comblinе cavity type은 참고문헌 [3]에서 선행연구된 interdigital cavity type^[3]에 비해 통과대역폭을 작게 하므로 채널 간 격리도를 크게 향상시킬 수 있고, 튜닝이 유리하다는 장점이 있다. 자세한 값은 표 2에 나타내었다. 5차 구조이므로 공진기가 5개 사용되고, 필터 양쪽 끝에는 입출력단자가 있다. 각 공진기 위에 튜닝 스크류(나사)가 있고, 공진기와 공진기 사이에 iris를 삽입함으로 공진

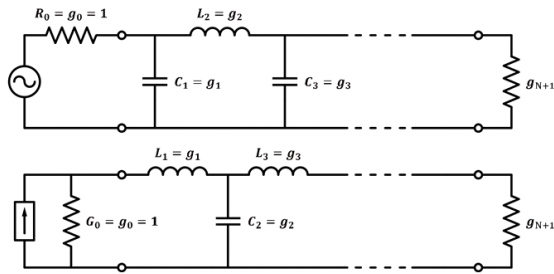


그림 2. 저역통과 프로토타입 필터
Fig. 2. Prototype LPF.

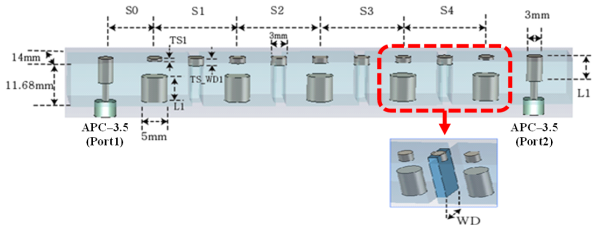


그림 3. 수신단(7.5 GHz)의 BPF 구조
Fig. 3. Structure of RX (7.5 GHz) BPF.

표 2. 수신단(7.5 GHz)의 BPF 설계값
Table 2. Values of RX (7.5 GHz) BPF.

Item	Value (mm)	Item	Value (mm)	Item	Value (mm)
$W \times H \times L$	$14 \times 11.68 \times 96.7$	$L_1 \sim L_5$	6.66	TS_WD1	2
S_0	9.38	TS1, TS5	0.67	WD1, WD4	5.95
S_1, S_4	16	TS2, TS4	1.46	WD2, WD3	5.3
S_2, S_3	16	TS3	1.54	WD_T	2

기 사이의 커패시턴스값을 조절하여 튜닝을 용이하게 하였다. 그림 4는 수신단 대역통과 필터의 모의실험 주파수 응답을 나타낸다. 통과구간인 7.45~7.55 GHz에서 삽입손실은 0.1 dB 이하, 반사손실은 21 dB 이상임을 확인할 수 있었다.

그림 5는 송신단(8.15 GHz)의 대역통과 필터 구조를 보여준다. 수신단보다 송신단의 주파수가 높기 때문에 comblinе cavity의 높이가 10.8 mm로 0.88 mm 낮아졌으

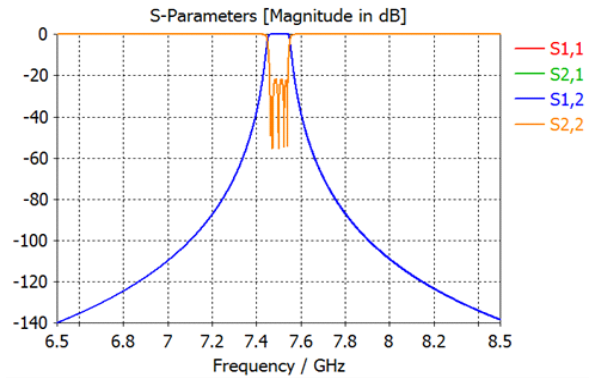


그림 4. 수신단(7.5 GHz) 대역통과필터의 모의실험 주파수 응답
Fig. 4. The simulation result of RX (7.5 GHz) BPF.

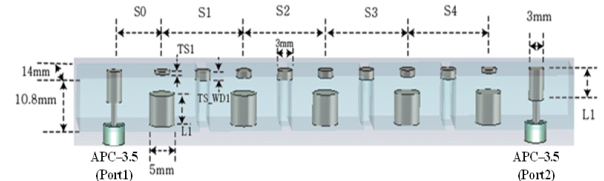


그림 5. 송신단(8.15 GHz)의 BPF 구조
Fig. 5. Structure of TX (8.15 GHz) BPF.

며, $L_1 \sim L_5$ 또한 5.8 mm로 0.86 mm 짧아졌다. WD1과 WD4, WD2와 WD3도 각각 0.29 mm, 0.21 mm 짧아졌다. 송신단 설계값은 표 3에 자세히 나타내었다.

그림 6은 송신단의 모의실험 주파수 응답을 보여준다. 통과대역인 8.1~8.2 GHz에서 삽입손실은 0.1 dB 이하로 목표치에 충분히 만족하였고, 반사손실도 19 dB 이상으로 잘 매칭되었음을 알 수 있다.

그림 7은 송신단 대역통과 필터와 수신단 대역통과 필

표 3. 송신단(8.15 GHz)의 BPF 설계값

Table 3. Values of TX (8.15 GHz) BPF.

Item	Value (mm)	Item	Value (mm)	Item	Value (mm)
$W \times H \times L$	$14 \times 10.8 \times 96.7$	$L_1 \sim L_5$	5.8	TS_WD1	2
S_0	9.38	TS1, TS5	0.68	WD1, WD4	5.66
S_1, S_4	16	TS2, TS4	1.47	WD2, WD3	5.09
S_2, S_3	16	TS3	1.54	WD_T	2

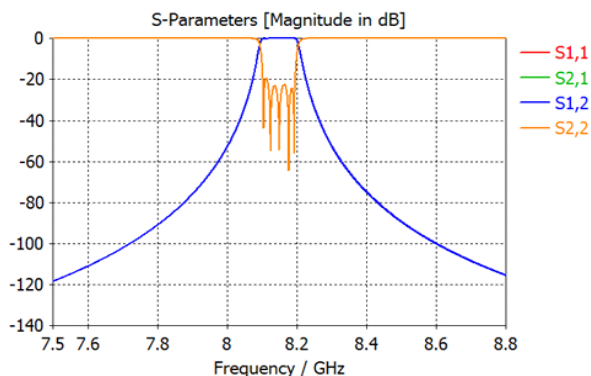


그림 6. 송신단(8.15 GHz) 대역통과필터의 모의실험 주파수 응답

Fig. 6. The simulation results of TX (8.15 GHz) BPF.

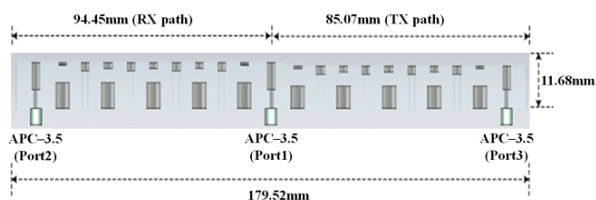


그림 7. 위성용 X 대역 다이플렉서 구조

Fig. 7. Structure of X-band diplexer for satellite.

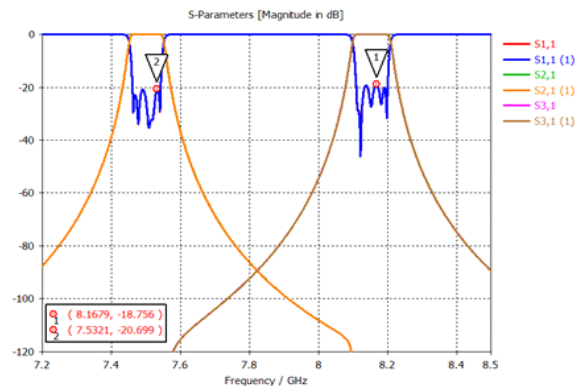


그림 8. 위성용 X 대역 다이플렉서의 모의실험 주파수 응답

Fig. 8. The simulation results of X band diplexer for satellite.

표 4. 위성용 다이플렉서의 모의실험 주파수 응답

Table 4. The simulation result of diplexer for satellite.

Parameters	RX path	TX path
Operating freq. (GHz)	7.45 ~ 7.55	8.1 ~ 8.2
Insertion loss (dB)	<0.1	<0.1
Return loss (dB)	>20	>18
Channel isolation (dB)	>110	>110
Size ($W \times H \times L$ mm)	14×11.68×179.52	

터를 결합하여 만든 위성용 X 대역 다이플렉의 구조를 보여준다.

그림 8은 위성용 X 대역 다이플렉서의 모의실험 주파수 응답을 보여준다. 삽입손실과 반사손실 채널 격리도가 설계 목표치에 충분히 만족하였고, 구체적인 값은 표 4에 나타내었다.

2-2 제작 및 측정 결과

설계한 다이플렉서를 제작하였다. 그림 9는 제작된 위성용 X 대역 다이플렉서를 보여 준다. 모든 도체는 은으로 도금하였고 입출력단은 SMA 커넥터를 사용하여 연결하였다. 그림 10과 그림 11은 각각 위성용 X 대역 다이플렉서의 수신단, 송신단 주파수 응답특성을 보여준다. 수신단 통과대역인 7.45~7.55 GHz에서 반사손실은 21.96 dB 이상이며, 삽입손실은 0.75 dB 미만이다. 군지연과 격

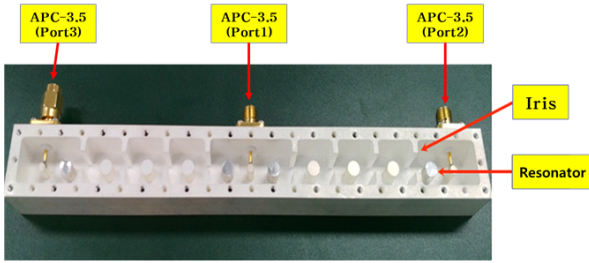


그림 9. 제작된 위성용 X 대역 다이플렉서
Fig. 9. A photograph of the fabricated X-band diplexer for satellite.

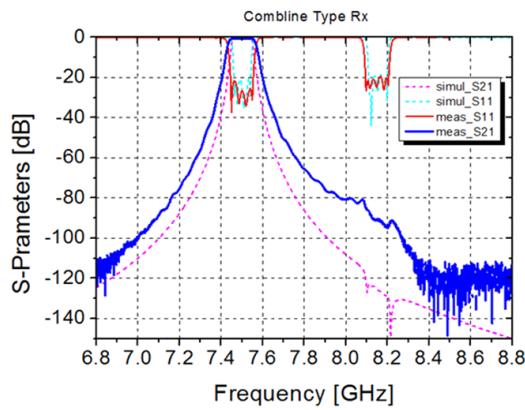


그림 10. 위성용 다이플렉서의 주파수 응답 설계 및 측정 결과-수신(7.5 GHz)단
Fig. 10. Simulated and measured frequency response of diplexer for satellite-RX (7.5 GHz).

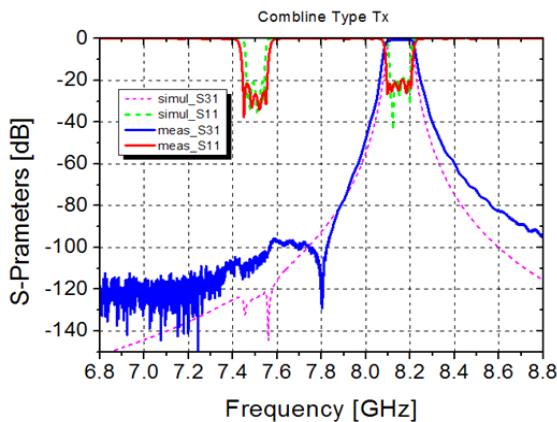


그림 11. 위성용 다이플렉서의 주파수 응답 특성 설계 및 측정 결과-송신단(8.15 GHz)
Fig. 11. Simulated and measured frequency response of diplexer for satellite-TX (8.15 GHz).

표 5. 위성용 다이플렉서의 측정된 주파수 응답
Table 5. The measured result of diplexer for satellite.

No	Item	Specification		Test results
1	Center freq. [MHz]	Rx	7,500	7,500
		Tx	8,150	8,150
2	Band width [MHz]	Rx	100	7,450 ~ 7,550
		Tx	100	8,100 ~ 8,200
3	Insertion loss [dB]	Rx	<1	<0.75
		Tx	<1	<0.98
4	Return loss [dB]	Rx	>16	>21.96
		Tx	>16	>20.03
5	Group delay [ns]	Rx	<10	<3.69
		Tx	<10	<4.99
6	Isolation [dB]	Rx	>60	>103.86
		Tx	>60	>73.60

리도는 각각 3.69 ns 이하, 격리도는 103.86 dB 이상이다. 송신단 통과 대역인 8.1~8.2 GHz에서 반사손실은 20.03 dB 이상이며, 삽입손실은 0.98 dB 미만이다. 지연과 격리도는 각각 4.99 ns 이하, 격리도는 73.60 dB 이상이다. 반사손실과 통과 대역의 삽입손실 측정결과는 설계결과와 거의 유사하며, 각 필터의 스킵트 특성의 차이는 제작과정에서의 오차와 측정기의 한계 등으로 인한 것으로 예상된다. 측정 결과를 표 5에 정리하였으며, 삽입손실, 반사손실, 채널 격리도 등이 설계 목표치보다 뛰어난 것을 확인할 수 있다.

III. 결 론

본 논문에서는 위성용 X 대역 고주파분배기의 핵심인 다이플렉서를 개발 설계하였다. 먼저 송신단(8.15 GHz)과 수신단(7.5 GHz)의 X 대역 대역통과필터를 각각 설계하였고, 두 대역통과필터를 결합하여 위성용 다이플렉서를 설계하였다. 제작 후 측정한 결과, 송신주파수(8.1~8.2 GHz)와 수신주파수(7.45~7.55 GHz)에서 삽입손실이 0.75 dB 미만, 반사손실이 20 dB 이상 그리고 채널격리도는 수신단(RX)에서 103 dB 이상으로 다이플렉서의 요구 사항을 충족시켰다. 본 논문에서 개발한 위성용 X 대역 다이플렉서를 이용하면 아직 국내에서 개발되지 않은 저궤도위

성용 X 대역 고주파분배기에 적용함으로, 위성용 X 대역 RF 통신부품에 대한 국제 경쟁력을 확보하는 데 큰 도움이 될 것이라고 사료된다.

References

- [1] S. I. Ahn, D. C. Park, "Design and fabrication of S-band diplexer for LEO TT&C application," *Journal of Astronomy and Space Sciences*, vol. 24, no. 4, pp. 397-408, Dec. 2007.
- [2] A. G. Lamperez, M. S. Palma, "High selectivity X-band planar diplexer with symmetrical box-section filters," in *2005 European Microwave Conference*, Paris, Apr. 2005, pp. 4-7.
- [3] S. Lee, C. Y. Kim, "Design of an interdigital diplexer for RF front-end," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 6, pp. 487-494, Jun. 2020.
- [4] RF Design House, "RF 회로개념 잡기 - PART 7 Duplexer/Diplexer," 2000. Available: http://www.rfdh.com/bas_rf/begin/duplexer.php3
- [5] G. L. Matthaei, L. Young, and E. M. T. Jones, *Micro-wave Filters, Impedence-Matching Networks, and Coupling Structures*, Dedham, MA, Artech House, 1980.
- [6] CW, "Webinar-narrowband combline filter design with ANSYS HFSS," 2015. Available: <https://www.cambridgewireless.co.uk/events/49799-webinar-narrowband-comblin-e-filter-design-wi/>
- [7] R. J. Cameron, C. M. Kudsia, and R. R. Mansour, *Micro-wave Filters for Communication Systems: Fundamentals, Design and Applications*, 2nd ed. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2007.

임 정택 [충남대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-2698-6942>



2016년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)

2018년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)

2018년 3월~현재: 충남대학교 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] mm-Wave 회로 설계, 능동

위상 배열 시스템 등

이 현승 [원광대학교/초빙교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1016-9275>



2000년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)

2000년 2월: 원광대학교 전자공학과 (공학석사)

2014년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)

2017년 2월: 충남대학교 전자공학과 박사

후 과정

2017년 3월~2021년 2월: 충남대학교 전자공학과 시간강사

2018년 3월~현재: 원광대학교 초빙교수

[주 관심분야] 안테나, 필터, 레이더, 추적 알고리즘

이 상 록 [한국항공우주연구원/선임연구원, 충남대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-8126-1357>



2008년 2월: 충남대학교 전자전과정보통
신공학과 (공학사)
2010년 2월: 한국과학기술원 전자공학과
(공학석사)
2011년 9월~현재: 한국항공우주연구원
위성연구소 위성총조립시험센터 선임
연구원

2017년 9월~현재: 충남대학교 전자전과정보통신공학과 박사
과정

[주 관심분야] 수동 소자 및 Power AMP

이 선 익 [한국항공우주연구원/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-9910-6259>



1995년 2월: 연세대학교 천문대기과학과
(이학사)
1995년 12월~1996년 12월: 한국전자통신
연구원 관계기술연구소 위축연구원
1997년 2월: 연세대학교 천문우주과학과
(이학석사)
2001년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학
석사)

1997년 3월~2003년 7월: (주)하이게인안테나 전파통신연구소

2003년 9월~2003년 12월: 연세대학교 연구원

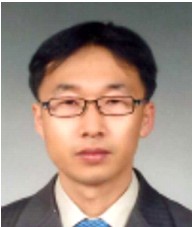
2003년 12월~현재: 항공우주연구원 위성기술연구단 위성전자
팀 책임연구원

2012년 3월~2016년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)

[주 관심분야] RF 통신시스템, TTC&R

임 원 규 [한국항공우주연구원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0827-7472>



2002년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학
사)
2004년 8월: 한국과학기술원 전자공학과
(공학석사)
2008년 8월: 한국과학기술원 전자공학과
(공학박사)
2009년 9월: 한국과학기술원 정보전자연
구소

2009년 10월~현재: 한국항공우주연구원 위성기술연구단 위성
전자팀 선임연구원

[주 관심분야] 인공위성 통신시스템 및 원격측정명령계

김 철 영 [충남대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-5532-7399>



2002년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학
사)
2004년 2월: 한국과학기술원 전자공학과
(공학석사)
2008년 2월: 한국과학기술원 전자공학과
(공학박사)
2011년 2월: University of California, San
Diego(UCSD) 전기 및 컴퓨터공학과 Post-Doctorate

2011년 3월~현재: 충남대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 근거리 레이다 및 위상배열 응용을 위한 MMIC
및 시스템 등