

초소형 군집위성을 위한 지상 안테나시스템 성능에 관한 연구

송창윤, 양형모, 서정원
한국항공우주연구원

changyoon@kari.re.kr, yhm@kari.re.kr, seojw@kari.re.kr

A Study on the Ground Station Antenna Systems for Small Satellite Constellations

Song Chang Yoon, Yang Hyung Mo, Seo Jung Won
Korea Aerospace Research Institute

요 약

본 연구는 제주 국가위성운영센터에 구축된 7.3m 지상국 안테나 시스템의 하드웨어 사양과 실측 기반 성능을 정량적으로 분석하였다. 안테나의 구조 정밀도, 기계적 구동 특성, 이득, 빔 패턴, 포인팅 정확도, 편파 특성 등 핵심 성능 지표를 중심으로 평가를 수행하였다. 측정 결과, 시스템 성능은 대부분 설계 사양과 부합하거나 유사한 수준을 유지하였으며, 포인팅 에러 역시 허용 범위 내에서 안정적으로 나타났다. 본 연구는 지상국 안테나의 하드웨어 성능을 실증함으로써, 향후 고신뢰 통신 품질 확보를 위한 설계 및 운용 기준 마련에 기초 자료를 제공하고자 한다.

I. 서론

최근 위성의 소형화 기술이 비약적으로 발전하고, 발사 비용 또한 지속적으로 감소하면서, 전 세계적으로 초소형 위성에 대한 관심이 급증하고 있다. 이들 위성은 중대형 위성 대비 크기와 무게는 작지만, 고성능 탑재체를 통해 고해상도 영상 및 다양한 데이터를 수집할 수 있다. 특히 다수의 초소형 위성을 군집 형태로 운용함으로써, 단일 위성보다 더 높은 시·공간적 해상도를 확보할 수 있어 여러 분야에서 활용 가능성이 주목받고 있다.

대표적인 사례로는, 미국의 Planet Labs가 100기 이상의 'Dove' 광학 위성을 운용하여 지구 전역의 이미지를 일일 단위로 수집하고 있으며, Capella Space와 BlackSky는 SAR(Synthetic Aperture Radar) 기반 초소형 위성을 통해 재난 감시, 농업 모니터링, 해양 환경 관측, 국가 안보 등 다양한 분야에 고정밀 관측 데이터를 제공하고 있다. 이처럼 상업적, 학술적, 정책적 활용도가 높아짐에 따라 초소형 위성 시장은 지속적으로 확대되고 있으며, 이에 따라 위성으로부터 수신되는 대용량 데이터를 효율적이고 안정적으로 처리할 수 있는 지상국 인프라의 중요성 또한 크게 부각되고 있다.

지상국 인프라는 단순한 데이터 수신 기능을 넘어서, 위성과의 안정적인 통신 링크 확보 및 고속 전송을 위한 핵심 기반 시설로 작용한다. 특히, 초소형 군집위성과 같은 복수 위성 운용 환경에서는 각 위성과의 통신 창이 짧고 빈번하게 반복되므로, 안테나 시스템은 높은 추적 정밀도와 신속한 기동 성능을 동시에 요구받는다. 이에 따라 지상국의 안테나 하드웨어 성능은 위성 운용 효율성과 통신 품질 확보에 직접적인 영향을 미치게 된다.

초소형 군집위성은 운용 목적에 따라 주로 S/X 밴드 주파수를 사용하며, 대용량 데이터의 고속 전송이 필수적이다. 이를 충족하기 위해서는 지상 안테나 시스템이 고감도 수신 성능과 높은 지향 정밀도, 그리고 안정적인 추적 능력을 함께 갖추어야 한다. 본 논문은 제주 국가위성 운영센터에 구축된 7.3m 급 지상 안테나 시스템(Vision730, Safran)의 하드웨어 성능을 실측 기반으로 분석하고, 해당 시스템이 설계 기준에 부합하는지를 검증

하는 것을 목적으로 한다.

II. 본론

본 연구에서는 초소형 위성 통신을 위한 지상국 안테나 시스템의 성능을 평가하기 위해, 주요 성능 지표를 선정하고 각 항목별 실측시험을 통해 성능을 측정하였다. 평가 항목은 총 6 가지로 구성되며, 각 항목의 측정 방법 및 기준은 다음과 같다.

1. G/T (Gain-to-Noise Temperature) 측정

수신 성능을 정량화하기 위해 G/T 값을 계산한다. 본 시험은 Y-Factor 측정을 기반으로 수행되며, 이는 천체(태양)로부터 수신한 잡음 전력과 청명한 하늘(Cold Sky)로부터 수신한 잡음 전력 간의 비율을 통해 G/T를 계산하는 방식이다. 각 주파수 대역(S/X-band)의 중심 주파수를 기준으로 측정한다.

2. RF Pattern 측정

안테나의 방사 패턴 특성을 평가하기 위해 정지궤도 위성(GK-2A)의 신호를 활용하여 S-band 및 X-band의 Azimuth 및 Elevation 방향 패턴을 측정한다. 제조사에서 제공하는 전용 소프트웨어를 사용하며, 주파수 대역별 Main beam과 Beamwidth를 시각화하여 성능을 측정한다.

3. 포인팅 및 추적 정확도 평가

지상국 안테나 시스템의 위성 추적 성능을 검증하기 위해, KOMPSAT-3, KOMPSAT-5, CAS500-1 등 실제 저궤도 위성의 패스(Pass) 데이터를 활용한다. 측정은 자동 추적 모드에서 수행하며, 위성의 고도에 따라 Elevation 각도를 Low, Mid, High의 세 구간으로 구분하여 각 구간에서 안테나의 실시간 지향 데이터를 기록한다.

Pointing Error는 예측된 위성의 위치와 안테나 ACU(Antenna Control Unit)로부터 수집된 실제 지향 위치 간의 각도 차이를 나타내며, Tracking Error는 자동

추적 모드에서 위성 궤적을 따라가며 발생한 실시간 추적 오차를 나타낸다. 본 측정을 통해 안테나 시스템의 지향 안정성과 궤적 추적능력을 검증한다.

4. 운동 성능(속도 및 가속도) 측정

안테나 시스템의 기계적 구동 성능을 검증하기 위해, Azimuth, Elevation, Train 축의 구동시험을 수행한다. 각 축의 속도 및 가속도는 안테나 제어용 소프트웨어에 탑재된 데이터스코프 기능을 활용하여 실시간으로 측정하며, 시험은 저궤도 위성 추적에 요구되는 고속 기동 조건을 설정한 후 진행한다. 측정은 각 축을 순차적으로 가동하며 수행되며, 이 과정에서 수집된 속도 및 가속도 프로파일을 기반으로 최대 응답 특성 및 동작 안정성을 평가한다.

5. Pass-Band 평탄도 측정

안테나 시스템의 주파수 응답 특성을 평가하기 위해, RF 체인의 Pass-Band 평탄도를 측정한다. 이는 가용 주파수 대역에서 신호 전력의 균일성을 나타내는 지표로, 주파수 변화에 따른 출력 전력의 변동 정도를 확인하는데 사용한다.

측정은 일정 파워의 기준 신호를 입력값으로 하고, 주파수를 일정 간격으로 변화시키는 스텝 스위치 방식으로 구간별 출력 전력을 스펙트럼 분석기를 이용해 측정하며, 이후 각 주파수 지점에서 전력 변동폭(ΔP)을 산출한다.

6. 가상 위성 Pass 시험

지상국 안테나의 자동 추적 기능을 정량적으로 평가하기 위해, 가상의 위성 패스를 설정하여 시험을 수행한다. 가상 위성은 고도 400 km, 최대 Elevation 89.9°의 저궤도 통과 조건을 기준으로 정의한다. 이 데이터를 기반으로 궤도 정보를 생성하여 안테나 제어 시스템에 Pass Schedule 형태로 등록한다.

시험은 실제 위성 패스와 동일한 조건으로 자동 추적 모드를 활성화한 상태에서 진행하며, 추적 과정 중 안테나의 실시간 구동 데이터와 지향 각도 정보를 수집한다. 수집된 데이터를 예측 궤적과의 비교를 통해 포인팅 오차를 분석하며, 이를 통해 자동 추적 성능이 안정적으로 유지되는지를 검증한다. 본 시험은 실제 위성을 운용 전, 사전점검 목적으로 수행한다.

III. 측정 결과

본 연구에서는 제주 국가위성운영센터에 구축된 7.3m 급 지상 안테나시스템의 성능을 실측 시험을 통해 정량적으로 평가하였다. 각 항목은 실제 운용 조건을 반영한 환경에서 측정되었으며, 통신품질 및 시스템 운용 안정성과 직결되는 성능 지표들을 중심으로 측정하였다. 아래 <표 1>은 주요 성능 항목별 측정 결과를 요약한 것으로 설계 기준과의 적합 여부를 확인할 수 있다.

표 1. 안테나시스템 성능 측정 결과

구분		측정 결과	기준 또는 허용범위
G/T	S-band	$\geq 20.36 \text{ dB/K}$	$\geq 19.5 \text{ dB/K}$
	X-band	$\geq 33.03 \text{ dB/K}$	$\geq 32.5 \text{ dB/K}$
Velocity	Azimuth	$8.55^\circ/\text{s}$	$8.5^\circ/\text{s}$
	Elevation	$4.53^\circ/\text{s}$	$4.5^\circ/\text{s}$
	Train	$4.60^\circ/\text{s}$	$4.5^\circ/\text{s}$
RF Pattern	S-band	$1.08^\circ (\pm 5\%)$	$1.08^\circ @ \text{center freq.}$

(3 dB)	X-band	$0.3^\circ (\pm 5\%)$	$0.3^\circ @ \text{center freq.}$
Accuracy	Pointing	$0.1^\circ \text{ RMS BRE}$ 이내	$0.1^\circ \text{ RMS BRE}$
	Tracking	$0.05^\circ \text{ RMS BRE}$ 이내	$0.05^\circ \text{ RMS BRE}$
Pass band	S-band	$\pm 1.12 \text{ dB}$	$\pm 1 \text{ dB}$ @100MHz BW
	X-band	$\pm 0.65 \text{ dB}$	$\pm 1 \text{ dB}$ @100MHz BW
가상 위성 추적 시험 (고도 400km)		추적 성능 만족	Ele. 89.9° 조건

본 연구를 통해 제주 국가위성운영센터에 구축한 안테나시스템은 초소형 군집위성을 추적할 수 있는 구동 성능과 위성과의 안정적인 교신이 가능한 성능을 모두 만족함을 확인하였다.

IV. 결론

본 연구에서는 제주 국가위성운영센터에 구축된 7.3m 급 지상국 안테나 시스템(Vision730)을 대상으로, S/X-band 운용 조건에서의 하드웨어 성능을 실측 기반으로 정량 평가하였다. 측정 결과, G/T, 포인팅 정확도, 주파수 평탄도 등 주요 통신 성능 지표에서 설계 기준을 충족하거나 이를 상회하는 수준의 성능을 보여주었다.

이러한 결과는 본 안테나시스템이 저궤도 위성 통신 환경에서 실질적인 운용 신뢰성을 확보할 수 있음을 의미하며, 향후 유사 시스템 도입 및 운용 시 기술적 기준의 지표로 활용될 수 있다. 아울러, 본 연구에서 제시한 실측 기반 평가 방법론은 지상 안테나시스템의 성능 검증 체계를 표준화하는 데 있어 유용한 참조 사례로 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 우주항공청의 재원으로 지원을 받아 수행된 것임(과제번호 : RS-2020-NR067013)

참 고 문 헌

[1] Safran Data Systems, VISION 730 Antenna Acceptance Test Procedure, Ref. D162526 Rev 00, Mar 2024.

[2] Michael Morgan, "Determination of Earth-Station Antenna G/T Using the Sun as an RF Source", SmallSat Conf., 2018.

[3] M. Mitry, "Building an orbiting Internet just for satellites," IEEE Spectrum, 23 Jan. 2020.