

RSMA 기반 거대 MIMO 를 탑재한 저궤도 위성 하향링크

김성현, 박양호*, 김건주*, 이경재*
국립한밭대학교, *중앙대학교

30242762@edu.hanbat.ac.kr, *{yanghopark, golho2006, kyoungjae}@cau.ac.kr

LEO Satellite Downlink With RSMA-Based Massive MIMO

Kim Seonghyun, Park Yangho*, Kim Kunju*, Lee Kyoung-Jae*
Hanbat National Univ., *Chung-Ang Univ.

요 약

본 논문은 불완전한 채널 상태 정보를 갖는 다중 안테나 저궤도 위성과 다수의 단일 안테나 단말로 구성된 하향 링크에 전송률 분할 다중 접속을 적용하였다. 제안된 모델을 기반으로 송신 전력에 따른 합 스펙트럼 효율을 공간 분할 다중 접속과 비교 분석한 결과, 시뮬레이션을 통해 성능 향상을 확인하였다.

I. 서론

6 세대 이동통신에서 전 지구적 커버리지 실현을 위해, 넓은 지역에서 높은 전송률을 제공하는 저궤도 위성이 핵심 기술로 주목받고 있다. 그러나 위성의 이동성과 심각한 경로 손실로 인해 채널 상태 정보 확보가 어려워 성능 저하가 발생한다. 이를 해결하기 위해 전송률 분할 다중 접속 기법이 제안되었으며, 공통 및 개별 스트림 분할을 통해 간섭 관리의 유연성을 제공한다. 본 논문에서는 해당 기법을 저궤도 위성 기반 다중 사용자 다중 입력 단일 출력 하향링크 시스템에 적용하고, 불완전 채널 상태 정보 환경에서 송신 전력 변화에 따른 합 스펙트럼 효율을 기존 공간 분할 다중 접속과 비교 분석한다 [1].

II. 본론

본 논문에서는 M 개의 송신 안테나를 가진 저궤도 위성과 K 개의 단일 안테나 사용자 단말로 구성된 시스템을 가정하며, 위성이 기지국의 역할을 수행한다. 통신은 상관 시간 T 내에서 τ_p 의 시간동안 p_p 전력의 파일럿을 통해 채널 추정이 이루어진다. 채널은 음영 페이딩이 포함된 라이시안 모델을 따른다. 채널 행렬 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{M \times K}$ 는 결정형/랜덤 성분의 합으로 구성되며, 공간 상관 행렬 \mathbf{R} 은 국부 산란 모델을 기반으로 계산된다. 채널 추정은 최소 평균 제곱 오차 방법을 사용하며, 실제 채널은 추정 성분 $\hat{\mathbf{H}}$ 과 오차 성분 $\tilde{\mathbf{H}}$ 의 합으로 표현된다. 각 사용자의 추정 및 오차 채널은 각각 $\hat{\mathbf{h}} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{E}[\hat{\mathbf{h}}], \hat{\beta}\mathbf{I}_M)$ 와 $\tilde{\mathbf{h}} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \tilde{\beta}\mathbf{I}_M)$ 를 따른다. 여기서 추정 이득과 오차 이득은 $\hat{\beta} = \frac{p_p \tau_p \beta^2}{(\kappa+1)(p_p \tau_p \beta + \sigma_n^2)}$ 와 $\tilde{\beta} = \frac{\beta}{\kappa+1} - \hat{\beta}$ 로 주어진다. 전송률 분할 다중 접속 전송에서는 각 사용자 메시지를 공통/개별 스트림으로 분할하여 송신 신호는 아래와 같이 표현된다 [1]–[2].

$$\mathbf{x} = \sqrt{P_c} \mathbf{w}_c s_c + \sum_{k=1}^K \sqrt{P_{p,k}} \mathbf{w}_{p,k} s_{p,k} \quad (1)$$

여기서 P_c, P_p 는 각각 공통/개별 스트림의 전력, s_c, s_p 는 메시지, 프리코더 $\mathbf{W}_p = \frac{K}{\text{tr}(\mathbf{H}^H \mathbf{N} \mathbf{H})} \mathbf{N} \mathbf{H}$, $\mathbf{W}_p = [\mathbf{w}_{p,1}, \dots, \mathbf{w}_{p,K}]$, $\mathbf{N} = (\hat{\mathbf{H}} \hat{\mathbf{H}}^H + M \frac{K}{M_P} \mathbf{I}_M)^{-1}$, $\mathbf{w}_c = \sum_k \frac{1}{\sqrt{MK}} \hat{\mathbf{h}}_k$ 이다. 해당 신호를 전송한 뒤, 수신단에서는 우선 공통 스트림을 복호 후, 순차 간섭 소거를 이용하여 개별 스트림을 복호한다. k 번째 단말에서의 수신 신호와 합 스펙트럼 효율의 수식은 아래와 같다 [1].

$$y_k = \sqrt{P_c} \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_c s_c + \sum_{j=1}^K \sqrt{P_{p,j}} \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{p,j} s_{p,j} + n_k \quad (2)$$

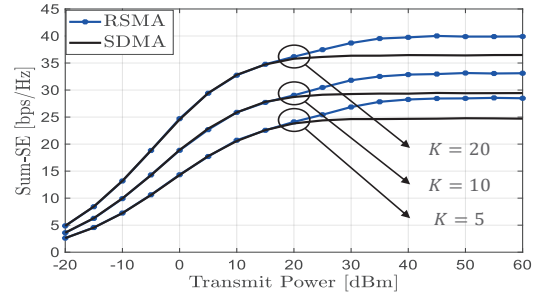


그림 1 사용자 별 전송 전력에 따른 합 스펙트럼 효율 비교

$$R = \frac{T - \tau_p}{T} \left[\min_k \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{P_c |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_c|^2}{\sum_{j=1}^K P_{p,j} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{p,j}|^2 + \sigma_n^2} \right) \right\} + \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P_{p,k} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{p,k}|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K P_{p,j} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_{p,j}|^2 + \sigma_n^2} \right) \right] \quad (3)$$

III. 결론

시뮬레이션을 위해 $BW = 20$ [MHz], $\sigma_n^2 = k_B T_n BW$, $p_p = 25$ [dBm], $T = 200$, $\tau_p = 20$, $\bar{\sigma} = 4$ [dB], $\sigma_w = 6$ [dB], $\kappa = 10$ [dB], $f_c = 2400$ [MHz], $h_0 = 500$ [km], $\alpha = 30$ [°], $G_t = 25$ [dB], $G_r = 5$ [dB] 와 같이 변수를 설정하였다 [3]. 해당 시뮬레이션의 결과인 그림 1 을 통해 20dBm 이상 고 전력 구간에서 성능의 격차가 발생하여, 최대 약 19%가량 높은 합 스펙트럼 효율을 확인할 수 있으며, 이로써 확실한 성능의 개선이 있음을 알 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the IITP (Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation)-ITRC (Information Technology Research Center) grant funded by the Korea government (Ministry of Science and ICT) (IITP2025-RS-2024-00437886) and the ICAN (ICT Challenge and Advanced Network of HRD) program (IITP-2025-RS-2022-00156212).

참 고 문 헌

- [1] M. Dai, B. Clerckx, D. Gesbert and G. Caire, "A Rate-Splitting Strategy for Massive MIMO With Imperfect CSIT," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 15, no. 7, pp. 4611 - 4624, Jul. 2016.
- [2] S. Wang, Y. Liu, W. Zhang and H. Zhang, "Achievable Rates of FullDuplex Massive MIMO Relay Systems Over Rician Fading Channels," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 66, no. 11, pp. 9825-9837, Nov. 2017.
- [3] 3GPP, "Study on New Radio (NR) to Support Non-Terrestrial Networks (Release 15)," 3GPP Technical Report 38.811, v15.4.0, Sep. 2020.