

# 정지궤도 위성 네트워크에서 트래픽 인지 기반 전송률 분할 다중접속 기법

류재학, \*김선민, \*함형빈, \*\*이병주, \*신원재

아주대학교 AI 융합네트워크학과, \*아주대학교 전자공학과, \*\*인천대학교 정보통신공학과  
{fbwogkr98, \*ksm990323, \*andco2009}@ajou.ac.kr, \*\*bjlee@inu.ac.kr, \*wjshin@ajou.ac.kr

## Traffic-Aware Rate-Splitting Multiple Access for GEO Satellite Communications

Jaehak Ryu, \*Seonmin Kim, \*Hyeongbeen Ham, \*\*Byungju Lee, \*Wonjae Shin

Department of AI convergence Network, Ajou Univ.,

\*Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou Univ.,

\*\*Department of Electrical and Computer Engineering, Incheon National Univ.

### 요약

최근 차세대 통신 기기가 발전함에 따라 서비스를 이용하는 사용자 수가 급격하게 증가하고 있으며, 사용자들이 요구하는 트래픽의 범위가 넓어지고 있다. 차세대 통신 기술 중 하나인 위성 네트워크는 넓은 커버리지 특성으로 다양한 환경에서도 다수의 사용자에게 통신 서비스를 제공할 수 있다. 그러나 한정적인 주파수 자원으로 인해 위성 네트워크에서 주파수를 공유하여 다수의 사용자에게 서비스를 지원할 때 간섭 관리와 사용자별로 요구하는 전송률을 제공하는 방안이 필수적으로 제시되어야 한다. 본 논문에서는 다중 빔 기반 정지궤도 위성 네트워크에서 간섭 관리에 강인한 성능을 보이는 전송률 분할 다중접속 기법을 사용하고, 위성 사용자 그룹별로 요구하는 트래픽을 인지하여 프리코딩 벡터를 최적화한 후 시뮬레이션을 통해 성능을 확인하였다.

### I. 연구 배경 및 목적

차세대 통신 기기가 발전함에 따라 서비스 사용자 수가 급격하게 증가하고 있으며, 도심 지역에 한정되지 않고 지구 전역에 통신 서비스를 제공할 수 있는 위성 네트워크가 주목받고 있다. 기존 지상 네트워크와 달리 위성 네트워크는 긴 전파 지연 시간 등으로 인한 불완전한 채널 상태 정보(Channel State Information, CSI), 넓은 커버리지로 인한 간섭에 대한 문제가 있어 이에 대한 해결방안이 필요하다 [1]. 또한, 시스템의 파워 및 한정적인 자원으로 인해 다수의 사용자가 있을 때 사용자마다 요구하는 트래픽을 할당하는 문제가 고려되어야 한다. 본 논문에서는 정지궤도 위성에서 다수의 사용자가 요구하는 트래픽을 인지한 후, 전송률 분할 다중접속 기법(Rate-Splitting Multiple Access, RSMA)을 사용하여 빔 간 간섭 및 채널 상태 정보의 불확실성이 존재하는 환경에서 강인한 성능을 보임을 확인한다.

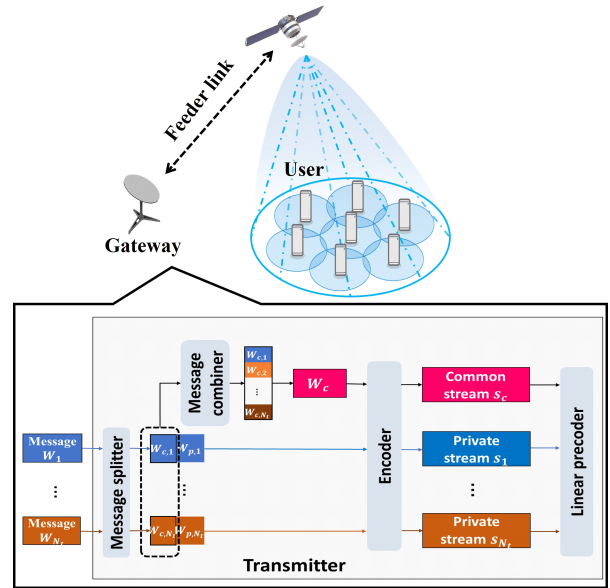


그림 1. 다중 빔 위성 네트워크에서 전송률 분할 다중접속 기법

### II. 위성 네트워크에서 전송률 분할 다중접속 기법 설계

위성 네트워크는 넓은 커버리지로 인해 사용자의 수가 위성의 안테나 수보다 많은 상황을 고려해야 한다. 본 논문에서 고려하는 모델은 다중 빔을 사용하는 정지궤도 위성 네트워크에서 각각의 빔에 다수의 사용자가 위치한다. 위성의 모든 빔이 같은 주파수 자원을 사용하며, 빔 간 간섭이 발생한다. 또한, 정지궤도 위성과 사용자 모두 불완전한 채널 상태 정보를 알고 있다고 가정한다. 본 논문에서는 위성 네트워크에서 간섭 관리에 강인한 전송률 분할 다중접속 기법을 사용한다.

그림 1과 같이 전송률 분할 다중접속 기법을 사용하여 각 그룹에 전송할 메시지를 공유 메시지(Common message)와 사적 메시지(Private message)로 분할한다. 이후 모든 공유 메시지는 하나로 통합된 후 하나의 공유 스트림으로 부호화된다. 사적 메시지는 해당하는 그룹의 수와 동일하게 각각의 사적 스트림으로 부호화된다. 따라서 공유 메시지는 모든 사용자가 복호화할 수 있지만, 사적 메시지는 각 그룹에 해당하는 사용자들만 복호화가 가능하다 [2].

위성은  $N_t$ 개의 빔을 사용하고 1개의 안테나를 갖는  $K$ 명의 사용자가 있을 때,  $n_t \in \mathbf{N} = \{1, \dots, N_t\}$ ,  $k \in \mathbf{U} = \{1, \dots, K\}$ 는 각각 빔 인덱스와 사용자 인덱스를 의미한다. 위성의 하나의 빔에는 하나의 안테나 피드를 사용할 때 그룹  $G_1, \dots, G_{N_t}$  각각에 송신할 메시지는  $\{W_1, \dots, W_{N_t}\}$ 이고 심볼스트림 벡터는  $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_{N_t}, s_c]^T \in \mathbb{C}^{(N_t+1) \times 1}$  ( $s_c \sim \mathcal{CN}(0,1)$ ,  $s_{n_t} \sim \mathcal{CN}(0,1), \forall n_t$ )이다. 데이터스트림은 선형 프리코딩 행렬  $\mathbf{p} = [\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_{N_t}, \mathbf{p}_c] \in \mathbb{C}^{N_t \times (N_t+1)}$ 을 거쳐 전송된다. 이때 송신되는 신호  $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_t+1}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{p}_c s_c + \sum_{n_t=1}^{N_t} \mathbf{p}_{n_t} s_{n_t}. \quad (1)$$

$\mu(k) \in \mathbf{N}$ 는 사용자가 속하는 그룹 인덱스로,  $k$ 번째 사용자에게 수신되는 신호는 다음과 같다.

$$y_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_{c_s} + \mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_{\mu(k)} s_{\mu(k)} + \mathbf{h}_k^H \sum_{n_t=1, n_t \neq \mu(k)}^{N_t} \mathbf{p}_{n_t} s_{n_t} + n_k. \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{h}_k$ 는 정지궤도 위성의 채널 벡터이고,  $n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{n,k}^2)$ 은  $k$  번째 사용자의 백색 가우시안 잡음이다. 각 사용자 잡음의 분산은 모두 같다고 가정하며,  $\sigma_{n,k}^2 = \sigma_n^2$ , 안테나 각각의 전력 제한 조건은  $(\mathbf{p}\mathbf{p}^H)_{n_t, n_t} \leq \frac{P_t}{N_t}$ 을 고려한다. 또한, 위성과 사용자 모두에서 불완전한 채널 상태 정보를 알고 있다고 가정한다 [3].

각각의 사용자는 공유 스트림을 복호화한 후 순차적 간섭제거 기법 (Successive interference cancellation, SIC)을 통해 제거하고, 사용자가 속한 그룹의 사적 스트림을 복호화한다.  $k$  번째 사용자가 공유 스트림과 사적 스트림에 대해 달성할 수 있는 전송률을 각각  $R_{c,k}$ ,  $R_{p,k}$ 라고 할 때, 공유 스트림은 모든 사용자가 복호화할 수 있도록 다음과 같이 정의된다.

$$R_c \triangleq \min_{k \in \mathcal{U}} R_{c,k} = \sum_{n_t=1}^{N_t} C_{n_t}. \quad (3)$$

여기서  $C_{n_t}$ 는 공유 스트림에 대해 달성할 수 있는 전송률을 그룹  $G_{n_t}$ 에 특정 비율만큼 할당된 값으로, 0 이상의 값을 갖는다. 그리고 사적 스트림은 해당 그룹의 모든 사용자가 복호화할 수 있으며, 달성할 수 있는 전송률은 다음과 같이 정의된다.

$$R_{p,n_t} \triangleq \min_{j \in G_{n_t}} R_{p,j}. \quad (4)$$

따라서 그룹에서 달성할 수 있는 전송률의 총합은  $R_{n_t} = C_{n_t} + R_{p,n_t}$ 이다.

그룹마다 요구하는 트래픽을 게이트웨이와 위성에서 알고 있을 때, 프리코딩 벡터를 최적화하는 문제는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} P_1 : \max_{\mathbf{p}, \mathbf{c}} \sum_{n_t=1}^{N_t} \min(R_{target, n_t}, R_{n_t}) \\ \text{s.t.} \quad R_{c,k} \geq \sum_{n_t=1}^{N_t} C_{n_t}, \quad \forall k \in \mathcal{U}, \\ C_{n_t} \geq 0, \quad \forall n_t \in \mathcal{N}, \\ (\mathbf{p}\mathbf{p}^H)_{n_t, n_t} \leq \frac{P_t}{N_t}, \quad \forall n_t \in \mathcal{N}. \end{aligned}$$

여기서  $\mathbf{c} = [C_1, \dots, C_{N_t}]$ 는 각 그룹에 할당된 공유 스트림 전송률 비율 벡터이고,  $R_{target, n_t}$ 는 그룹  $G_{n_t}$ 에서 요구하는 트래픽으로 상수이다.  $R_{target, n_t} > R_{n_t}$ 인 그룹을 증점적으로 하여 총합을 구함으로써 그룹별로 요구하는 트래픽을 만족할 수 있도록 한다.

### III. 시뮬레이션 설계 및 결과

본 논문에서는 고도 35,786 km의 정지궤도 위성을 사용하였고 20 GHz의 주파수대역에서 위성의 모든 빔이 자원을 공유하며, 위성과 사용자 모두 불완전한 채널 상태 정보를 알고 있다고 가정한다.

정지궤도 위성에서 하나의 빔에는 하나의 안테나 피드가 사용되며, 위성은 총 7개의 안테나를 사용한다. 그리고 각각의 빔마다 2명의 사용자가 위치하며, 사용자는 총 14명을 두고 진행하였다.

그림 2는 SNR에 따라 공간분할 다중접속 기법(Space Division Multiple

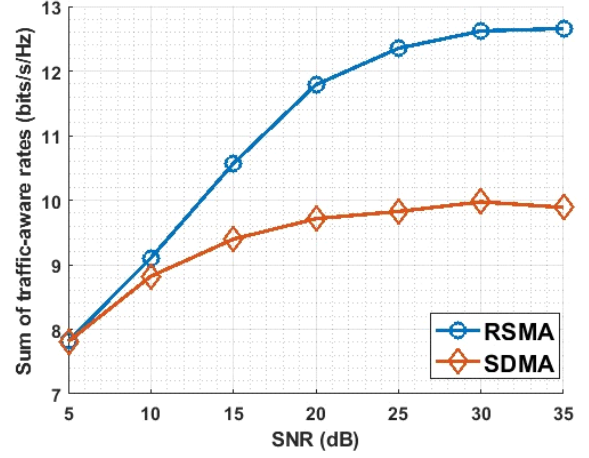


그림 2. SNR에 따른 트래픽 인지 기반 전송률 총합 성능 비교

Access, SDMA)과 전송률 분할 다중접속 기법을 그룹의 트래픽 요구에 맞게 할당된 전송률 총합을 비교하였다. 공간 분할 다중접속 기법의 경우 그룹에 해당하는 메시지를 제외한 나머지를 모두 간섭으로 간주하는 반면, 전송률 분할 다중접속 기법의 경우 일부는 모든 그룹이 복호화할 수 있고 나머지 그룹별 사적 메시지를 복호화할 때 다른 메시지를 간섭으로 간주한다. 이처럼 전송률 분할 다중접속 기법은 능동적으로 공유 메시지의 비율을 조절함으로써 간섭 환경에서도 공간분할 다중접속 기법보다 더 강한 성능을 확인할 수 있다.

### IV. 결론

본 논문에서는 다중 빔 기반 정지궤도 위성 네트워크에서 전송률 분할 다중접속 기법을 사용하여 그룹별 요구하는 트래픽과 그룹에 실제로 제공되는 전송률을 인지하여 합을 최대화하였고, 불완전한 채널 상태 정보와 간섭 상황에서 공유 메시지와 사적 메시지의 비율을 능동적으로 조절하여 강한 성능을 보임을 확인하였다. 본 연구가 추후 다수의 위성 시나리오에서도 활용할 수 있을 것으로 전망한다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No. 2021R1A4A1030775)과 정보통신기획평가원 (No. 2022-0-00704, 2021-0-00260, 2018-0-01424)의 지원을 받아 수행된 연구임.

### 참고 문헌

- [1] A. Gharanjik, "Transmission Optimization for High Throughput Satellite Systems," *Doctoral Thesis, Dept. Elect. Eng., KTH Royal Institute of Technology*, Stockholm, Sweden, 2016.
- [2] L. Yin and B. Clerckx, "Rate-Splitting Multiple Access for Multigroup Multicast and Multibeam Satellite Systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 2, pp. 976–990, 2020.
- [3] B. Lee and W. Shin, "Max-min Fairness Precoder Design for Rate-Splitting Multiple Access: Impact of Imperfect Channel Knowledge," *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, vol. 72, no.1, pp. 1355–1359, 2023.