

# 지능형 반사 표면을 이용한 저궤도위성 통신의 성능 분석

이주환, 신원재\*, 이정우

서울대학교, \*아주대학교

jhlee@cml.snu.ac.kr, \*wjshin@ajou.ac.kr, junglee@snu.ac.kr

## Performance Analysis of LEO Satellite Communication System with Reconfigurable Intelligent Surfaces

Lee Ju Hwan, Shin Won Jae\*, Lee Jung Woo

Seoul National Univ., \*Ajou Univ.

### 요약

최근 통신과 위성 기술의 발전으로 저궤도 위성통신은 저지연 및 커버리지 확대 측면에서 6G 후보 기술로 많은 각광을 받고 있다. 그러나 저궤도위성과의 고도각이 작은 지상 단말에서 신호를 수신할 때에는 경로 손실이 매우 커서 신호 대 잡음비가 낮아 원만한 통신이 어렵다. 본 논문은 군집 저궤도위성을 고려하여 동일 궤도 상의 인접 저궤도위성에 설치된 지능형 반사 표면을 활용한 협력전송 방안을 제안하였다. 송신 신호의 에너지 제한 조건 하에 송신 및 반사 빔포밍의 통합최적화를 통해 수신 신호의 신호 대 잡음비를 최대화하는 것을 목표로 하였고 시뮬레이션을 통해 성능을 입증하였다.

### I. 서론

최근 우주 기술의 급발달과 함께 인공위성의 비교적 저비용 생산이 가능해지며 Starlink, Telesat LEO 등과 같은 저궤도위성이 많아지고 있다. 저궤도 위성통신은 저지연, 커버리지 확대 면에서 6G 후보 기술로 각광 받고 있다[1]. 그러나 저궤도위성과 지상 단말 간 먼 거리, 대기권 섭광, 지상 단말 주변 건물 등으로 인한 경로손실이 200dB 이상으로 매우 높다[2]. 특히 지상 단말의 수신 안테나가 저궤도위성을 바라보는 각도인 고도 각도 (elevation angle)가 작을수록 채널이 비가시 거리(Non Line-of-Sight, NLoS)일 확률이 높아 경로손실이 커서 수신 신호 대 잡음비 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)가 낮아 원만한 통신이 어렵다.

본 논문에서는 그림 1. 과 같이 지상 단말(User)과 직각을 이루며 송신 저궤도위성(Sat-S)과 동일 궤도 상의 저궤도위성에 지능형 반사 표면 (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)을 사용하여 RIS를 활용한 협력 전송 방안을 제안하였다. 송신 신호의 에너지 제한 조건 하에 수신 SNR을 최대화하는 것을 목표로 하여 최적화 문제를 형성하였다. 위성 채널 모델을 반영한 송신 및 RIS 빔포밍의 통합최적화 알고리즘(Joint optimization) [3]을 적용하였으며, RIS를 사용하였을 때 수신 SNR이 대폭 향상됨을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

### II. 본론

#### 가. 시스템 모델

지상 단말과 송신 저궤도위성이 이루는 고도각  $\alpha = 10^\circ$  로 가정하고, 지구 반지름( $R_E$ )을 6379 km, 저궤도위성의 궤도( $h_0$ )를 300 km(다른 언급 없을시)로 가정하였다. 그러면 송신 저궤도위성과 지상 단말 사이 거리( $d$ )는 식 (1) 과 같다.

$$d = \sqrt{R_E^2 \sin^2 \alpha + h_0^2 + 2h_0 R_E - R_E \sin \alpha} \quad (1)$$

또한, 송신 및 RIS 저궤도위성 사이 거리( $d_R$ )는 식 (2) 와 같다.

$$d_R = \sqrt{d^2 + h_0^2 - 2dh_0 \sin \alpha} \quad (2)$$

각 위성과 단말의 안테나 또는 표면의 개수를 송신 저궤도위성에서  $M$  개, RIS 저궤도위성에서  $N$ 개, 지상 단말에서 1개로 가정하였다. TDD 프로토콜을 가정하여 송신 저궤도위성-지상 단말 간 채널, 송신 저궤도위성-RIS 간 채널, RIS-단말 간 채널을 각각  $\mathbf{h}_d^H \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ ,  $\mathbf{h}_1 \in \mathbb{C}^{N \times M}$ ,  $\mathbf{h}_2^H \in \mathbb{C}^{1 \times N}$  로 두었고, RIS 각 표면의 각도 변화를  $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \dots, \theta_N]$  이라 할 때 각도 변화 행렬을  $\boldsymbol{\Theta} = \text{diag}(e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_N})$  로 두었다. 또한, 송신 저궤도위성에서의 송신 신호를 독립균등분포(independent and identically distributed)따르며 평균이 0, 표준편차가 1을 만족하는 변수  $s$ 로, 송신 빔포밍 벡터를  $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  로 두었다. 노이즈  $z$ 는 표준정규분포를 따르는 부가백색가우시잡음(additive white Gaussian noise)으로 가정하였다. 따라서 지상 단말의 수신 신호  $y$ 는 식 (3) 과 같다.

$$y = (\mathbf{h}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{h}_1 + \mathbf{h}_d^H) \mathbf{w} s + z \quad (3)$$

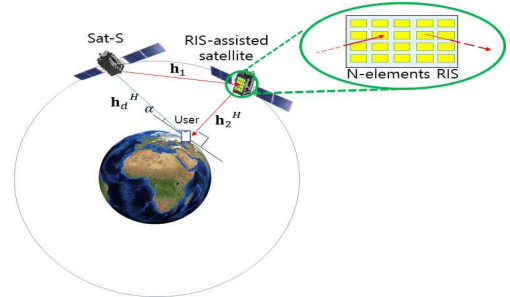


그림 1. RIS를 이용한 저궤도위성-지상 통신

식 (3)에 의해 지상 단말의 수신 신호의 평균 SNR( $\gamma$ )은 식 (4) 와 같다.

$$\gamma = |(\mathbf{h}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{h}_1 + \mathbf{h}_d^H) \mathbf{w}|^2 \quad (4)$$

저궤도위성과 지상 단말 간 경로 손실은 국제 표준화 단체의 모델을 따라  $PL = PL_b + PL_e + PL_g + PL_s$ 로,  $PL_b$ 는 기본 경로 손실,  $PL_e$ 은 실내 지상 단말의 경우 건물 진입 손실,  $PL_g$ 은 대기 흡수 감쇠,  $PL_s$ 은 이온권 또는 대기권 섭광에 의한 감쇠일 때에 경로 손실이다. 여기서 자유

공간 경로 손실은  $FSPL(d, f_c) = 32.45 + 20\log_{10}(f_c) + 20\log_{10}(d)$ ,  $CL(\alpha, f_c)$ 은 단말 주변에 의한 clutter 감쇠, SF는 Shadow 페이딩으로  $N(0, \sigma_{SF}^2)$ 을 따르며  $PL_b = FSPL(d, f_c) + SF + CL(\alpha, f_c)$ 이다[2].

#### 나. 수신 SNR 최대화를 위한 송신 및 RIS 빔포밍 통합최적화 기법

송신 신호의 파워가  $\bar{p}$  이하일 때 송신 저궤도위성의 빔포밍과 RIS의 수동적 반사 빔포밍의 통합최적화 문제는 아래 (P1)과 같다.

$$(P1) \max_{\omega, \theta} |(\mathbf{h}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{h}_1 + \mathbf{h}_d^H) \boldsymbol{\omega}|^2 \\ \text{s.t. } \|\boldsymbol{\omega}\|^2 \leq \bar{p}, \\ 0 \leq \theta_n \leq 2\pi$$

본 논문에서는 Distributed algorithm[3]으로 (P1)을 해결하였다.

**Step 1)** 송신 빔포밍  $\boldsymbol{\omega}$ 가 주어질 때 RIS 각도 변화  $\theta$  최적화

(P1)의 목적함수는  $|(\mathbf{h}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{h}_1 + \mathbf{h}_d^H) \boldsymbol{\omega}|^2 \leq |\mathbf{h}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{h}_1 \boldsymbol{\omega}| + |\mathbf{h}_d^H \boldsymbol{\omega}|$ 을 만족한다. (a)의 등호성립조건은  $\arg(\mathbf{h}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{h}_1 \boldsymbol{\omega}) = \arg(\mathbf{h}_d^H \boldsymbol{\omega}) \stackrel{\Delta}{=} \varphi$ 이다. 이를 만족하는 최적  $\theta_n$ 은  $\mathbf{h}_{2,n}^H, \mathbf{h}_{1,n}$ 을 각각  $\mathbf{h}_2^H$ 과  $\mathbf{h}_1$ 의  $n$ 번째 요소라고 할 때  $\theta_n^* = \varphi - \arg(\mathbf{h}_{2,n}^H) - \arg(\mathbf{h}_{1,n} \boldsymbol{\omega})$ 이다.

**Step 2)** RIS 각도 변화  $\theta$ 가 주어질 때 송신 빔포밍  $\boldsymbol{\omega}$  최적화

송신 빔포밍  $\boldsymbol{\omega}$ 는 Maximum Ratio Transmission(MRT)인 경우가 최적이지만 피드백의 복잡도를 낮추기 위해 MRT 경우에  $e^{j\beta}$ 를 곱함으로써  $\varphi = 0$ 로 고정시켜  $\boldsymbol{\omega}^* = \sqrt{\bar{p}} \frac{(\mathbf{h}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{h}_1 + \mathbf{h}_d^H)^H}{\|\mathbf{h}_2^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{h}_1 + \mathbf{h}_d^H\|} e^{j\beta}$ 로 설정한다.

단,  $\beta$ 는 송신기에서  $\mathbf{h}_d^H \boldsymbol{\omega}^*$ 가 항상 실수가 되도록 매 반복에서 골라진다.

위 **Step 1), Step 2)**를 처음  $\boldsymbol{\omega}$ 를  $\boldsymbol{\omega} = \sqrt{\bar{p}} \frac{\mathbf{h}_d}{\|\mathbf{h}_d\|}$ 로 두고, (P1)의 목적함수값의 증가량이 0.0001 이하가 될 때까지 반복하여 송신 빔포밍과 RIS 각도 변화의 최적점을 찾는다.

#### 다. 시뮬레이션 결과

송신 신호의 캐리어 주파수( $f_c$ )는 위성과 단말의 이동성을 고려하여 이동 빔을 지원하는 S밴드로  $f_c = 2.2\text{GHz}$ 로 가정하고, RIS와 지상 단말 안테나의 안테나 이득을 10dB로,  $\bar{p} = 100\text{W}$ 로 가정하였다. 송신 저궤도위성과 지상 단말 사이 채널과 RIS 저궤도위성과 지상 단말 사이 채널이 가시적 거리(Line-of-Sight, LoS)일 확률을 각각 98.1%, 28.2%로 두고, 저궤도위성 간 채널은 LoS로 가정하였다. 고도각이  $10^\circ$ 일 때  $PL_g = 0\text{dB}$ ,  $PL_s = 1.9069\text{dB}$ , LoS에서  $\sigma_{SF} = 3.5\text{dB}$ , NLoS에서  $\sigma_{SF} = 15.5\text{dB}$ 와  $CL = 34.3\text{dB}$ 로 가정하였다. 고도각이  $90^\circ$ 일 때는  $PL_g = PL_s = 0\text{dB}$ , LoS에서  $\sigma_{SF} = 1.2\text{dB}$ , NLoS에서  $\sigma_{SF} = 9.2\text{dB}$ 와  $CL = 25.5\text{dB}$ 로 가정하였다. 또한, 실외 단말 가정으로  $PL_e = 0\text{dB}$ 로 가정하였다[2]. RIS를 사용하지 않을 때 빔포밍은 MRT로 설정하였다.

그림 2와 그림 3은 RIS의 이용 유무에 따른 수신 SNR을 비교하였고, 그림 2와 그림 3 모두 RIS를 이용할 때가 수신 SNR이 높음을 볼 수 있다. 그림 2는  $N$ 에 따른 수신 SNR을 나타내었는데, RIS를 이루는 표면의 개수가 많을수록 수신 SNR이 높음을 볼 수 있다.

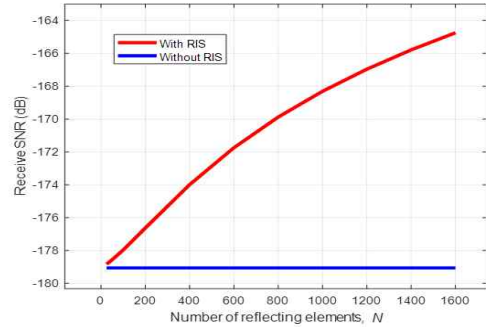


그림 2. 지능형 반사 표면 개수에 따른 수신 SNR 비교

그림 3은  $N=1000$ 인 경우 저궤도위성의 궤도가  $300 \sim 1500\text{ km}$ 로 달라짐에 따른 수신 SNR을 비교한 것이다. 궤도가 높을수록 수신 SNR이 낮아짐과 RIS를 사용함에 따른 이득이 감소됨을 볼 수 있다.

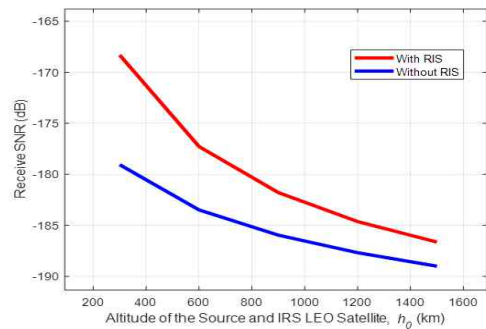


그림 3. 송신 및 RIS 저궤도위성 궤도와 수신 SNR 비교

### III. 결론

본 논문은 위성채널모델을 고려하여 저궤도위성이 고도각이 낮은 지상 단말에 통신할 때 동일 궤도 저궤도위성에 RIS를 갖추어 통신함으로써 수신 SNR을 대폭 향상하는 방법을 제안하였다. 그리하여 송신 및 RIS 빔포밍 통합최적화 기법과 시뮬레이션으로 RIS를 갖춘 통신이 더 효율적임을 확인했다.

### ACKNOWLEDGMENT

This work is in part supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korea government(MSIT) (No.2021-0-00467, Intelligent 6G Wireless Access System, 50%) and Bio-Mimetic Robot Research Center Funded by Defense Acquisition Program Administration, Agency for Defense Development (UD190018ID, 50%), INMAC, and BK21-plus.

### 참고 문헌

- [1] P. S. Kim, J. G. Ryu, and W. J. Byun, "Research Trends in Global Wireless Communication Technology Based on the LEO Satellite Communication Network," *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 35, no. 6, pp. 83-91, Oct. 2020.
- [2] 3GPP TR 38.811 v15.4.0, "Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15)," Sep. 2020.
- [3] Q. Wu., and R. Zhang, "Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: Joint active and passive beamforming design," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, pp. 1-6, Dec. 2018.