

# 저궤도 위성 통신시스템을 위한 전송률 분할 다중접속기술 기반 통합 유니-멀티캐스팅 기법

성재협, \*박주하, •박정훈, ◦신원재

아주대학교 AI 융합네트워크학과, \*아주대학교 전자공학과, •연세대학교 전기전자공학부, ◦고려대학교 전기전자공학부  
john12234@ajou.ac.kr, \*qkrwngk8471@ajou.ac.kr, •jhpark@yonsei.ac.kr, ◦wjshin@korea.ac.kr

## Non-Orthogonal Unicast and Multicast Transmission for LEO Satellite Communications: A Rate-Splitting Approach

Jaehyup Seong, \*Juha Park, •Jeonghun Park, and ◦Wonjae Shin

Department of AI Convergence Network, Ajou University,

\*Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University,

•Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University,

◦School of Electrical Engineering, Korea University.

### 요약

최근, 넓은 지역에 낮은 지연시간과 함께 높은 전송률 및 연결밀도를 제공할 수 있는 저궤도 위성통신시스템이 차세대 6G 이동통신시스템을 위한 유망한 기술 중 하나로 인식되고 있다. 아울러, 가용자원을 더욱 효율적으로 사용하기 위해 동일한 주파수/시간자원을 통해 지상의 다중사용자에게 유니/멀티캐스팅 서비스를 동시에 제공하는 통합 유니-멀티캐스팅 기법 또한 큰 주목을 받고 있다. 위성통신시스템의 주요 기능 중 하나는 넓은 커버리지를 서비스하는 것이기 때문에, 커버리지 내 지역별 다양한 지질학적 요인 및 사용자 분포로 인해 다중사용자 간 유니캐스트 메시지의 요구 전송률이 매우 상이하게 되며, 이를 극복하기 위해서는 저궤도 위성에서 가용 전력자원을 효율적으로 사용하여 유니캐스트 메시지의 상이한 요구 전송률을 효과적으로 충족시켜야 한다. 동시에 저궤도 위성통신시스템에서의 신뢰성 있는 멀티캐스팅 서비스를 위해서는 멀티캐스트 메시지의 요구 전송률 또한 효과적으로 충족시켜야 한다. 본 논문에서는 저궤도 위성통신시스템에서 유니/멀티캐스트 메시지의 요구 전송률을 동시에 충족시키기 위한 전송률 분할 다중접속기술을 기반의 전송률 매칭 기법을 제안한다.

### I. 연구배경 및 목적

최근 무선 데이터 어플리케이션의 폭발적인 발전에 따라, 유니캐스팅 서비스에 대한 데이터 요구량이 지속적으로 증가하고 있으며, 미디어의 발전에 따라 방송과 같은 멀티캐스팅 서비스에 대한 데이터 요구량 또한 지속적으로 증가하고 있다. 이러한 요구사항을 충족시키기 위해 최근 동일한 주파수/시간 자원을 활용하여 두 형태의 메시지를 동시에 전송하는 통합 유니-멀티캐스팅(Non-Orthogonal Unicast and Multicast, NOUM) 전송 기법이 큰 관심을 받고 있다. 이러한 통합 유니-멀티캐스팅 전송은 다음과 같은 이유로 저궤도 위성통신시스템에서 더욱 효과적으로 활용될 수 있다. 먼저, 저궤도 위성통신시스템은 넓은 커버리지 확보가 가능하기 때문에, 산간오지, 해양과 같은 인터넷 소외지역에 까지 고품질의 멀티캐스팅 서비스를 제공하기에 매우 용이하다. 또한 저궤도 위성통신시스템은 낮은 전파 지연과 함께 높은 전송률을 제공할 수 있어, 지상의 다중사용자에게 고품질의 유니캐스팅 서비스를 제공할 수 있다는 장점이 존재한다.

하지만, 저궤도 위성통신시스템은 저궤도 위성의 빠른 이동성 및 높은 고도로 인해 정확한 채널상태정보를 얻기 매우 어렵기 때문에, 공간 분할 다중접속기법(Spatial Division Multiple Access, SDMA)과 같은 기존의 다중접속기법을 활용하여 신뢰성 있는 통합 유니-멀티캐스팅 서비스를 제공하기에는 한계가 존재한다. 최근 이를 극복하기 위해, 저궤도 위성통신시스템에서 전송률 분할 다중접속기법(Rate-Splitting Multiple Access, RSMA)을 활용한 통합 유니-멀티캐스팅 전송 기법이 연구되었다 [1]. 해당 연구에서는 quality of service 제약조건을 통해 유니/멀티캐스트 메시지에 대한 요구 트래픽량을 충족시키면서 유니캐스트 메시지의 합-전송률을 최대화하였다. 하지만, 지속적으로 전력을 공급받기 어려운 저궤도 위성에는 가용 전력이 제한적이기 때문에, 유니/멀티캐스트 메시지의 요구 전송률에 비해 가용 전력이 충분하지 않다면 유니/멀티캐스트 메시지에 대한 요구 전송률을 충족시킬 수 없게 되어, 통신의 전체적인 신뢰성을 저하시킬 수 있다. 본 논문에서는 이러한 한계점을 극복하기 위해, 저궤도 위성통신시스템에서 RSMA를 기반으로 가용 송신전력을 효율적으로 사용하여 유니/멀티캐스트 메시지 모두에 대한 요구 전송률을 효과적으로 충족시킬 수 있는 전송률 매칭 기법을 제안한다.

### II. 시스템 모델 및 최적화 문제

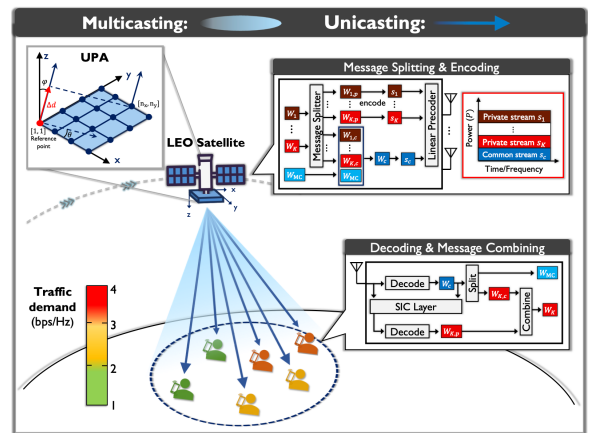


그림 1. 저궤도 위성시스템에서 RSMA 기반 통합 유니-멀티캐스팅 시스템 모델

본 논문에서는 그림1과 같이 uniform planer array (UPA) 안테나가 장착된 저궤도 위성이 부정확한 채널상태정보를 알고 있을 때,  $N_t$ 개의 안테나를 사용하여 유니캐스트 메시지에 대해 상이한 전송률을 요구하는  $K$ 명의 지상 사용자들에게 RSMA를 사용하여 통합 유니-멀티캐스팅 서비스를 제공하는 상황을 가정하였다. 이를 위해, 저궤도 위성에서는 사용자들에게 전송할 유니캐스트 메시지를 각각 공유 메시지와 개인 메시지로 분할 한 후 모든 공유메시지와 멀티캐스트 메시지를 합쳐 1개의 공유 스트림  $s_c$ 로 인코딩하고, 각각의 개인 메시지는  $K$ 개의 개인 스트림  $s_1, \dots, s_K$ 로 인코딩한다. 이때, 모든 스트림은  $\{s_c, s_1, \dots, s_K\} \sim CN(0, P_t)$ 의 확률분포를 띠다고 가정한다. 이후, 공유 프리코딩 벡터  $\mathbf{f}_c$ 와 개인 프리코딩 벡터  $\mathbf{f}_k$ 를 이용하여 송신하고자 하는 데이터를  $\mathbf{x} = \mathbf{f}_c s_c + \sum_{j=1}^K \mathbf{f}_j s_j$ 와 같이 선형 중첩한 뒤, 채널  $\mathbf{h}_k$ 를 통해 송신한다. 이 결과,  $k$ 번째 지상 사용자로부터 수신된 신호  $y_k$ 는  $y_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{x} + n_k$ 와

같이 나타내지며,  $n_k$ 는  $n_k \sim CN(0, \sigma_n^2)$ 의 확률 분포를 띠는 잡음이다. 사용자는 공유 스트림을 우선적으로 디코딩 한 후, 멀티캐스트 메시지와 자신에게 해당하는 공유 메시지를 추출하고, 순차적 간섭제어를 통해 수신한 신호에서 공유 스트림을 제거한다. 이후 사용자는 다른 사용자의 개인 메시지에 의한 간섭을 잡음으로 처리하여, 개인 스트림을 디코딩 한다.

이때, 부정확한 채널상태정보 하에서 저궤도 위성이 평균적으로 강인한 프리코더를 디자인 할 수 있도록, 공유 및 개인 메시지의 전송률을 각각

$$R_{c,k} = \mathbb{E} \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_c|^2}{\sum_{j=1}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_j|^2 + \frac{\sigma_n^2}{P_t}} \right) \right] \quad (1)$$

$$R_{p,k} = \mathbb{E} \left[ \log_2 \left( 1 + \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_k|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_j|^2 + \frac{\sigma_n^2}{P_t}} \right) \right] \quad (2)$$

와 같이 ergodic 형태로 표현한다. 이를 기반으로 유니/멀티 캐스트 메시지에 대한 요구 전송률을 충족시키기 위한 RSMA 기반의 전송률 매칭을 위한 문제는

$$P_1 : \min_{\mathbf{f}, \mathbf{c}} \sum_{j=1}^K |R_{\text{target},j} - R_j|^2 + \eta_{\text{mc}} |R_{\text{target},\text{mc}} - C_{\text{mc}}|^2$$

$$\text{s.t.} \quad \min_{k \in \{1, \dots, K\}} R_{c,k} = \sum_{j=1}^K C_j + C_{\text{mc}},$$

$$C_k \geq 0, C_{\text{mc}} \geq 0, \mathbf{f}^H \mathbf{f} \leq 1.$$

와 같이 공식화 될 수 있다.  $P_1$ 에서  $\mathbf{f}$ 와  $\mathbf{c}$ 는 모든 프리코딩 벡터로 구성된 벡터와 각 사용자에게 할당된 공유 전송률 및 멀티캐스트 전송률로 구성된 벡터로써 각각  $\mathbf{f} = [\mathbf{f}_c, \mathbf{f}_1^H, \dots, \mathbf{f}_K^H]^T$ ,  $\mathbf{c} = [C_1, \dots, C_K, C_{\text{mc}}]^T$ 와 같이 나타내어진다.  $R_k = C_k + R_{p,k}$ 와  $R_{\text{target},k}$ 는 각각  $k$ 번째 사용자에게 대한 달성 가능한 전송률과 요구 전송률이며,  $C_{\text{mc}}$ 와  $R_{\text{target},\text{mc}}$ 는 멀티캐스트 메시지에 대한 달성 가능한 전송률과 요구 전송률이다. 또한,  $\eta_{\text{mc}}$ 는 정규화 변수이다. 이렇게 공식화된 최적화 문제  $P_1$ 은 non-convex한 문제로써 최적의 해를 바로 구하는 것은 매우 어렵다. 이를 해결하기 위해, 전송률 식 (1), (2)를 [2]와 같이 Rayleigh Quotient 형태로 표현하게 되면  $\mathbf{f}^H \mathbf{f} \leq 1$ 에 대한 제약조건을 무시할 수 있게 된다. 아울러, 공유 전송률인  $\min_{k \in \{1, \dots, K\}} R_{c,k}$

를 LogSumExp 함수를 활용하여  $\log \left( \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \exp \left( -\frac{1}{\alpha} R_{c,k} \right) \right)^{-\alpha}$  와 같이 근사한 후, 각 사용자에게 할당 된 공유 전송률 및 멀티캐스트 전송률을

$$C_k = \frac{v_k^2}{\sum_{j=1}^K v_j^2 + v_{\text{mc}}^2} \log \left( \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \exp \left( -\frac{1}{\alpha} R_{c,k} \right) \right)^{-\alpha} \quad (3)$$

$$C_{\text{mc}} = \frac{v_{\text{mc}}^2}{\sum_{j=1}^K v_j^2 + v_{\text{mc}}^2} \log \left( \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \exp \left( -\frac{1}{\alpha} R_{c,k} \right) \right)^{-\alpha} \quad (4)$$

와 같이 나타내게 되면, 다른 모든 제약 조건들도 함께 무시할 수 있게 되어  $P_1$ 은 제약조건이 없는 문제로 재구성될 수 있으며, 재구성 된 문제의 최적의 해는 generalized power iteration (GPI) 알고리즘 [2] 을 통해 효율적으로 도출할 수 있다.

### III. 실험결과

600 km에 위치한 저궤도 위성이 16개의 송신안테나를 사용하여 반지름 120 km의 커버리지 내에 위치한 8명의 사용자를 서비스하는 상황에서, 각 사용자의 유니캐스트 메시지에 대한 요구 전송률을 0.5, 0.5, 0.75, 1, 1, 1.5, 1.5, 2 bps/Hz 로, 멀티캐스트 메시지에 대한 요구 전송률은 1 bps/Hz로 가정하였다.

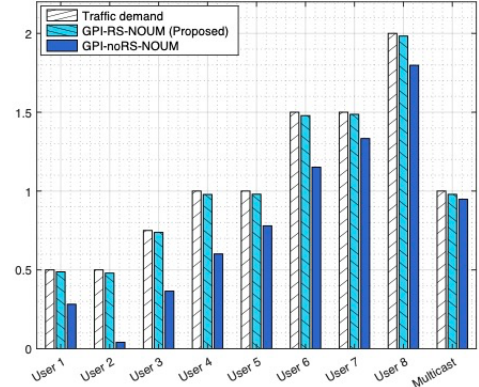


그림 2. 정확한 채널상태정보 하에서의 RSMA와 SDMA 간의 메시지별 전송률 충족도 비교

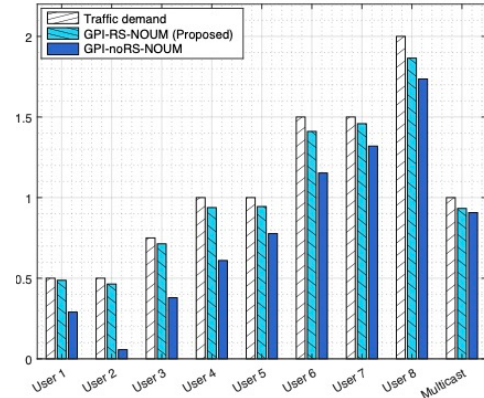


그림 3. 부정확한 채널상태정보 하에서의 RSMA와 SDMA 간의 메시지별 전송률 충족도 비교

잡음 전력  $\sigma_n^2$ 은 1로 가정하였다. 그림 2, 3은 각각 정확한 채널상태정보와 부정확한 채널상태정보 하에서 각 메시지의 요구 전송률에 따른 제안하는 RSMA 기반 기법(GPI-RS-NOUM)과 SDMA 기반 기법(GPI-no-RS-NOUM) 간의 메시지 별 요구 전송률 충족도를 비교한 결과이다. 실험결과를 통해 제안하는 RSMA 기반 기법이 SDMA 기반 기법에 비해 저궤도 위성이 정확한 채널상태정보와 부정확한 채널상태정보를 가진 모든 경우에 대해서, 유니/멀티 캐스트 메시지 모두에 대한 요구 전송률을 효과적으로 충족시킴을 보인다.

### IV. 결론

본 논문에서는 저궤도 위성통신시스템에서 RSMA 기반의 통합 유니-멀티 캐스팅 전송을 위한 전송률 매칭 기법을 제안하였으며, RSMA가 SDMA에 비해 메시지별 요구 전송률을 더욱 효과적으로 충족시킬 수 있음을 보였다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No. 2022R1A2C4002065, No. 2021R1A4A1030775)과 정보통신기획평가원 (No. 2022-0-00704, No. 2021-0-00260)의 지원을 받아 수행된 연구임.

### 참고 문헌

- [1] Z. Li *et al.*, "Non-Orthogonal Broadcast and Unicast Joint Transmission for Multibeam Satellite System", *IEEE Transaction on Broadcasting*, vol. 69, no. 3, pp. 647-660, 2023.
- [2] J. Park *et al.*, "Rate-Splitting Multiple Access for Downlink MIMO: A Generalized Power Iteration Approach", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 3, pp. 1588-1603, 2022..