

간결하고 효과적인 X-band 위성 통신용 계단형 셉텀 편파기의 설계방법

Simple and Efficient Design Method of Stepped Septum Polarizer for X-band Satellite Communication

김지흥*, 이재욱*, 이택경*, 조춘식*

Jee-Heung Kim*, Jae-Wook Lee*, Taek-Kyung Lee* and Choon-Sik Cho*

요 약

본 논문에서는 기존의 방법과 비교하여 간결한 X-band 위성 통신용 셉텀 편파기의 설계방법을 제안한다. 제안된 방법은 기존의 셉텀 편파기 설계 방법들과 비교하여 설계과정에서 소요되는 시간적인 측면과 설계방법의 복잡성 측면에서 개선된 방법이다. 더욱이 도파관형 셉텀 편파기의 해석 및 설계를 위해 등가모델링 방법을 상용 EM 소프트웨어를 이용한 전파상수(β) 및 도파관 임피던스 계산과 전송선로 이론을 적용하였다. 마지막으로 시뮬레이션과 실제측정 결과를 통해, 위성 통신용 적합성을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a simple design method of stepped septum polarizer suitable for X-band satellite communication is proposed. This method is compared to two other conventional design methods in terms of time consumption and complexity of design procedure. In addition, an equivalent circuit modeling is used to analyze and design for the polarizer based on waveguide. For the validity of satisfying the satellite communication, electrical performances have been verified through the simulation and measurement results.

Key words : Stepped Septum Polarizer, Design Method of Polarizer

I. 서 론

최근 SAR(Synthetic Aperture Radar)위성과 같이 대용량 데이터의 송/수신 임무를 갖는 위성의 운용 및 개발이 증가함에 따라 넓은 범위에서 지상국과 위성 사이의 안정적인 통신환경을 구축할 수 있는 ISOFLUX 방사패턴[1] 안테나의 개발이 요구되고 있다. ISOFLUX 패턴 안테나라는 부채꼴 패턴 안테나라

고도 불리며, 등근 지구표면에 대해 넓은 영역에 걸쳐 일정한 이득특성을 가지며, 주로 중·대형급 위성에 탑재되어 사용되어 왔다.

ISOFLUX 방사패턴을 갖는 위성안테나의 경우, 넓은 지역에 걸쳐 안정적인 통신환경을 구축하기 위해서는 순도 높은(High Purity) 원형편파 축비(AR, Axial Ratio)가 필수적이다.

도파관형 셉텀 편파기는 도파관을 사용하기 때문

* 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부(School of Electronics, Telecommunications, and Computer Engineering, Korea Aerospace University)

· 제1저자 (First Author) : 김지흥 (Tel : +82-10-5018-0206, email : heung2love@kau.ac.kr)

· 교신저자 (Corresponding Author) : 이재욱 (Jea-Wook Lee)

· 투고일자 : 2012년 8월 23일

· 심사(수정)일자 : 2012년 8월 26일 (수정일자 : 2012년 12월 23일)

· 게재일자 : 2012년 12월 30일

에 고 전력을 저 손실로 전송할 수 있으며, 안테나의 급전구조와 편파기로서의 동시 역할을 수행할 수 있기 때문에, 경량/소형 특성을 요구하는 위성 통신 시스템에 적합하다.

슬로프(Slope)형 셉텀 편파기가[2]가 소개된 후, 좁은 대역폭 특성을 개선한 다양한 계단형 구조의 셉텀 편파기가 제안되어 왔다. 제안된 구조들은 횡방향 편파와 종방향 편파의 위상정합을 위한 구조물이 추가된 형태로서, 유전체 슬랩(Dielectric-Slab)[3]이나 물결 주름(Corrugation)[4]이 추가된 형태이다. 이후, 위상정합을 위한 구조 없이 최적화된 계단형 릿지 도파관이 제안되어 현재까지 널리 사용되고 있다.[5][6]

셉텀 편파기 설계방법에 대해 알아보면, 우선 공진주파수 f_0 를 기준으로 셉텀의 설계 변수를 정하는 방법이 있다.[3]

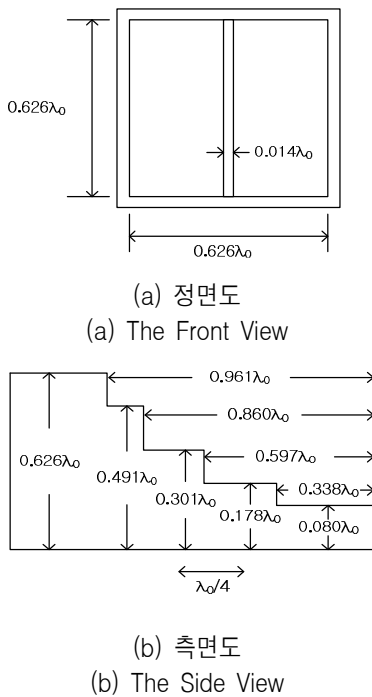


그림 1. 4단 셉텀 편파기의 설계 방법
Fig. 1. Design Method of the septum Polarizer with 4-stepped septum

그림 1과 같은 설계 방법을 이용하여, 셉텀 편파기를 설치한다. 위 방법을 적용하여 본 논문의 목표대역인 X-band에서 동작하는 편파기를 설계하면, 계단형 격벽의 두께가 1mm이하(0.014λ₀)가 되어, 실제 제작이 불가능하게 된다. 또한, 원형편파를 구성하는

두 편파의 위상정합을 위해 편파기 전방에 유전체 슬랩(Slab)을 설치하여, 크기가 증가하게 된다.

다음으로, 모드정합기술(Mode Matching Technique) 기반의 산란행렬과 임피던스 행렬 수식 그리고 컴퓨터 기반의 최적화 기술이 적용된 설계된 방법[5]이 있다. 편파기의 성능에 대한 조건을 설정한 후, 임피던스 행렬과 산란행렬을 이용하여 셉텀 편파기의 구조에 대한 설계 변수를 구한다.

$$F = \sum_{m=1}^M [RL - rl(f_m, l_i, s_i)] + u[IS - is(f_m, l_i, s_i)] + |90^\circ - dp(f_m, l_i, s_i)| \quad (1)$$

이후, 위 과정으로 얻어진 설계 변수는 식 1의 최적화 과정에 적용되어, 설정된 반사손실, 두 입력포트 사이의 격리도 그리고 축비특성에 대한 오류함수(Error Function)가 최소값을 갖도록 하는 값으로 최적화된 값으로 설정된다. 그러나 이 방법은 초기 설정으로 계산에 사용될 TE, TM모드를 설정해 주어야 하며, 설정 주파수 샘플에 따라 결과의 정확도 및 소요 시간이 변화하며, 장시간의 설계시간을 요구한다.

최근에는 상용 소프트웨어의 발달로 최적화 과정을 이용한 셉텀 편파기의 설계가 주로 이용되고 있다.[7][8][9][10]

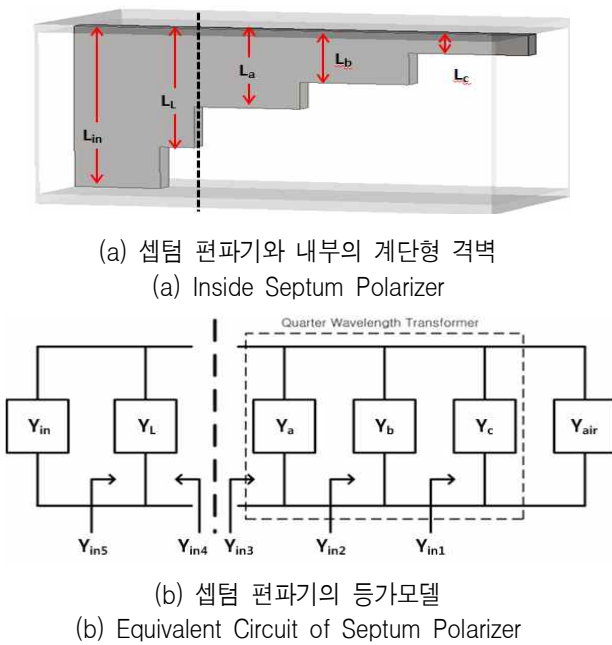
본 논문에서는 기존의 계단형 셉텀 편파기 설계방법들과 비교하여, 시간적 그리고 설계 과정의 복잡성 측면에서 개선된 간결하고 효과적인 설계방법을 제안하였다. 제안된 방법으로 설계된 셉텀 편파기는 시뮬레이션과 측정을 통해 결과를 검증하였다.

II. 셉텀 편파기의 설계 방법

본 논문에서 제안하는 설계 방법은 기존의 설계방법을 이용한 가정과 상용 EM 소프트웨어인 CST-MWS로 해석된 릿지 도파관의 임피던스와 전파상수의 데이터를 기반으로 한 하이브리드형 셉텀 편파기의 등가회로를 구성하여 설계를 진행하게 된다.[11] 설계할 셉텀 편파기는 기존의 모델[5]과 비교하기 위해 동일한 단수와 격벽두께를 갖도록 기본으

로 설정했다.

그림 2(a)은 기존의 방법으로 설계된 셉텀 편파기를 보여주고 있다. 그림 2(b)에서 YX는 어드미턴스를 의미하며, 예로서 Yin2는 2 지점에서 오른쪽을 들여다본 입력 어드미턴스를 의미한다. CST-MWS를 이용하여 정사각형 도파관 내부에 릿지를 설치하고 각 단의 높이를 적용하여 파동 임피던스와 전파상수에 대한 해석을 수행하면, 각 단의 릿지의 길이가 첫 번째 단(LL단)을 제외하고 해당 단의 구조에 대해 λ/4의 길이를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 해석된 릿지의 높이에 따른 임피던스 값을 이용하여 그림 2(b)와 3개의 λ/4 변환구조를 갖는 등가회로를 구성하고 첫 번째 단(YL)에서 본 어드미턴스(Yin5)를 계산하여 보면, 식 2과 같이 허수부를 갖는 것을 확인할 수 있다.



(a) 셉텀 편파기와 내부의 계단형 격벽
(a) Inside Septum Polarizer
(b) 셉텀 편파기의 등가모델
(b) Equivalent Circuit of Septum Polarizer
그림 2. 셉텀 편파기와 등가모델
Fig. 2. Septum Polarizer and Equivalent Circuit

이때, Yin2와 Yin3를 계산하면 실수 값을 갖는 어드미턴스 값을 얻게 된다. 따라서 본 논문에서는 ‘계단형 릿지의 첫 번째단(LL단)은 직사각형 입력과 계단형 릿지 구조물 사이의 정합구조로서 허수부를 제거해 주는 단’으로 설정했다.

$$Y_{in5} = Y_L \frac{Y_{in3} + jY_L \tan(\beta \ell)}{Y_{in3} + jY_L \tan(\beta \ell)} = 0.0018 + i0.001 \quad (2)$$

설계의 첫 단계로, 릿지의 높이에 따른 임피던스 및 전파상수의 관계를 그래프로 나타내면 그림 3의 그래프와 같다.

다음은 La, Lb단의 높이에 대한 임피던스 값 설정에 대한 범위를 CST-MWS를 이용하여 계단형 릿지의 각 단을 변화시켜가며 알아보았다.

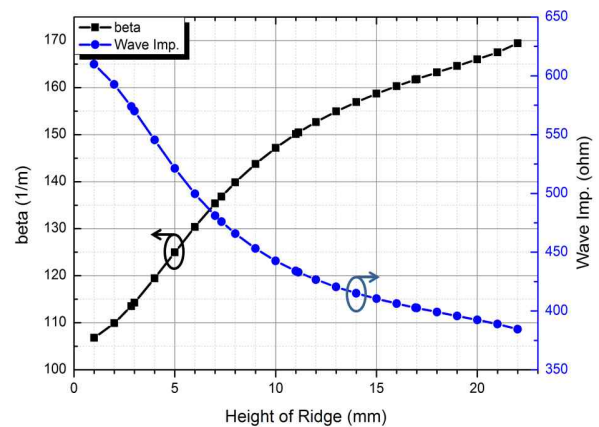


그림 3. 릿지 높이에 따른 전파상수(β) 및 임피던스 변화

Fig. 3. Variation of the Propagation Constant and Impedance according to the Height of the Ridge

λ/4 변환구조의 첫 번째단(La)의 임피던스의 범위는, 매칭을 위해 설정된 첫 번째단(LL)의 임피던스가 400Ω이고, 3개의 단이 존재해야 하며 그림 2(a)의 가장 낮은 단(Lc)의 임피던스가 약 574Ω인 것을 감안하여 410Ω~500Ω까지로 설정하였다. 그리고 다음 λ/4 변환구조인 Lb단의 임피던스는 이후에 마지막 단(Lc)의 존재를 고려하여 정사각형 도파관의 임피던스인 620Ω보다 작은 값을 갖도록 설정하고 이전 단(La)의 임피던스보다 10Ω 단위로 큰 값을 갖도록 조절하며 시뮬레이션을 수행했다. 마지막 단(Lc)은 이전의 두 단(La, Lb)의 값에 의해 결정되게 된다.

이상으로 본 논문에서 제안한 방법은 초기설계 단계로서, 추후 시뮬레이터를 이용한 최적화 튜닝을 거칠 것을 고려하여, 초기설계품의 성능 목표치는 반사 손실 -20dB 이하, 축비특성 3dB 이하 그리고 두 입력

포트 사이의 격리도 -15dB 이하로 설정하였다. 이상의 과정을 통해 첫 번째단(La)의 초기 값 임피던스는 430Ω~450Ω사이의 값을 가져야하며, 다음단인 Lb단의 임피던스 값은 설정된 La단에서 30Ω의 범위 내에서 마지막 단(Lc)의 임피던스가 620Ω 이하의 값을 갖도록 결정되어야 설정한 성능평가 수치를 만족시킴을 확인하였다.

계단형 릿지의 설계변수인 릿지의 높이과 길이계산은 계산속도와 편의를 위해 식 3, 4을 이용하여 그림 3과 같이 Excel 프로그램의 계산시트로 작성하였다.

$$Y_{IN} = Y_o \frac{Y_L + jY_o \tan(\beta \ell)}{Y_o + jY_L \tan(\beta \ell)} \quad (3)$$

$$\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta} \quad (\beta \text{는 전파상수}) \quad (4)$$

그림 3를 이용하여 제안된 설계 방법으로 설정한 La단과 Lb단의 파동 임피던스 값과 릿지의 높이, 전파상수(β)를 Excel 계산시트에서 적색으로 표시된 Za, Zb란에 입력한다.

Model No.	Yair	Yin, Yin5	Za	Ya	Yin4, Yin3
	0.002653	0.001382	430	0.002326	0.003912
		릿지 높이	11.5 mm		
		전파상수(β)	151.5		
		릿지 길이	10.36829 mm		
	Zb	Yb	Yin2, Yin1	Yc	Zc
	480	0.002083	0.001109	0.001715	582.946
	7 mm	릿지 높이		릿지 높이	2.5 mm
	136	전파상수(β)		전파상수(β)	112
	11.54997 mm	릿지 길이		릿지 길이	14.02497 mm

그림 4. 엑셀을 이용한 설계변수 계산
Fig. 4. Design Parameter Calculation using Excel

계산시트는 입력된 값들을 이용해, 각 단의 길이와 그림 2(b)의 등가회로를 기준으로 좌측에서 우측으로 본 어드미턴스를 계산하여 마지막 단(Lc)의 임피던스 값을 계산해준다. 출력된 임피던스 값을 그림 3에 적용하여 해당 단의 길이와 높이를 찾아주게 되면, 초기설계과정이 마무리 되게 된다.

Excel을 이용한 계산과정은 두 단의 임피던스 값과 전파상수(β)를 입력한 즉시 약 1초 이내의 시간

에 마지막 단의 임피던스 값의 결과를 확인할 수 있다.

III. 시뮬레이션 및 측정

그림 5는 제안된 초기설계과정을 통해 제작된 편파기로서, 안테나와의 결합을 위해 전방에 플랜지(Flange)를 결합했으며, 그림 3의 설계변수를 이용하여 딥 브레이징(Dip Brazing) 공법을 통해 정밀 제작하였다. 제작된 편파기는 참고문헌[5]의 설계수치로 제작된 편파기와 성능을 비교하였다.



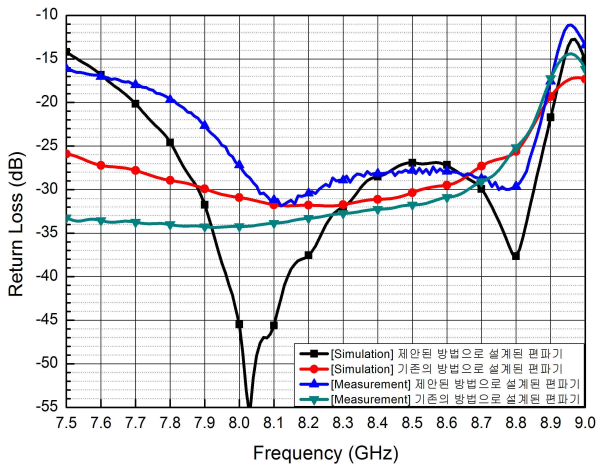
그림 5. 제작된 셉텀 편파기
Fig. 5. Manufactured Septum Polarizer

그림 6은 그 결과로서, 흑색과 청색 실선은 각각 본 논문에서 제안하는 방법을 통해 설계된 편파기의 측정과 시뮬레이션 결과이고 적색과 녹색 실선은 각각 참고문헌[5]의 설계수치를 이용해 설계된 편파기의 시뮬레이션과 측정 결과를 나타내며, 목표 주파수 대역은 8.0~8.5GHz이다.

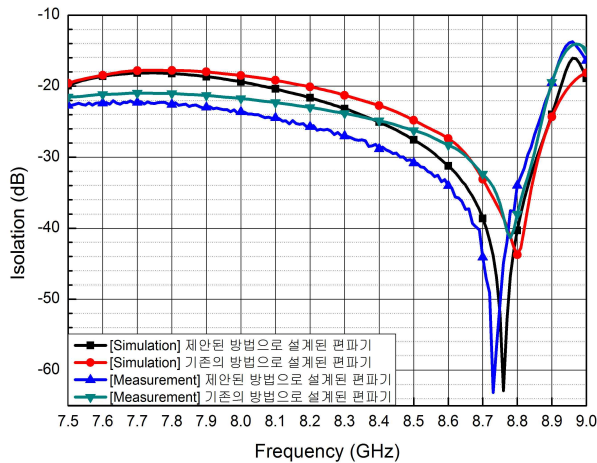
그림 6(a)의 반사손실 특성의 경우, 제안된 방법으로 설계된 모델의 시뮬레이션과 측정 결과는 차이를 갖지만, 동일 공진점과 경향을 통해 유사한 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 그리고 기존 방법으로 설계된 모델의 측정결과와 비교하여 대역 내에서 약 5dB의 차이를 갖지만, 전반적으로 -25dB이하의 낮은 특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

그림 6(b)의 격리도 특성은 두 모델 모두 시뮬레이션과 측정 결과와 유사한 특성을 가지며, 대역내에서 제안된 방법으로 설계된 모델의 측정 결과가 기존 방법으로 설계된 측정결과와 비교하여 약 2-3dB 낮은

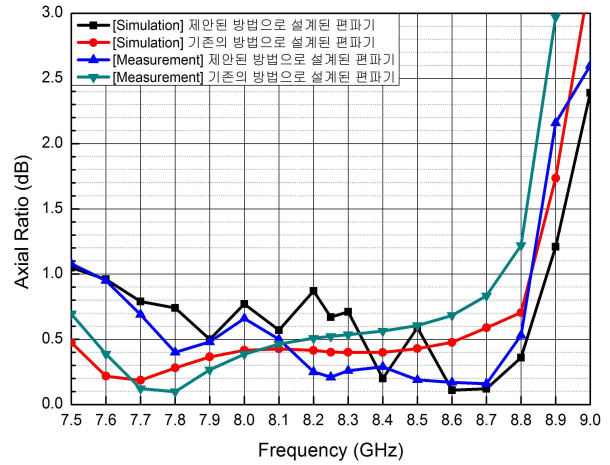
값을 갖는 것을 확인할 수 있다.



(a) 반사손실 특성
(a) Return Loss



(b) 입력포트 사이의 격리도 특성
(b) Isolation between Two Input Ports



(c) 축비 특성
(c) Axial Ratio

그림 6. 측정 및 시뮬레이션 결과 비교
Fig. 6. Comparison of Measurement and Simulation Results

그림 6(c)의 축비특성의 경우, 두 모델의 시뮬레이션과 측정결과 모두 전반적으로 유사한 경향을 가지며, 측정결과는 대역 내에서 0.7dB이하의 낮은 축비특성을 갖는 것을 확인할 수 있다.

(시뮬레이션 환경 : Intel Core2 Quad Q9550 2.83 GHz/2.83GHz CPU, 4G RAM, Windows 7 64bit)

IV. 결 론

본 논문에서는 간결하고 효과적인 셉텀 편파기 설계방법을 제안하였다. 기존의 방법과 비교하여 모드정합 기술(Mode-Matching Technique)기반의 수식 계산 및 시뮬레이션 조건 설정 과정을 생략하여 설계의 복잡성을 완화할 수 있었으며, 컴퓨터를 이용한 최적화 과정 전에 요구규격에 근접한 성능을 만족시키는 초기설계를 진행함으로써 설계에 요구되는 시간소모를 감소시킬 수 있었다. 제안된 방법으로 초기 설계된 편파기는 시뮬레이션과 실제 제작품의 측정을 통해, 기존방법으로 설계/제작된 편파기와 전기적 성능을 비교하여 유사한 성능을 갖는 것을 확인하였다. 제안된 방법이 컴퓨터기반 최적화 과정 전의 초기설계 단계임을 감안한다면, 추가적인 성능향상을 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab) 으로부터 지원받아 수행되었습니다 (2012-02-004).

Reference

- [1] Kyung-Jin Jeon, Kyo-il Lee, Jae-gi Son, Taek-Kyung Lee, J.W. Lee and Woo-Kyung Lee, "X-band isoflux pattern antenna for SAR data transmission," *AP SAR 2011, Seoul, South Korea*, pp. 1-4, Sep, 2011.
- [2] D. Davis, O.J. Digiandomenico and J.A. Kempic, "A New Type of Circularly Polarized Antenna Element," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. A247, pp. 26-33, Oct. 1967.
- [3] Ming Hui Chen and G.N. Tsandoulas, "A Wide-band Square-Waveguide Array Polarizer," *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. AP-21, pp. 389-391, May. 1973.
- [4] R. Ihmels, U. Papziner, and F. Arndy, "Field Theory Design of a corrugated septum OMT," *IEEE MTT-S Digest*, ISBN No: CH3277-1/93/0000-090
- [5] J. Bornemann and V. A. Labay, "Ridged waveguide polarizer with finite and stepped-thickness septum," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 43, pp. 1782-1787, Aug. 1995.
- [6] Jeeheung Kim, Seongsik Yoon, Eunyoung Jung, J. W. Lee, T. K. Lee, and W. K. Lee, "Triangular-shaped Stepped Septum Polarizer for Satellite Communication," *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Spokane, USA*, pp. 854-857, July, 2011.
- [7] Zhong, W., B. Li, Q. Fan, and Z. Shen, "X-band Compact Septum Polarizer Design," *ICMTCE*, pp. 167-170, May 22-25, 2011.
- [8] M. J. Franco, "A High-Performance Dual-mode Feed Horn for Parabolic Reflectors with a Stepped-Septum Polarizer in a Circular Waveguide," *IEEE Antennas*

and Propagation Magazine, vol. 53, no. 3, pp. 142-146, 2011.

- [9] Hasan, S. A., "Design & measurement techniques for innovative, high performance, circularly polarized, ultra wideband corrugated horn antenna with septum polarizer for space applications," *ICMTCE*, pp. 323-326, May 22-25, 2011.
- [10] Diez, H., "Compact Ka-band Telemetry Antenna for satellite applications," *ANTEM*, pp. 1-5, June 25-28, 2012.
- [11] CST MICROWAVE STUDIO 2010, Computer Simulation Technology.

김 지 흥 (金 知 興)



2009년 8월 : 한국항공대학교 항공 전자 및 전자공학과 (공학사)
 2012년 2월 : 한국항공대학교 항공 전자공학과 (공학석사)
 2012년 3월~9월 : 한국항공대학교 부설 항공전자연구소 연구원
 2012년 10월~현재 : 국방과학연구소 연구원

관심분야 : 마이크로파 및 밀리미터파 수동소자 설계 및 해석, 위성통신 안테나, 전자전(EW)



이 재 욱 (李 宰 旭)

1992년 2월 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)
 1994년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 1998년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1998년 3월 ~ 2004년 2월 : 한국전자

통신연구원 디지털방송연구단 전파기반연구그룹

2004년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공전자 및 정보 통신공학부, 전자 및 항공전자 전공 부교수

관심분야 : 마이크로파 및 밀리미터파 능,수동소자 해석 및 설계, EMI/EMC대책기술, 고출력 증폭기 및 고출력 안테나 설계, 위성통신 안테나, 전자장 수치해석

이택경 (李澤璟)



1983년 2월 : 고려대학교 전자공학과 (공학사)

1985년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1990년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1990년 5월 ~ 1991년 4월 : Univ. of Texas at Austin, Post-Doctoral Fellow

1991년 9월 ~ 1992년 2월 : 한국과학기술원 정보전자 연구소 연구원

2001년 7월 ~ 2002년 7월 : Univ. of Illinois, Urbana Champaign, Associate Visiting Research Professor

1992년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 전자정보통신 컴퓨터 공학부 교수

관심분야 : 마이크로파, 안테나, 전자파 해석, 레이더

조춘식 (曹春植)



1987년 2월 : 서울대학교 제어계측 공학과 (공학사)

1995년 12월 : 미국 South Carolina 대학교 전기 및 컴퓨터공학과 (공학석사)

1998년 12월 : 미국 Colorado 대학교 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)

2004년 3월 ~ 현재 : 한국항공대학교 항공전자 및 정보 통신 공학부 교수

관심분야 : RFIC/MMIC, 전력증폭기, 믹서, 발진기, 안테나, 전자장 수치해석