

네트워크 내 사용자 간에 상이하게 요구되는 트래픽 충족을 위한 전송률 분할 다중접속기술 기반 전송률 매칭 기법

성재협, **이주환, *박주하, *신원재

아주대학교 AI 융합네트워크학과, *아주대학교 전자공학과, **서울대학교 전기·정보공학부
john12234@ajou.ac.kr, **jhlee@cml.snu.ac.kr, *qkrwngk8471@ajou.ac.kr, *wjshin@ajou.ac.kr

Rate-Matching Precoder Design Based on Rate-Splitting Multiple Access for Heterogeneous Traffic Demands

Jaehyup Seong, **Juhwan Lee, *Juha Park, and *Wonjae Shin

Department of AI Convergence Network, Ajou Univ.,

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

**Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National Univ.

요 약

최근 무선 네트워크의 주요 트래픽이 모바일 음성에서 멀티미디어 모바일 데이터로 변화함에 따라, 네트워크 내 사용자 간에 요구되는 전송률은 서로 상이한 특징을 보인다 [1]. 하지만, 이러한 사용자간 요구되는 전송량의 상이성은 네트워크 자체의 성능을 증가시키기 위한 합-전송률 최대화 및 최소 전송률 최대화와 같은 기존의 문제로는 해결하기 어렵다 [2]. 본 논문에서는 이를 극복하기 위한 전송률 분할 다중접속 기반의 전송률 매칭 기법을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 성능을 검증한다.

I. 연구배경 및 목적

최근 무선 셀룰러 네트워크의 주요 트래픽이 모바일 음성에서 멀티미디어 데이터로 변화함에 따라, 사용자 간에 요구되는 전송률은 서로 상이하다는 특징이 존재한다 [1]. 이러한 서로 다른 요구 전송률을 충족시키기 위해, 기지국은 각각의 사용자로부터 요구되는 전송률을 전달받고, 전달받은 요구 전송률에 따라 프리코더를 디자인하여 네트워크 내 사용자들에게 서비스를 제공해야 한다. 그러나 이는, 네트워크 자체의 성능 및 형평성을 증가시키기 위한 기존의 합-전송률 최대화 및 최소 전송률 최대화 등의 문제로는 해결하기 어렵다 [2]. 본 논문에서는 네트워크 내 사용자 간에 서로 다르게 요구되는 전송률을 충족시킴으로써 보다 유연하고 안정적인 무선 셀룰러 네트워크를 구축하기 위해, 전송률 분할 다중접속기술(Rate-Splitting Multiple Access, RSMA)을 이용한 전송률 매칭 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 우수한 성능을 확인한다.

II. 시스템 모델 및 최적화 문제

본 논문에서는 N_t 개의 송신안테나를 가진 기지국이 단일 수신안테나를 가지는 K 명의 사용자들에게 서비스를 제공하는 다중입력 단일출력 시스템에서 사용자와 기지국 모두 부정확한 채널 상태 정보를 알고 있는 상황을 고려하였다. 반면에, 모든 사용자들의 요구 전송률은 기지국이 정확하게 알고 있다고 가정하였다.

기지국에서는 그림 1과 같이 서로 다른 전송률을 요구하는 사용자들에게 전송할 메시지를 각각 공유 메시지와 개인 메시지로 분할 한 후 모든 공유메시지는 1개로 합쳐 모든 사용자들이 공유하는 코드북을 사용하여 1개의 공유 데이터 스트림 s_c 로 인코딩한다. 반면에 분할된 각각의 개인 메시지는 대응되는 사용자만이 가지고 있는 코드북을 사용하여 K 개의 개인 데이터 스트림 s_1, \dots, s_K 로 인코딩한다. 이후 기지국에서는 공유 프리코딩 벡터 \mathbf{p}_c 와 개인 프리코딩 벡터 \mathbf{p}_k 를 이용하여 송신하고자 하는

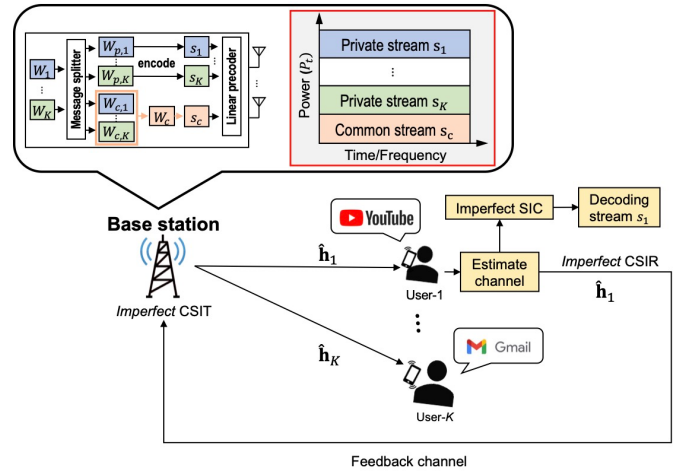


그림 1. 네트워크 내 사용자 간 서로 다른 요구 전송률을 가지는 경우의 제안하는 시스템 모델

데이터를 $\mathbf{x} = \mathbf{p}_c s_c + \sum_{j=1}^K \mathbf{p}_j s_j$ 와 같이 중첩시킨 뒤, 채널 \mathbf{h}_k 를 통해

송신한다. 이때 k 번째 사용자로부터 수신된 신호 y_k 는 $y_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{x} + n$ 와 같이 나타내어지며, 위 식에서 n 은 $n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_n^2)$ 의 확률 분포를 띄는 잡음이다. 이후 수신단에서는 수신된 신호로부터 공유 데이터 스트림을 우선적으로 디코딩 한 후 디코딩 된 공유 메시지 중 자신에게 해당하는 메시지를 추출한다. 이후 순차적 간섭제어(Successive Interference Cancellation, SIC)를 통해 수신된 신호에서 공유 데이터 스트림을 제거한다. 이후 사용자는 다른 사용자들의 개인 메시지에 의한 간섭을 잡음으로 처리하여, 개인 메시지를 디코딩 한다. 일련의 과정에서 모든 사용자는 부정확한 채널 상태정보를 알고 있다고 가정하였으므로, 사용자는

불완전한 SIC를 통하여 공유 데이터 스트림을 제거한다. 따라서 k 번째 사용자의 공유 메시지와 개인 메시지의 달성 가능한 전송률은 각각

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

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

와 같이 표현된다 [2]. 식 (1), (2)에서 $\hat{\mathbf{h}}_k$ 는 부정확한 채널 상태정보로써 $\hat{\mathbf{h}}_k = \mathbf{h}_k - \mathbf{e}_k$ 와 같이 나타내어지며 \mathbf{e}_k 는 채널 추정 에러 벡터이다. 이때 공유 데이터 스트림은 모든 사용자가 디코딩 할 수 있어야 하므로 $\sum_{j=1}^K C_j \leq R_{c,k}$ 를 만족해야 하며, C_k 는 k 번째 사용자에게 할당 된 공유 전송률로써 이는 0보다 크거나 같아야 한다.

따라서, 네트워크 내에서 상이하게 요구되는 트래픽을 충족시키는 문제는

$$\begin{aligned} P_1 : \min_{\mathbf{p}, \mathbf{c}} & \sum_{j=1}^K |R_{target,j} - R_j|^2 \\ \text{s.t.} \quad & R_{c,k} \geq \sum_{j=1}^K C_j, \\ & C_k \geq 0, \\ & \mathbf{p}^H \mathbf{p} \leq P_t. \end{aligned}$$

와 같은 최적화 문제로 공식화 될 수 있다. P_1 에서 \mathbf{p} 와 \mathbf{c} 는 모든 프리코딩 벡터로 구성된 벡터와 각 사용자에게 할당된 공유 전송률로 구성된 벡터로써 각각 $\mathbf{p} = [\mathbf{p}_c^H, \mathbf{p}_1^H, \dots, \mathbf{p}_K^H]^H$, $\mathbf{c} = [C_1, \dots, C_K]$ 와 같이 나타내어진다. 또한 P_t 는 기지국이 사용 가능한 총 송신전력이다. R_k 는 k 번째 사용자의 달성 가능한 합계 전송률로써 $R_k = C_k + R_{p,k}$ 와 같이 표현되고, $R_{target,k}$ 는 k 번째 사용자의 요구 전송률로써 임의의 상수이며 단위는 bit/sec/Hz이다. 하지만, 이렇게 공식화된 최적화 문제 P_1 은 non-convex한 문제로써 최적의 해를 바로 구하는 것은 매우 어렵다. 이를 해결하기 위해, P_1 은 successive convex approximation (SCA)을 사용하여 convex한 문제로 재구성 될 수 있으며, CVX toolbox를 이용하여 재구성 된 문제의 최적 해를 구할 수 있다 [3].

III. 실험결과

시뮬레이션을 위해 기지국에서 4개의 송신안테나를 사용하여 단일 수신 안테나가 장착된 2명의 사용자를 서비스한다고 가정하였다. 또한 기지국과 사용자간의 채널 \mathbf{h}_k 는 $\mathbf{h}_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_h^2)$ 의 동일하고 독립적인 분포를 따르는 Rayleigh fading channel로 가정하였으며 σ_h^2 은 1로 가정하였다. 아울러, 채널 추정 에러 벡터 \mathbf{e}_k 는 $\mathbf{e}_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_e^2)$ 인 동일하고 독립적인

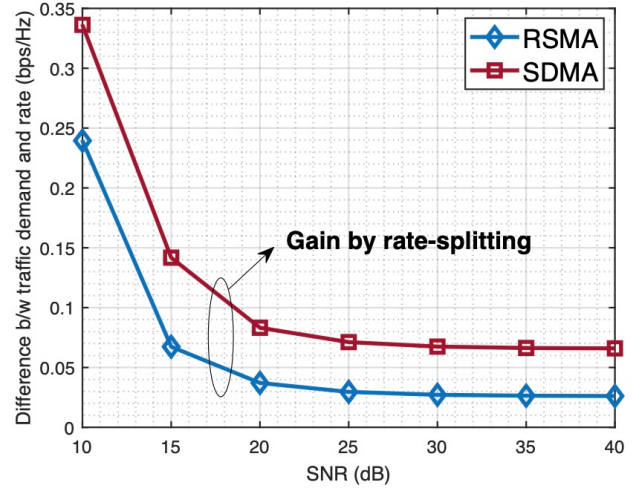


그림 2. 송신전력에 따른 $\frac{\sum_{k=1}^K |R_{target,k} - R_k|}{K}$ 값의 비교

확률 분포를 따른다고 가정하였으며, σ_e^2 은 0.1로 가정하였다. 잡음 전력 σ_n^2 은 1로 가정하였다. 그림 2는 사용자의 요구 전송률이 각각 4 bit/sec/Hz, 2 bit/sec/Hz일때 RSMA와 공간분할 다중접속기술(Spatial Division Multiple Access, SDMA)을 사용하여, 각각의 요구 전송률과 제공된 전송률 간 차이의 평균값을 비교한 결과이다. 실험결과를 통해 RSMA가 SDMA에 비해 동일 송신전력 대비 사용자로부터 요구되는 전송률을 더 잘 충족시키고 있음을 알 수 있으며, 이는 RSMA를 사용하였을 때, 기지국에서 전송하고자 하는 메시지를 공유 메시지와 개인 메시지로 분할하는 비율에 따라 수신단에서 간섭 신호의 일부를 디코딩하고 일부는 잡음으로 처리하여, SDMA에 비해 유연한 간섭제어가 가능하기 때문이다.

IV. 결론

본 논문은 네트워크 내 사용자 간에 서로 다른 트래픽 요구를 지원하기 위한 전송률 매칭 기법을 제안하였으며, 시뮬레이션을 통해 RSMA가 SDMA에 비해 동일 송신전력 대비 우수한 성능을 가짐을 확인하였다. 향후, 제안하는 기술인 전송률 매칭 기법이 서비스하는 지역에 따라 요구되는 전송률이 매우 상이한 위성통신 시스템이나 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)등을 활용한 공중통신 시스템에 활용되기를 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (No.2022R1A2C4002065, No.2021R1A4A1030775)과 정보통신기획평가원(No.2022-0-00704, No.2021-0-00467)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] Y. Zhong, X. Ge, H. H. Yang, T. Han, and Q. Li, "Traffic matching in 5G ultra-dense networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 8, pp. 100-105, 2018.
- [2] 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*, 2022.
- [3] M. Grant and S. Boyd. CVX: Matlab Software for Disciplined Convex version 2.2. <http://cvxr.com/cvx.2020>.