

정지궤도 위성 네트워크에서 통신 속도 향상을 위한 성상도 재구성 방안

하 승 철*, 방 인 규*, 김 태 훈°

Constellation Reconfiguration Method for Data Rate Improvement in Geostationary Orbit Satellite Networks

SeungCheol Ha*, Inkyu Bang*,
Tachoon Kim°

요 약

최근 저궤도 위성이 각광을 받고 있으나 여전히 중궤도, 정지궤도 위성 등은 여전히 안정적인 통신 서비스 제공을 위한 핵심 기술로 활용되고 있다. 본 연구에서는 한정된 주파수 자원을 활용해 정지궤도 위성 네트워크의 성능 개선을 위해 성상도 재구성 방안을 제안하며, 이를 통해 통신 속도가 일부 향상될 수 있음을 확인하고자 한다. 모의실험을 통해 재구성한 성상도의 비트오류율을 분석하고, 링크 버짓 분석을 통해 성능 개선 여부를 확인하여 무선 채널 상태에 따른 적응적 성상도 적용 필요성에 대해 제안한다.

Key Words : Geostationary Earth Orbit(GEO), Constellation Reconfiguration, Link Budget Analysis

ABSTRACT

Recently, low Earth orbit satellites have been

receiving significant attention. However, there remains a need to utilize medium Earth orbit and geostationary Earth orbit (GEO) satellites to ensure stable communication services. In this paper, we reconstruct a constellation to enhance the performance of GEO satellite communications, and aim to verify its potential to improve data rate. Through simulations, we analyze the bit error rate (BER) of the reconstructed constellation, and evaluate performance improvements via link budget analysis.

I. 서 론

위성통신은 위성과 지상 네트워크를 결합하여 통신 범위를 확장하고, 저지연·고속 데이터 전송을 가능하게 한다. 최근 SpaceX에서 개발한 재사용 가능한 로켓 기술(예: Falcon 9, Falcon Heavy 등)로 인해 위성 발사 비용이 절감되면서 경제성이 향상되었고, 위성 네트워크는 6G 시대의 핵심 인프라로 자리 잡을 것으로 전망된다. 최근 저궤도 위성에 관한 연구가 활발하지만, 여전히 다양한 분야에서 정지궤도 위성이 널리 사용되고 있으며 (예: 기상, 우주기상, 국방, 감시·정찰 등), 특히 한정된 주파수 자원을 활용한 효율적인 통신 속도 향상 방안에 관한 연구가 지속적으로 필요하다^[1].

정지궤도 위성은 지구 적도 상공 약 35,786km 고도에서 지구의 자전 주기와 같은 속도로 공전하는 인공위성을 일컫는다. 정지궤도 위성 기반의 위성통신에서는 위성과 지상국 사이의 통신 거리, 대기층, 기상 조건 등의 다양한 요인으로 인해 링크 버짓(link budget) 분석을 통한 효율적인 통신 시스템의 설계가 필수적이다^[2]. 또한, 정지궤도 위성통신에서 ITU-R에 의한 신규 주파수 할당 및 조정이 의무사항이지만 신규 주파수 할당 자체가 매우 어려운 상황이라 이미 할당된 한정된 주파수 자원을 효율적으로 사용하는 방안에 관한 연구가 필요하다.

* 이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원(KRIT-CT-22-047, 우주계층 지능통신망 특화연구실)과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원 대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2024-00437886, 50%).

• First Author : (ORCID:0009-0006-3019-8902) Hanbat National University, Dept. of Intelligence Media Engineering, scha@edu.hanbat.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : (ORCID: 0000-0002-9353-118X) Hanbat National University Department of Computer Engineering, thkim@hanbat.ac.kr, 부교수, 종신회원

* (ORCID:0000-0001-9092-5039) Hanbat National University Department of Intelligence Media Engineering, ikbang@hanbat.ac.kr, 부교수, 종신회원

논문번호 : 202507-166-B-LU, Received July 21, 2025; Revised July 30, 2025; Accepted July 30, 2025

주파수 자원이 제한된 환경에서 더 높은 데이터 전송률을 달성하기 위해서는, 동일한 전송 전력으로 더 적은 비트 오류율을 보장할 수 있는 성상도 구조가 필요하다. 이러한 관점에서 기존 성상도를 QAM (quadrature amplitude modulation) 형태로 재설계하면, 같은 자원 조건 내에서 기존보다 향상된 데이터 전송률을 실현할 수 있다⁵⁾.

최근 인공지능 기술을 적용하여 성상도 재구성을 시도하여 통신 성능을 개선하는 여러 연구가 논의되고 있다^{3, 4)}. 위성통신, 특히 정지궤도 위성 네트워크에서 성상도 재구성 방안에 관한 연구는 상대적으로 주목을 받고 있지 못한 상황에서 본 연구에서는 정지궤도 위성 네트워크의 통신 속도 향상을 위한 성상도 재구성 방안을 제안한다. 이를 위해 본 논문에서는 모의실험을 통해 재구성한 성상도의 비트 오류율(bit error rate; BER)을 분석하고, 링크 버짓분석을 통해 통신 속도 개선 여부를 확인한다.

II. 링크 버짓 분석

링크 버짓은 위성통신 시스템에서 송신기에서 수신기로 신호가 전달될 때 전파 경로상에서 발생하는 신호 강도의 손실과 이득을 계산하는 방법을 의미하며, 지상국과 위성 간의 신뢰도 높은 안정적인 통신환경을 보장하기 위해 링크 버짓 분석이 필수적이다.

지상국에서 수신한 잡음 밀도(noise density) 당 반송파 전력(carrier power)을 β [dB]로 가정하면, β 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\beta = \text{EIRP} + \frac{G_r}{T} - k_B - L. \quad (1)$$

여기서, EIRP[dBW]는 유효 등방성 방사 전력, $\frac{G_r}{T}$ [dB/K]에서 G_r [dB]는 안테나의 이득, T [K]는 시스템의 잡음 온도, k_B [dBW-s/K]는 볼츠만 상수, L [dB]은 모든 경로 손실을 의미한다. $\beta > 0$ 이라면, 지상국은 안정적인 통신 서비스를 제공할 수 있음을 의미하며, β 는 다음과 같이 다시 표현될 수 있다.

$$\beta = \left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{req}} + R_b + \eta. \quad (2)$$

여기서, $\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{req}}$ [dB]는 목표 비트 오류율(target BER)

을 달성하기 위해 요구되는 신호 대 잡음 비(required signal-to-noise ratio; required SNR), R_b [dB above 1bit/s]는 달성 가능한 데이터 전송률, η 는 링크 마진(link margin)을 의미한다.

β 는 위성의 송신 전력, 수신 안테나 성능, 대기 감쇠, 강우 감쇠 등으로 인한 경로 손실에 따라 환경적으로 결정되는 부분이다. 링크 버짓 요소를 반영하기 위해, 실제 운용 중인 기상 위성 파라미터를 기반으로 링크 버짓 분석을 수행하였다. 표 1에는 해당 분석에서 사용된 주요 파라미터가 정리되어 있으며, 이를 통해 현실성을 반영한 시뮬레이션 환경을 구성하였다.

충분한 β 가 확보되었을 때, 안정적인 통신을 위한 링크 마진 η , 신뢰도 있는 통신을 위해 필요한 신호 대 잡음 비 $\left(\frac{E_b}{N_0} \right)_{\text{req}}$ 등을 결정할 수 있고, 이 경우 달성 가능한 데이터 전송률을 계산할 수 있다.

표 1. 링크버짓 분석 사례
Table 1. An example of link budget analysis

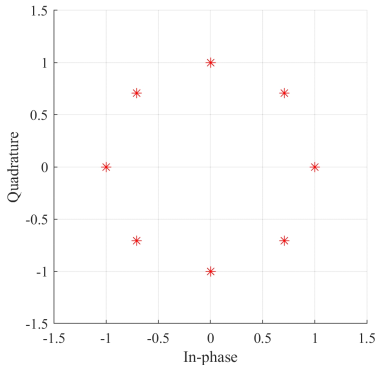
Parameters	Values
EIRP [dBW]	39
G_r/T [dB/K]	33
k_B [dBW-s/K]	-228.6
L [dB]	200
β [dB]	100.6

III. 성상도 재구성

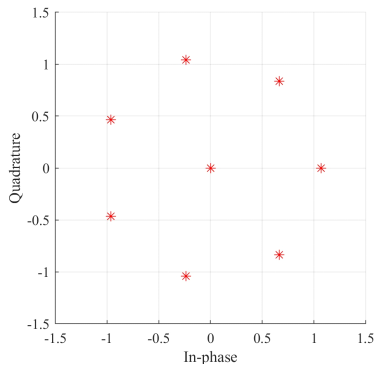
성상도는 신호의 기하학적 표현 방식을 의미하며, 성상도를 재구성(reconfiguration, or reconstruction)은 신호의 형태를 재설계(redesign)한다는 것을 의미한다. 송수신에 사용되는 정현파(sinusoidal) 신호 $s(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$s(t) = I_m \cos(2\pi f_c t) + Q_m \sin(2\pi f_c t). \quad (3)$$

여기서 f_c 는 반송파의 중심 주파수를 의미한다. 또한, I_m 는 신호의 In-Phase 성분인 $\cos(2\pi f_c t)$ 의 계수이고 Q_m 은 Quadrature 성분인 $\sin(2\pi f_c t)$ 의 계수이기때문에, (I_m, Q_m) 형태로 좌표계에 표현할 수 있다. 그림 1(a)는



(a) Gray Coded 8-PSK 성상도
(a) Constellation diagram of Gray Coded 8-PSK



(b) 재구성된 Gray Coded 8-QAM 성상도
(b) Constellation diagram of reconfigured Gray Coded 8-QAM

그림 1. 성상도 비교

Fig. 1. Comparison of constellation diagram

위성통신에서 사용되는 변조 차수(modulation order) 8인 Gray-Coded 8-PSK (phase shift keying)의 성상도를 보여주며, 그림 1(b)는 본 연구에서 신규 고려하는 QAM 계열의 성상도를 변형한 Gray-Coded 8-QAM의 성상도를 보여주고 있다. 성상도를 재구성하는 이유는 목표로 하는 비트 오류율을 달성하는 $\left(\frac{E_b}{N_o}\right)_{\text{req}}$ 값의 변화 여부를 살펴보기 위해서다.

IV. 모의실험

본 장에서는 MATLAB을 이용한 모의실험 결과를 통해, 성상도 재구성 방안이 데이터 전송률 성능 개선에 미치는 효과를 검증하고자 한다. 위성과 지상국 간의 무선 채널은 실제 위성통신 링크에서 발생할 수 있는 직선 경로(line-of-sight) 성분, 그림자 감쇠

(shadowing), 다중 경로 페이딩(multipath fading)을 반영하기 위해 Shadowed-Rician 채널 모델을 적용하였다. 채널 파라미터는 Land Mobile Satellite 채널 모델 중 Average Shadowing 조건^[6]을 기반으로 설정하였으며, 이에 따라 Rician 조절 인자 $b = 0.126$, 감쇠 인자 $m = 10.1$, LoS 성분의 평균 전력 $\Omega = 0.835$ 로 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 데이터 전송을 위해 변조 차수가 8인 변조 기법을 사용을 가정했고, 비트 오류를 줄이기 위해 Gray Code를 적용했다. 또한, 오류 정정(error correction)을 위해 리드 솔로몬 부호(Reed-Solomon code)를 활용했고, 부호화율(coding rate) R_c 는 1 (uncoded), 5/6, 3/4, 2/3, 1/2을 고려하였다. 제안 기법의 성능을 공정하게 비교하기 위해 Gray-Coded 8-PSK (그림 1(a) 참고) 및 Autoencoder 기반 성상도^[4]를 비교군으로 설정하였다.

그림 2는 $\frac{E_b}{N_0}$ 에 따른 비트 오류율 성능을 나타내며, 부호화율에 따른 비교 결과를 종합적으로 도시하였다. 부호화율에 따라 같은 오류 성능을 달성하는 데 필요한 $\frac{E_b}{N_0}$ 가 달라지는 것을 확인할 수 있다. 고려하고 있는 모든 부호화율에서 제안하고 있는 QAM 계열의 성상도(그림 1(b) 참고)가 다른 기법들과 비교했을 때, 보다 적은 에너지로 동일한 비트 오류율을 달성할 수 있음을 확인할 수 있었다.

$R_c = \frac{1}{2}$ 일 때의 사례 분석을 진행해보면, 10^{-4} 의 비트 오류율을 달성하기 위해 8-PSK의 경우 13.305dB가 필요하고, 제안한 8-QAM의 경우 12.373dB가 필요하다. 즉, 신호 재설계(또는 성상도 재구성)를 통해 약

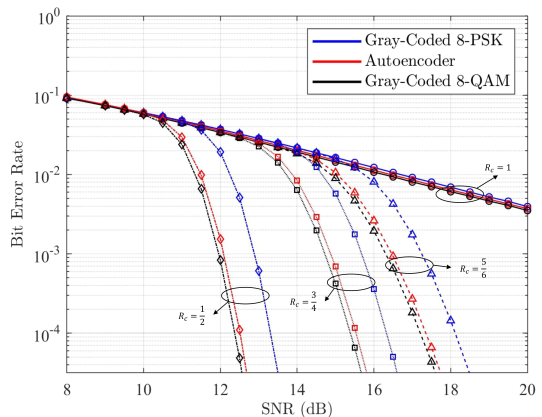


그림 2. SNR에 따른 BER 비교

Fig. 2. BER Comparison for varying SNR

0.932dB 정도의 적은 전력으로 같은 오류 관점에서 동일한 신뢰도를 달성할 수 있음 의미한다. 링크 마진을 5dB로 고정하고 ($\eta = 5$), 수식 (2)를 이용할 경우, 전자의 경우 $100.6\text{dB} - 13.305\text{dB} - 5\text{dB} = 82.295\text{dB}$ above bit/s, 후자의 경우 $100.6\text{dB} - 12.373\text{dB} - 5\text{dB} = 83.227\text{dB}$ above bit/s를 달성할 수 있다. 즉, 고려하고 있는 환경에서 성상도 재구성을 통해 약 13Mbps의 성능 개선이 있을 수 있음을 확인하였다. 일반적으로 통신환경이 우수하지 못한 정지궤도 위성 네트워크를 고려하게 된다면, 단순한 성상도 변경을 통해 13Mbps 성능 개선을 기대할 수 있다면 가치 고무적이라고 얘기할 수 있다. 이러한 관찰을 통해, 종래의 통신 시스템에서는 무선 채널 환경에 따라 변조 차수 및 부호화율을 적응적으로 변경했다면, 위성 통신 시스템에서는 성상도까지 적응적으로 변경하는 것도 가능할 것으로 예상된다.

V. 결 론

본 논문에는 한정된 주파수 자원을 활용해 정지궤도 위성 네트워크의 성능 개선을 위해 성상도 재구성 방안을 제안하였다. 모의실험을 통해 재구성한 성상도의 비트 오류율을 분석하고, 링크 버짓 분석을 통해 재구성한 성상도를 활용할 경우 통신 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] G. P. Ellrod and K. Pryor, "Applications of geostationary satellite data to aviation," *Pure and Applied Geophysics*, vol. 176, pp. 2017-2043, 2019.
- [2] D. Kim and D. Song, "User link design and link budget analysis of military low earth orbit satellite communication system," *J. KICS*, vol. 48, no. 5, pp. 607-611, 2023.
- [3] S. Wang, H. Yu, Y. Yuan, G. Liu, and Z. Fei, "AI-enhanced constellation design for NOMA system: A model driven method," *China Commun.*, vol. 17, pp. 100-110, 2020.
- [4] J. Barrueco, J. Montalban, E. Iradier and P. Angueira, "Constellation design for future communication systems: A comprehensive survey," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 89778-89797, 2021.
- [5] P. K. Singya, P. Shaik, N. Kumar, V. Bhatia and M.-S. Alouini, "A survey on higher-order QAM constellations: Technical challenges, recent advances, and future trends," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 2, pp. 617-655, 2021.
- [6] M. R. Bhatnagar and M. K. Arti, "On the closed-form performance analysis of maximal ratio combining in shadowed-rician fading LMS channels," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 18, no. 1, pp. 54-57, Jan. 2014.