

고해상도 영상 데이터를 전송하는 저궤도 위성의 데이터링크 송수신 안테나 동향 조사

Investigation of Transmission and Reception Antenna Trends of Low-Earth Orbit Satellites Transmitting High-Resolution Image Data

강은정 · 윤상운 · 임창현 · 양준모* · 김정훈*** · 신욱현*** · 박영주*** · 박용배*,** · 추호성

Eunjung Kang · Sangwoon Youn · Changhyeon Im · Junmo Yang* · JungHoon Kim*** ·
WookHyeon Shin*** · YoungJu Park*** · Yong Bae Park*** · Hosung Choo

요 약

본 논문에서는 고해상도의 고용량 영상 데이터를 전송하는 위성, 지상국 및 안테나의 제원 조사를 수행하여 최신 기술 동향을 파악한다. 다양한 데이터 송수신 위성 및 지상국 안테나를 조사하고, 우리나라 다목적실용위성 5호에 적용하는 상황을 가정하여 전파전송 시나리오를 도출한다. 다목적실용위성 5호에서 데이터를 송신하고, 싱가포르 지상국에서 파라볼라 타입 안테나를 사용하여 수신할 때, 지상국에서 데이터 수신 가능 여부를 확인하기 위한 데이터링크 버짓을 계산한다. 데이터 전송거리가 550 km에서 최대 2,200 km까지 증가할 때, 위성 데이터 송신 안테나가 helix 형태인 경우, 최소 및 최대 수신전력은 -68.1 dBm, -55.9 dBm이다. 또한, 데이터 송신 안테나가 patch array인 경우, 최소 및 최대 수신전력은 각각 -84.1 dBm, -71.9 dBm임을 확인하였다.

Abstract

In this study, we investigate the latest trends in satellites, ground stations, and antennas that transmit high-capacity image data at a high-resolution. Various data transmission/reception satellites and ground station antennas are investigated, and radio-wave transmission scenarios applicable to the Korean Multi-purpose Satellite 5 (KOMPSAT-5) are determined. The datalink budget is then calculated as the signals are transmitted by the KOMPSAT-5 and received by a Singapore ground station using a parabolic-type antenna. When the data transmission distance is increased from 550 km to a maximum of 2,200 km, the minimum and maximum received powers using a helix transmit antenna are -68.1 dBm and -55.9 dBm, respectively. By contrast, when the satellite transmit antenna is a patch array, the minimum and maximum received powers are -84.1 dBm and -71.9 dBm, respectively.

Key words: LEO Satellite, Ground Station, Datalink Budget, X-Band Downlink, Satellite Antennas

「본 연구는 국방과학연구소(위탁연구: 위성SAR 데이터링크 시스템의 최신 항재밍 구축 환경 분석 연구)의 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.」

홍익대학교 전자전기공학과(School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University)

*아주대학교 AI 융합네트워크학과(Department of AI Convergence Network, Ajou University)

**아주대학교 전자공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University)

***국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received April 11, 2022 ; Revised April 24, 2022 ; Accepted June 3, 2022. (ID No. 20220411-037)

· Corresponding Author: Hosung Choo (e-mail: hschoo@hongik.ac.kr)

I. 서 론

저궤도 위성은 고도가 160~2,000 km인 궤도에서 운용되며, 지형 및 지물 촬영을 통해 영상 데이터를 획득하여 재난, 재해, 국방 등의 다양한 분야에서 모니터링을 위한 지구관측 수단으로 사용되어 왔다^[1]. 기존의 저궤도 위성은 광학 기반의 관측 기기를 사용하여 영상 데이터를 획득했으나, 낮 시간대에만 촬영이 가능하며, 고해상도 촬영은 좁은 영역에 대해서만 가능하다는 단점이 있었다. 이러한 촬영 조건의 단점을 극복하기 위해, SAR(synthetic aperture radar)를 탑재하여 전천후 촬영이 가능하고, 넓은 관측 영역에 대해 고해상도 촬영이 가능한 저궤도 위성 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다^{[2],[3]}. SAR를 탑재한 저궤도 위성을 통해 획득된 고용량 데이터는 위성국과 지상국 간의 데이터링크를 통해 송수신되며, 국제전기통신 연합 (ITU: International Telecommunication Union)에서 권고하는 주파수 대역인 X-대역을 사용하여 데이터를 송수신한다^[4]. 고용량 데이터를 효율적으로 송수신하기 위해서는 데이터링크에 적합한 위성의 데이터 송신 안테나와 지상국의 데이터 수신 안테나에 대한 연구가 필요하며, 연구를 수행하기 이전에 최근 운용되고 있는 세계 각국의 위성 및 지상국 안테나의 동향 조사가 선행되어야 한다. 관련된 선행 연구로는 저궤도 위성 조사 및 데이터 송신용 안테나 설계 연구 등이 있으나, 이러한 연구들은 특정 위성 또는 안테나 설계에 관련된 연구가 대부분이므로 기술 동향을 파악하기에는 부족하다. 또한, 운용 지상국 조사 및 지상국 안테나 설계에 관한 연구는 개별적으로 활발히 진행 중이지만, 실제 운용되는 지상국과 안테나들에 대한 정보를 함께 정리한 연구는 없는 실정이다.

본 논문에서는 고해상도의 고용량 영상 데이터를 전송하기 위한 위성, 지상국 및 안테나 제원 조사를 수행하여 최신 기술 동향을 파악한다. 현재 운용 중인 저궤도 위성을 조사하고, 고용량 데이터 송신을 위한 안테나들의 종류와 상세 정보에 대해 함께 정리하여 위성과 안테나에 대한 최신 기술을 파악하기 쉽게 정리하였다. 또한, 데이터를 수신하기 위한 주요 지상국 조사를 통해 지상국에서 운용 중인 안테나들의 성능을 표로 나타내어 설계 동

향을 확인하였다. 이를 바탕으로 SAR 위성 안테나 성능과 데이터 수신을 위한 지상국 안테나 성능을 고려한 특정 시나리오에 대해 데이터링크 버짓을 계산하였다. 우리나라의 다목적실용위성 5호에 다양한 타입의 데이터 송신 안테나를 적용하는 상황을 가정하고, 싱가포르 지상국에서 데이터를 수신하는 경우에 대해 데이터링크 버짓을 계산하였으며, 결과를 통해 데이터 송수신 가능 여부를 확인하였다.

II. 저궤도 위성 데이터 송신

2-1 저궤도 위성

저궤도 위성은 시간 경과에 따른 지구의 환경 변화를 영상으로 관측하기 위한 핵심 수단으로 해빙, 삼림, 가뭄, 홍수와 같은 대규모 현상에 대한 환경 모니터링 임무를 수행한다. 최근에는 보다 정밀한 환경 모니터링을 위해 SAR를 탑재한 저궤도 위성에 대한 연구와 상용화에 대한 관심이 높아지고 있는 추세이다.

SAR는 전자기파 펄스를 사용하여 목표지역에 빔을 형성했을 때, 반사파가 안테나로 돌아오는 시간을 측정하여 2차원 영상을 생성하는 원리로 동작하는 레이더 시스템 중 하나이며, 고해상도 영상 데이터를 획득하기 위해 저궤도 위성에 탑재되고 있다. 일반적으로 레이더의 해상도는 안테나의 크기에 비례하는데, SAR를 사용하면 전자기파 펄스를 수신하면서 이동한 거리만큼 안테나의 직경이 커지는 효과가 있어, 작은 안테나를 적용하더라도 고해상도 영상 데이터를 획득할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 전자기파 펄스를 이용하기 때문에 태양의 빛이나 지구의 대기 환경과 관계없이 전천후 촬영이 가능하며, 획득된 고용량 데이터는 데이터링크를 통해 지상국으로 송신된다^[5].

현재 운용 중인 세계 각국의 저궤도 위성의 고도, SAR 성능, 데이터 송신 속도 등에 대한 동향 조사를 진행하고, 데이터를 송신하기 위한 안테나 종류와 성능에 대해 확인하여 데이터링크에 적합한 데이터 송신용 안테나 설계에 고려하고자 한다.

그림 1은 한국의 항공기, 인공위성, 우주발사체의 종합 시스템 및 핵심기술 연구개발 기관인 KARI(Korea Aero-

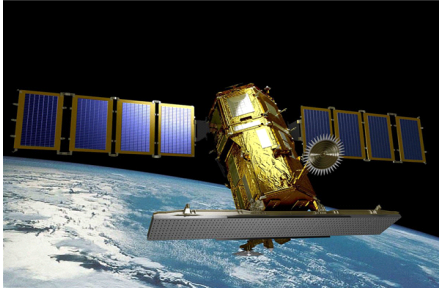


그림 1. 다목적실용위성 5호 사진
Fig. 1. Photograph of the KOMPSAT-5.

Space Research Institute)에서 개발 및 운용 중인 다목적실용위성 5호를 보여준다^[6]. 주요 임무 목표는 지리 정보 제공, 환경 재해 모니터링이다. 다목적실용위성 2호를 참고하여 설계되었으며, 2013년 8월 22일 러시아의 Dombrovsky 발사장에서 Dnepr-1 발사체로 발사되었다. 평균 고도는 550 km이며, 약 96분을 주기로 지구 주위를 공전하면서 전 세계적으로 영상 데이터를 획득하고, 공공 및 상업적 사용을 위해 KARI 및 스발바르 지상국으로 데이터를 송신한다. 광학, 열 및 X-대역 SAR를 이용해 해상도가 1 m 인 고해상도 이미지를 생성한다. 현재 고해상도 이미지 획득, 대규모 재난 감시 및 대책 수립 임무는 2022년 안에 다목적실용위성 6호로 보강될 예정이다^[7].

그림 2는 중국의 CAST(Chinese Academy of Space Technology)에서 개발한 최초 민간 C-대역 편광 SAR 위성인 Gaofen-3 사진을 보여준다^[8]. 주요 임무 목표는 육지 및 해양 모니터링, 재난, 수자원 및 기상에 대한 고해상도 영상 정보 제공이다. 중국의 고해상도 지구관측 시스템인 CHEOS의 구성 요소 중 하나로, 2016년 8월 9일 중국의

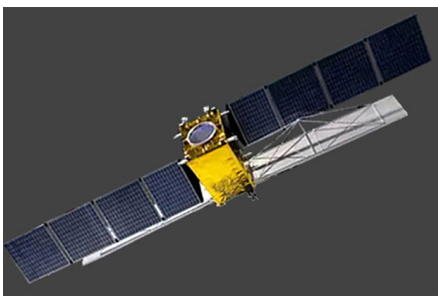


그림 2. Gaofen-3호 사진
Fig. 2. Photograph of the Gaofen-3.

타이완 위성발사센터에서 Long March-4C 발사체로 발사되었으며, 질량은 약 2,950 kg이고, 설계 수명은 8년이다. Gaofen-3은 약 758 km의 궤도에서 운용되며, SAR 안테나로 스포트라이트, 스트립맵 및 스캔을 포함하는 12개의 이미징 모드를 제공한다^[9].

그림 3은 일본의 저궤도 위성인 IGS Radar 5가 탑재된 발사체인 H2A202 사진을 보여준다^[10]. IGS Radar 5는 해상도를 우선으로 설계하여, 타 관측 위성에 비해 높은 0.5 m의 해상도를 갖지만, 관측 범위가 좁다는 단점이 있다. 2017년 3월 17일에 해당 발사체로 발사되었다^{[11][12]}.

그림 4는 남아프리카공화국에서 운용 중인 Kondor-E 위성 사진을 보여준다^[13]. 해당 위성은 러시아의 원격 탐지 및 우주 탐사 분야 개발기업인 NPO Mashinostroyeniya에서 개발되었으며, 고해상도 SAR 이미지를 전 세계의 다양한 분야에 상업적으로 제공한다. 2013년 6월 27일 카자흐스탄 Baikonur Cosmodrome 발사장에서 Strela 발사체로 발사되었으며, 평균 고도 500 km의 궤도에서 약 92분의 주기로 공전하고 있다. 위성의 총 질량은 1,150 kg이



그림 3. IGS Radar 5호를 탑재한 H2A202 발사체 사진
Fig. 3. Photograph of H2A202 rocket with the IGS radar 5.

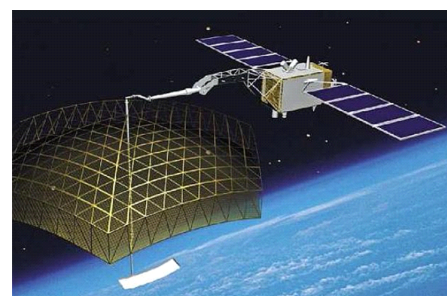


그림 4. Kondor-E 사진
Fig. 4. Photograph of the Kondor-E.

고, 설계 수명은 5년이지만 목표 동작 기간은 7년이다. Kondor-E는 3.13 GHz에서 동작하는 SAR 장비를 사용하며, 스포트라이트 모드에서 1 m~2 m의 해상도를 가지며, 스트리프맵 모드에서 1 m~3 m의 해상도 이미지를 제공할 수 있다. X-대역 데이터링크를 통해 최대 960 Mbps로 데이터를 전송한다^{[14],[15]}.

그림 5는 미국의 Capella Space에서 전 세계에 고해상도 SAR 이미지 서비스를 제공하기 위해 개발 중인 Capella X-SAR 마이크로위성을 보여준다^[16]. 주요 임무는 고해상도 영상을 전 세계로 공유하는 것이며, 세부적으로는 미국의 육군우주미사일방어기술센터와 협력하여 지구관측 영상 데이터의 신속한 전달을 목표로한다. Capella 위성군은 36개의 마이크로위성으로 구성되어 있고, 각각은 약 500 km의 고도에서 운용되고 있다. 클라우드 기반의 Capella Console을 통해 촬영 현황 파악이 가능하며, 실시간으로 신규 촬영 요청 및 촬영된 영상을 다운받을 수 있다. 각 Capella 위성의 설계 수명은 3년이며, 스트리프맵 및 스포트라이트 이미징 모드에서 단일 편파 X-대역 시스템을 사용한다. 각 국가별 주요 저궤도 위성에 대해 자세한 정보는 표 1에 나타냈다^[17].

2-2 저궤도 위성 데이터 송신 안테나 동향

앞서 조사한 저궤도 위성에서 고해상도 영상 데이터를 전송할 때 사용되는 안테나는 지구 방향의 수직으로 위치한 경우, 지상국 방향 접속 각도는 65°, 지구국 접속 각도 5°를 고려하여 $\pm 60^\circ$ 에서 높은 이득을 가질 수 있도록



그림 5. Capella X-SAR 사진

Fig. 5. Photograph of the Capella X-SAR.

설계되어 왔다. 이러한 데이터 송신 안테나로는 일반적으로 corrugated horn 안테나를 사용하며, 원형 모양의 horn 안테나 방사체에 corrugated 형상을 적용하여 설계된다. Corrugated 형상에 의해 낮은 cross polarization 특성을 얻을 수 있으며, 부엽레벨, 넓은 빔폭, 높은 개구효율 및 우수한 축비 특성을 가지고 있다. 선행 연구 조사를 통해 고해상도 영상 데이터를 전송하는 주파수 대역인 X-대역에서 약 87 mm~132 mm 정도의 크기로 설계되며, 15 dBic~18 dBic 정도의 이득 특성을 가지는 것을 확인되었다^{[18]~[20]}. 이 안테나 타입은 우리나라 다목적실용위성 2호에 적용된 사례가 있다.

두 번째로는 patch 안테나가 있으며, 낮은 비용으로 설계가 가능하다는 장점이 있으나, 견딜 수 있는 전력 2 W~4 W 정도로 낮다는 단점이 있다. 단일 안테나로 사용되기도 하지만, 단일 소자를 배열하여 높은 이득 특성을 도출하여 적용되기도 한다^{[21]~[23]}. X-대역에서 동작하

표 1. 국가별 저궤도 위성 정보

Table 1. Information of low-earth orbit (LEO) satellites by countries.

	Korea	China	Japan	Republic of South Africa	USA
Name	KOMPSAT-5	Gaofen-3	IGS Radar 5	Kondor-E	Capella X-SAR
Altitude (km)	550	758	490	500	485~525
Inclination angle (°)	97.6	98.41	97.23	74.75	90
Data rate (Mbps)	310	1,280	-	960	1,200
Life time (years)	7	8	5	7	3
Weight (kg)	1,400	2,950	-	1,150	140
SAR (GHz)	9.66	5.4	-	3.13	9.4~9.9
Polarization	Quad	Quad	-	Dual	Single
SAR resolution (m)	1	1	0.5	1	0.3

고, 80 mm×80 mm~400 mm×400 mm 정도의 크기를 가지며, 약 15 dBic~30 dBic의 이득 특성을 가지는 것으로 확인되었다.

세 번째로는 choke-ring 안테나가 있으며, horn 안테나의 방사체 가장자리를 따라 ring 형태의 동심원 구조를 여러 겹으로 추가한 형상으로 설계된다. 이 안테나 타입은 isoflux 방사패턴을 구현하여 60°이상의 넓은 빔폭을 가지는 것이 특징이다. 방사체의 크기는 약 240 mm~320 mm 정도의 크기를 가지며, 약 6 dBic~8 dBic의 이득 특성을 가진다. 해당 안테나 타입은 우리나라 다목적실용위성 5호에 적용되어 운용되고 있다^{[24]~[26]}.

마지막 안테나 타입은 helix 안테나이며, 원통 유전체에 helix 방사체가 인쇄된 형상을 가진다. X-대역에서 동작하는 helix 안테나는 약 5 dBic~9 dBic의 이득 특성을 가지며, 지름이 90 mm 이하로 다른 입체 형상의 안테나에 비해 상대적으로 지름이 작고, 질량이 가볍다는 장점이 있다^{[27],[28]}. 각 안테나 타입별로 면적, 편파, 동작 주파수, 사용 가능 전력, 이득 등과 관련된 성능을 표 2에 나타냈다.

III. 지상국 데이터 수신

3-1 주요 지상국

저궤도 위성은 약 7.8 km/s의 속도로 공전하고 있으며,

지상국의 상공을 지나는 시간은 위성의 궤도 및 고도에 따라 최소 5분에서 최대 20분 정도이다. 지상국에서 저궤도 위성과의 데이터를 송수신할 수 있는 시간을 최대한 활용하기 위해 저궤도 위성이 지평선에서 관측되는 순간부터 추적하면서 데이터를 수신하며, 데이터를 수신할 수 있는 횟수는 하루에 3번 정도이다^[29]. 한 곳의 지상국에서 데이터 송수신을 위한 통신 횟수가 부족한 경우, 세계 각국에 위치한 여러 지상국과 계약을 통해 사용료를 지불하고, 더욱 짧은 주기로 데이터를 수신할 수 있다.

저궤도 위성이 데이터를 송신하는 경우, 지상국 데이터 수신 환경을 분석 및 예측하기 위해 현재 운용 중인 세계 각국의 지상국에 대해 조사하고, 지상국에서 실제 사용하고 있는 수신 안테나의 크기, 수신 주파수 대역, 유효 복사 전력과 같은 성능을 확인하여 수신 안테나 동향에 대해 알아보하고자 한다.

그림 6은 노르웨이가 운용 중인 북극 스발바르 제도에 위치한 스발바르 지상국에 대한 사진을 보여준다^[30]. 노르웨이 본토에 위치한 트롬쇠 위성국과 연결되어 있는 지상국 중 하나이며, 현재 SG1, SG2, SG3 총 3개의 지상국 안테나를 운용하고 있다. 이 지상국에서는 2020년 1월을 기준으로 NASA(National Aeronautics and Space Administration)와 ESA(European Space Agency) 등 다양한 기관에서 운용 중인 서로 다른 130개의 위성에서 데이터를 수

표 2. 저궤도 위성 데이터링크용 X-대역 안테나

Table 2. Transmission antennas for LEO satellite datalink.

Antenna type	Reference	Dimension	Polarization	Operating frequency (GHz)	Gain (dBic)
Corrugated horn	[18]	87.9 mm	LHCP & RHCP	7.7~8.5	15.9
	[19]	-	LHCP & RHCP	7.9~8.5	16.8
	[20]	132.1 mm	LHCP & RHCP	8.0~8.4	17.3
Patch array	[21]	82 mm×98 mm	RHCP	8.0~8.4	16
	[22]	110 mm×110 mm	RHCP	7.2~9	17
	[23]	400 mm×400 mm	LHCP & RHCP	7.9~8.4	26
Choke-ring horn	[24]	242.6 mm	LHCP & RHCP	8.025~8.4	7.7
	[25]	320 mm	LHCP & RHCP	8.025~8.4	6
	[26]	270 mm	LHCP & RHCP	8.025~8.4	6.08
Helix	[27]	90 mm	LHCP & RHCP	7.8, 8.0~8.4	5.8
	[28]	12.3 mm	RHCP	8.0~8.45	8.7

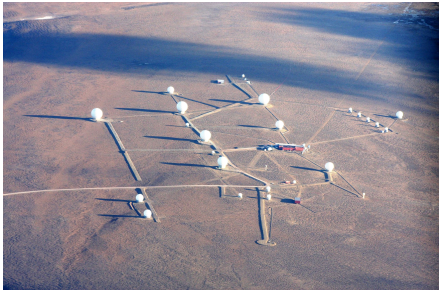


그림 6. 스발바르 지상국 사진
Fig. 6. Photograph of the Svalbard ground station.

신하고, 수신된 데이터는 매월 4만 번 트롬쇠 위성국으로 송신된다. 북극에 위치한 스발바르 지상국은 트롬쇠 위성국을 통해 남극 쿤 모드 랜드의 트롬에 위치한 트롬 지상국과 연결되어 있어 데이터 공유가 가능하며, 저궤도 위성의 매 회전 주기마다 두 번 위성에 접근할 수 있는 현재 유일한 지상국에 해당한다.

미국이 운용 중인 남극 맥머도 기지 내에 위치한 맥머도 지상국 사진을 그림 7에서 보여준다^[31]. 현재 S-/X-대역에서 동작하는 MG1 안테나를 운용하고 있으며, 설립 당시 X-대역 SAR 이미지 데이터를 수집하기 위해 설립되어 ESA에서 운용하는 위성인 ERS-1, ERS-2로부터 매일 약 25회, 105 Mbps로 SAR 데이터를 수신하였다. 현재는 S-대역 안테나 성능이 추가되어 지상에서 위성으로 데이터를 송신하는 역할도 수행 중이다. 맥머도 지상국은 극지 지상국이 수집할 수 있는 고용량 데이터를 300 Mbps로 송신할 수 있는 지상국 중 하나이다.

그림 8은 미국이 운용 중인 알래스카 페어뱅크스에 위



그림 7. 맥머도 지상국 사진
Fig. 7. Photograph of the McMurdo ground station.



그림 8. 알래스카 지상국 사진
Fig. 8. Photograph of the Alaska ground station.

치한 알래스카 지상국 사진이다^[32]. 현재 AS1, AS2, AS3 총 3개의 지상국 안테나를 운용하고 있으며, NASA의 Sentinel-1, ESA의 ERS-1, ERS-2, JAXA(Japan Aerospace eXploration Agency)의 JERS-1, ALOS, RADARSAT-1 등의 위성으로부터 SAR 영상 데이터를 수신하여 처리, 보관 및 배포를 담당하고 있다.

3-2 지상국 데이터 수신 안테나 동향

지상국 안테나는 흔히 접시형 안테나라고 불리는 파라볼라 안테나가 사용되고 있다. 파라볼라 안테나의 경우, 하나의 반사경을 사용하여 설계된 기본 파라볼라 안테나와 두 개의 반사경을 적용하여 설계한 카세그레인 안테나로 분류된다. 지상국에서는 일반적으로 급전 손실이 적고, 이득이 높은 카세그레인 안테나를 데이터 수신 안테나로 사용하고 있다.

지상국 안테나 성능 지표 중 가장 중요한 요소는 저궤도 위성 데이터링크를 위한 안테나 이득이다. 파라볼라 안테나의 이득은 안테나 반사판의 크기와 운용 주파수의 파장을 통해 대략적으로 계산할 수 있다. 앞서 설명한 지상국을 포함한 다른 지상국에서 운용 중인 안테나들에 대해 조사한 결과, 안테나의 크기는 최소 5 m에서 최대 18.3 m까지의 크기로 설계되며, 주파수 대역은 데이터의 용량에 따라 S-/X-대역을 주로 사용하는 것으로 확인되었다. 앞서 조사한 지상국과 추가적으로 조사한 지상국의 수신 안테나의 이득은 S-대역에서 39.4 dBi~50 dBi의 이득특성을 가지며, X-대역에서는 54 dBi~59.1 dBi의 이득특성을 가지는 것을 확인하였다. 또한, 반전력 빔폭

HPBW(half power beamwidths)는 S-대역에서는 $0.5^{\circ} \sim 1.83^{\circ}$, X-대역에서는 $0.17^{\circ} \sim 0.32^{\circ}$ 의 값을 가지는 것으로 나타났다.

또한, 지상국 안테나 성능 지표 중 하나인 이득 대 잡음 온도 비 G/T는 안테나 이득을 수신기 잡음 온도로 나눈 값을 의미하며, 값이 클수록 성능이 우수한 안테나임을 나타낸다. 여기서 잡음 온도는 장치, 회로, 소자의 잡음 성능을 단순한 온도 수치로 평가한 값으로, 지상국 안테나에서는 안테나의 잡음 온도와 시스템의 잡음 온도를

합한 값이다. 조사된 지상국 안테나의 S-및 X-대역에서 G/T값은 각각 14.1 dB/K~29.6 dB/K 및 30.5 dB/K~37.8 dB/K값을 가지는 것을 확인하였다.

추가적으로 지상국 안테나의 편파는 다양한 위성과 데이터를 송수신해야 하는 지상국 안테나의 특성상 우선회원편파 RHCP(right handed circular polarization), 좌선회원편파 LHCP(left handed circular polarization) 모두 활용하고, 유효 등방성 복사전력 EIRP(effective isotropic radiation power)는 51 dBW~86 dBW로 나타났다. 조사를 통해 얻은

표 3. 지상국 안테나 운용 스펙

Table 3. Ground station antenna operation specifications.

Name	Size (m)	Receiving frequency (MHz)	EIRP (dBW)	Polarization	Gain (dBic)	HPBW (deg)	G/T (dB/K)
AS1	11.3	2,200~2,400	64.6	RHCP, LHCP	45.8	0.85	22
		8,025~8,500		RHCP, LHCP	56.8	0.23	37.2
AS2	10	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
AS3	11	2,200~2,400	65.7	RHCP, LHCP	45.8	0.85	22.9
		8,025~8,500		RHCP, LHCP	56.8	0.23	36.2
USAK01	13	2,200~2,400	69	RHCP, LHCP	48	0.70	23.5
		8,000~8,500	68	RHCP, LHCP	59.1	0.17	37.7
USAK02	5	2,200~2,400	56	RHCP, LHCP	39.7	1.83	16
USAK03	5.4	2,200~2,400	N/A	RHCP, LHCP	N/A	N/A	15
		8,000~8,500		N/A	N/A	N/A	31.5
USAK04	7.3	2,200~2,400	58.4	RHCP, LHCP	42.4	1.25	19.6
		8,000~8,500		RHCP, LHCP	54.2	0.29	31
USAK05	11	2,200~2,300	65.4	RHCP, LHCP	46	0.85	23.2
		8,100~8,400		RHCP, LHCP	56.86	0.2	34
KUS	6.1	2,200~2,400	N/A	RHCP, LHCP	N/A	N/A	14.1
PDL	6.1	2,200~2,400	N/A	RHCP, LHCP	N/A	N/A	14.1
HBKS	12	2,200~2,400	69	N/A	N/A	N/A	22.4
HB5S	10	2,200~2,400	65	N/A	N/A	N/A	19.1
		8,000~8,400					30.5
USHI01	13	2,200~2,400	78	RHCP, LHCP	48	0.7	23.5
		8,000~8,500		RHCP, LHCP	59.1	0.17	37.7
USHI02	13	2,200~2,400	68	RHCP, LHCP	48	0.7	23.5
		8,000~8,500	86	RHCP, LHCP	57.8	0.19	37.7
AUWA01	13	2,200~2,400	68	RHCP, LHCP	48	0.7	23.5
		8,000~8,500		RHCP, LHCP	59.1	0.17	37.7
KU1S	13	2,200~2,400	69	RHCP, LHCP	N/A	0.7	23
		8,000~8,400		RHCP, LHCP	N/A	0.2	33
KU3S	13	2,200~2,300	69	RHCP, LHCP	N/A	0.7	22.5
		7,600~8,500		RHCP, LHCP	N/A	0.2	37.5

<표 계속>

표 3. 지상국 안테나 운용 스펙

Table 3. Ground station antenna operation specifications.

Name	Size (m)	Receiving frequency (MHz)	EIRP (dBW)	Polarization	Gain (dBic)	HPBW (deg)	G/T (dB/K)
MG1 10-m	10	2,200~2,400	63	RHCP, LHCP	45	0.91	21
		7,700~8,500		RHCP, LHCP	56	0.26	32
TR2	7.3	2,200~2,400	51	RHCP, LHCP	41.8	1.16	19.4
		7,500~8,500		RHCP, LHCP	54	0.32	32
SG1	11.3	2,200~2,400	63.5	RHCP, LHCP	45.1	0.8	22.1
		7,700~8,500		RHCP, LHCP	57.5	0.2	36.8
SG2	11.3	2,200~2,400	59	RHCP, LHCP	45.1	0.84	23.8
		7,500~8,500		RHCP, LHCP	57	0.23	35.7
SG3	13	2,200~2,400	67	RHCP, LHCP	46.9	0.71	23
		7,500~8,500		RHCP, LHCP	59	0.19	37.8
AGO 9-m	9	2,200~2,300	75	RHCP, LHCP	44	1	23.6
AGO 12-m	12	2,200~2,300	N/A	RHCP, LHCP	46.5	0.75	25.7
AGO 13-m	13	2,200~2,300	70	RHCP, LHCP	47	0.69	24.4
SI1	9.4	2,200~2,300	56	RHCP, LHCP	43.13	0.98	20.5
		7,585~8,500		RHCP, LHCP	55.42	0.24	33.4
WG1 11.3-m	11.3	2,200~2,400	64.6	RHCP, LHCP	45.8	0.85	23.6
		8,000~8,500		RHCP, LHCP	56.8	0.23	34.5
LEO-T	4.7	2,200~2,300	59.2	RHCP, LHCP	39.4	1.83	17
WU1S	15	2,200~2,300	78	N/A	N/A	N/A	26.7
WU2S	15	2,200~2,300	78	N/A	N/A	N/A	26.7
WSC VHF-1	N/A	143.625	43.4	RHCP	18	20	N/A
WSC VHF-2	N/A	121.750	37.4	RHCP	12	20	N/A
WS1	18.3	2,200~2,300	72 or 81	RHCP, LHCP	50	0.5	29.6
		25,500~27,000		RHCP, LHCP	70.5	0.04	46

각 지상국 안테나의 자세한 성능은 표 3에 나타났다^[33].

IV. 데이터링크 버짓 계산

안정적인 데이터 송수신을 위해서는 위성의 데이터 송신 안테나와 지상국의 데이터 수신 안테나 간의 데이터 링크 버짓 설계를 통한 분석 및 예측이 필수적으로 요구된다. 고용량 데이터 전송을 위해 ITU-R SA.1024-1에서 권고하는 내용을 바탕으로 8,025 MHz~8,400 MHz 대역을 사용하여 데이터를 송수신하는 시나리오에 대해 데이터링크 버짓 변수를 구성하고, 수신전력을 계산하여 지상

국에서의 데이터 송수신 환경에 대해 예측하고자 한다 [34],[35].

데이터링크 버짓에서 수신전력을 계산하기 위해서는 송신시스템에 대한 정보가 필요하다. 유효 등방성 복사 전력 EIRP는 위성에서 데이터를 송신하는 안테나의 이득 G_t 와 송신전력 P_t 의 곱으로 송신시스템의 정보를 의미하며, 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$EIRP = G_t \times P_t \quad (1)$$

송신시스템으로부터 수신시스템까지 데이터를 송신할 때, 전송 거리에 따라 자유공간에서의 전력 손실이 생기

므로 데이터링크 버짓 구현 시 거리에 따른 손실을 고려해야 한다. 자유공간에서의 손실을 L_f 로 나타내며, 데이터 전송 거리 d 와 동작 주파수 f 에 따라 식 (2)와 같이 계산할 수 있다. 추가적으로 위성에서 전파가 진행하면서 편파 특성이 변함에 따라 발생하는 편파 손실 L_{pol} 과 지상국에서 위성을 추적하면서 위성 안테나를 조준할 때 발생하는 off-axis 감쇠인 L_{point} 및 지상국의 수신 안테나의 급전부 손실 L_{feed} 에 대해서도 고려하여 데이터링크 버짓을 계산하였다. 그 이외에 우주 전파 환경을 반영한 전력 손실을 고려할 수 있으며, 대기권을 고도에 따른 층으로 분할하고, 우주 전파 환경 파라미터를 고려하여 각 경계면에서 전파의 반사 및 투과계수를 계산하며, 이에 따른 전파의 감쇠 및 굴절을 계산할 수 있다. 또한, 경계면에서의 굴절, 감쇠는 광선 추적법, 기하 광학법 등을 이용하여 계산할 수 있으나, 본 논문에서는 자유공간에서의 전력 손실, 편파 손실, off-axis 감쇠를 고려하고, 이외의 상황에 대해서는 이상적인 환경이라고 가정하여 데이터링크 버짓을 분석한다.

$$L_f = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{c_0}\right) \quad (2)$$

P_r 은 지상국에서의 수신전력을 나타내며, EIRP와 지상국 수신안테나의 이득 G_r 을 더한 값에 L_f , L_p , L_a 및 L_{feed} 를 뺀 값을 의미하며, 식 (3)을 통해 계산할 수 있다.

$$P_r = EIRP + G_r - L_f - L_{pol} - L_{point} - L_{feed} \quad (3)$$

표 4는 데이터링크 버짓을 계산하기 위한 송수신 시스템의 파라미터들을 보여준다. 데이터를 수신하는 지상국은 KSAT사에서 운영 중인 싱가포르 지상국으로 가정하고, 데이터를 지상국으로 송신하는 위성은 한국에서 운용 중인 다목적실용위성 5호로 가정한다. 이때 위성에서 사용되는 데이터 송신용 안테나는 2-2절에서 조사한 안테나 중 helix와 patch array로 설정하였으며, 안테나의 종류에 따라 데이터링크 버짓을 계산하여 수신전력을 확인한다.

그림 9는 저궤도 위성이 지상국으로부터 데이터 전송 거리 d 가 550 km에서 최대 2,200 km까지 증가하는 환경에서의 P_r 을 확인한 결과를 보여준다. 이때, 데이터 전송 거리는 위성의 지상국 접속 각도인 고각 5° 를 고려하여

표 4. 데이터링크 버짓 설계 파라미터

Table 4. Datalink budget parameter.

Item	Values	
Ground station Rx antenna gain (dBic)	55.42	
Rx feeder loss L_{feed} (dB)	2	
Satellite altitude (km)	550~2,200	
Frequency (MHz)	8,000	
Tx power (dBm)	33	
Tx antenna gain (dBic)	Helix	0
	Patch array	4
EIRP (dBm)	Helix	33
	Patch array	37
Free space path loss (dB)	L_f	
Polarization loss L_{pol} (dB)	0.5	
Antenna pointing loss L_{point} (dB)	0.2	

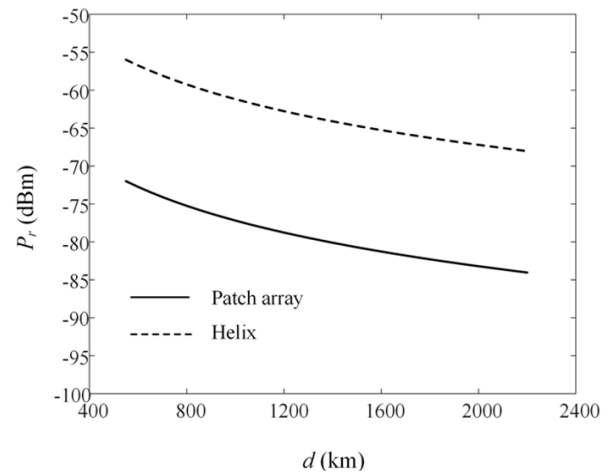


그림 9. 지상국의 수신전력

Fig. 9. Received power of the datalink budget.

계산하였으며, 위성 데이터 송신 안테나가 helix인 경우, 최소 P_r 은 -68.1 dBm, 최대 P_r 은 -55.9 dBm이며, patch array인 경우 최소 P_r 은 -84.1 dBm, 최대 P_r 은 -71.9 dBm임을 확인하였다. 저궤도 위성은 수신전력이 -100 dBm 이상인 경우 데이터 수신 가능하다고 판단하며, 이와 같이 데이터링크 버짓 설계를 통해 지상국에서의 수신전력을 계산하고, 데이터 송수신 가능 여부를 예측할 수 있다. 구현한 데이터링크 버짓에서 두 송신 안테나 타

입에 대해 P_r 이 -100 dBm 이상으로 나타나므로, 데이터 수신에 가능한 것을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 고해상도의 고용량 영상 데이터를 전송하기 위해 현재 운용 중인 저궤도 위성, 데이터 송신 안테나, 지상국 및 데이터 수신 안테나의 성능을 표로 정리하여 저궤도 위성 데이터링크의 전반적인 최신 기술 동향을 정리하였다. 이를 바탕으로 데이터 송수신 여부를 확인하기 위해, 저궤도 SAR 위성 안테나 성능과 데이터 수신을 위한 지상국 안테나 성능을 고려하여 특정 시나리오에 대한 데이터링크 버짓을 계산하였다. 우리나라의 다목적실용위성 5호와 싱가포르의 지상국의 통신 환경을 가정하고, 이에 대해 데이터링크 버짓을 계산하여 수신전력을 확인한 결과 -90 dBm 이상으로, 데이터 송수신이 가능한 것을 확인하였다. 추후 연구로는 우주환경을 반영한 전력 손실 값을 계산하여, 보다 정확한 위성 및 지상국 간의 데이터 송수신 환경에 대해 분석할 예정이며, 최신 기술 동향 조사를 바탕으로 저궤도 위성 및 지상국의 데이터 송수신 안테나 설계에 반영하여 연구를 진행할 예정이다.

References

- [1] S. N. Madsen, C. Chen, and W. Edelstein, "Radar options for global earthquake monitoring," in *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Toronto, ON, Jun. 2002, pp. 1483-1485.
- [2] Y. Luo, B. Zhao, X. Han, R. Wang, H. Song, and Y. Deng, "A novel high-order range model and imaging approach for high-resolution LEO SAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 6, pp. 3473-3485, Jun. 2014.
- [3] W. Q. Wang, "Near-space wide-swath radar imaging with multiaperture antenna," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 8, no. 1, pp. 461-464, Mar. 2009.
- [4] Necessary Bandwidths and Preferred Frequency Bands for Data Transmission from Earth Exploration Satellite (Not Including Meteorological Satellites), *Recommendation SA.1024-1*, Jun. 1997.
- [5] F. Caltagirone, A. Capuzi, A. Coletta, G. F. De Luca, E. Scorzafava, and R. Leonardi, et al., "The COSMO-skyMed dual use earth observation program: Development, qualification, and results of the commissioning of the overall constellation," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 7, no. 7, pp. 2754-2762, Jul. 2014.
- [6] G. D. Krebs, "KOMPSAT 5(Arirang 5)," 2022. Available: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/kompsat-5.htm
- [7] eoPortal Directory, "KOMPSAT-5." Available: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/k/kompsat-5>
- [8] G. D. Krebs, "Gaofen 3(GF 3)," 2022. Available: https://space.skyrocket.de/doc_sdat/gf-3.htm
- [9] eoPortal Directory, "Gaofen-3." Available: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/gaofen-3>
- [10] Spaceflight Insider, 2017. Available: <https://www.spaceflightinsider.com/organizations/jaxa/jaxas-h-ii-a-igs-radar-5-delayed-1-day/>
- [11] Spaceflight101, "Japan's H-IIA successfully places radar reconnaissance satellite in orbit," 2017. Available: <https://spaceflight101.com/h-ii-a-igs-radar-5-launch-success/>
- [12] N2YO, "IGS 5A." Available: <https://www.n2yo.com/satellite/?s=36104>
- [13] NPO Mashinostroyeniya, "Condor-E small spacecraft with a synthetic aperture radar." Available: http://www.npomash.ru/activities/images/radio_en.pdf
- [14] eoPortal Directory, "Kondor-E." Available: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/k/kondor-e>
- [15] Russian space web, "Russia orbits South-Africa's first spy satellite Kondor-E," 2015. Available: <http://www.russianspaceweb.com/kondor-e.html>
- [16] eoPortal Directory, "Capella X-SAR." Available: <https://>

- directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/content/-/article/capella-x-sar
- [17] Capella Space, "SAR Imagery Products" Available: <https://www.capellaspace.com/data/sar-imagery-products/>
- [18] F. Dubrovka, S. Martunyk, R. Dubrovka, M. Lytvyn, S. Lytvyn, and Y. Ovsianyk, et al., "Circularly polarised X-band H11- and H21-modes antenna feed for monopulse autotracking ground station: Invited paper," in *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week*, Kharkiv, Sep. 2020, pp. 196-202.
- [19] S. H. S. Cheong, T. H. Kim, J. M. Jung, S. G. Lee, and Y. H. Kim, "Design of 2-axis gimbal spaceborne x-band antenna for high data rate payload transmission," in *2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC)*, Seoul, Nov. 2013, pp. 479-481.
- [20] K. Tomoki, H. Saito, "Dual circularly polarization antenna with high XPD for downlink communication of earth observation satellite," in *2017 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)*, Tsukuba, Dec. 2017, pp. 232-234.
- [21] Satsearch, "X-band 4x4 patch array antenna," 2022. Available: <https://satsearch.co/products/endurosat-x-band-4x4-patch-array-antenna>
- [22] C. X. Mao, S. Gao, Y. Wang, Q. X. Chu, and X. X. Yang, "Dual-band circularly polarized shared-aperture array for C/X-band satellite communications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 65, no. 10, pp. 5171-5178, Oct. 2017.
- [23] A. Garcia-Aguilar, J. M. Inclan-Alonso, L. Vigil-Herrero, J. M. Fernandez-Gonzalez, and M. Sierra-Perez, "Low-profile dual circularly polarized antenna array for satellite communications in the X band," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 60, no. 5, pp. 2276-2284, May 2012.
- [24] N. Chahat, L. R. Amaro, J. Harrell, C. Wang, P. Estabrook, and S. A. Butman, "X-band choke ring horn telecom antenna for interference mitigation on NASA's SWOT mission," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 64, no. 6, pp. 2075-2082, Jun. 2016.
- [25] E. Arnaud, J. Dugenet, K. Elis, A. Girardot, D. Guihard, and C. Menudier, et al., "Compact isoflux X-band payload telemetry antenna with simultaneous dual circular polarization for LEO satellite applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 10, pp. 1679-1683, Oct. 2020.
- [26] V. Akan, "Choke ring horn antenna design for satellite payload data transmitters," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 63, no. 7, pp. 1913-1919, Jul. 2021.
- [27] J. Wettergren, P. Dimming, J. F. Johansson, and M. Öhgren, "A high gain X-band isoflux helix antenna," in *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP)*, Davos, Apr. 2016, pp. 1-4.
- [28] Y. J. Lee, J. H. Lu, I. Y. Tam, S. L. Chen, and S. J. Chung, "An X-band circularly polarized antenna for satellite applications," in *2014 Asia-Pacific Microwave Conference*, Sendai, Nov. 2014, pp. 876-878.
- [29] F. Peter, S. Graham, and S. John, *Spacecraft Systems Engineering*, New York, NY, John Wiley & Sons, 2011.
- [30] Wikipedia, "File: Longyearbyen plataaberget IMG 3014.jpg," 2011. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Longyearbyen_Plataaberget_IMG_3014.jpg#filelinks
- [31] Wikipedia, "File:McMurdo station.jpg," 2006. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/File:McMurdo_Station.jpg
- [32] National Oceanic and Atmospheric Administration, "Fairbanks command and data acquisition station (FCDAS)." Available: <https://www.ospo.noaa.gov/FCDAS/index.html>
- [33] National Aeronautics and Space Administration(NASA), "The earth network(NEN) users' guide: Revision 5," 2020. Available: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20205005784>
- [34] M. Akhtaruzzaman, S. S. Bari, S. A. Hossain, and M. M. Rahman, "Link budget analysis in designing a web-application tool for military X-band satellite communication," *MIST International Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 17-33, Jul. 2020.

[35] Y. K. Kwag, "Imaging mode design and performance characteristics of the X-band small SAR satellite

system," *Journal of the Korean Society of Remote Sensing*, vol. 16, no. 2, pp. 157-175, Jun. 2000.

강 은 정 [홍익대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-0265-1144>



2016년 8월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학사)
2016년 7월~2017년 10월: 한국전자기술 연구원 위촉연구원
2017년 11월~2018년 6월: (주)파워리퍼블릭 연구원
2020년 8월: 홍익대학교 전자전기공학과

(공학석사)

2020년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 박사과정
[주 관심분야] 배열안테나설계, 전파환경분석, 항재밍시스템, 무선전력전송, UWB 안테나

임 창 현 [홍익대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-8973-4398>



2021년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2021년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 석사과정
[주 관심분야] 차량용 5G 안테나 설계, 무선 전력전송, UWB 안테나 설계

윤 상 윤 [홍익대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-1437-8445>



2019년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2021년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2021년 3월~현재: 홍익대학교 전자전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 소형 UWB 안테나, 빔형성 안테나, 다중모드 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, 5G 차량 안테나

양 준 모 [아주대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-2888-0340>



2021년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2021년 3월~현재: 아주대학교 AI융합네트워킹학과 석사과정
[주 관심분야] 우주 전파 모델링, 저궤도 위성용 안테나 설계, 머신러닝

김 정 훈 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5683-2402>



2010년 8월: 한양대학교 전자전기제어계측공학과 (공학박사)
2010년 9월~2012년 8월: 한국산업기술시험원 연구원
2012년 10월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
[주 관심분야] 초고주파 수신기, 주파수합성기, 전자파 잔향실, EMI 등

박 용 배 [아주대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7095-4614>



1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2003년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2003년 2월~2006년 8월: KT인프라연구

소 선임연구원
2006년 9월~현재: 아주대학교 전자공학과/AI 융합네트워크학과 교수
[주 관심분야] 안테나, 전자장 해석, EMI/EMC

신 옥 현 [국방과학연구소/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6278-1848>



1986년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
2003년 8월: 충남대학교 컴퓨터학과 (이학박사)
1986년 2월~현재: 국방과학연구소 수석연구원
[주 관심분야] 신호수집분석, 머신러닝

추 호 성 [홍익대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-8409-6964>



1998년 2월: 한양대학교 전파공학과 (공학사)
2000년 8월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학석사)
2003년 5월: 미국 University of Texas at Austin 전자전기공학부 (공학박사)
2003년 9월~현재: 홍익대학교 전자전기

공학부 교수
[주 관심분야] 초소형 안테나, 최적화 알고리즘을 이용한 안테나 설계, 차량 및 항공기 안테나

박 영 주 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7152-1442>



1993년 2월: 성균관대학교 전기공학과 (공학사)
1997년 2월: 성균관대학교 전기공학과 (공학석사)
2017년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학박사)
1997년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구

원
[주 관심분야] 전자전 송수신 시스템 설계, 초광대역 안테나 설계, 위성 전자전 시스템