

전송률 분할 다중접속기술 기반 다중사용자 전송률 매칭 기법

성 재 협*, 이 주 환*, 박 주 하**, 신 원 재^o

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

Jaehyup Seong*, Juhwan Lee*, Juha Park**, Wonjae Shin^o

요 약

최근 무선 네트워크의 주요 트래픽이 모바일 음성에서 멀티미디어 모바일 데이터로 변화함에 따라, 네트워크 내 사용자 간에 요구되는 전송률은 서로 상이한 특징을 보인다. 또한, 기지국이 사용할 수 있는 송신전력 및 시간 주파수 자원은 한정되어 있기 때문에, 안정적인 무선 셀룰러 네트워크의 구축을 위해서는 사용할 수 있는 자원을 효율적으로 사용하여 네트워크 내 모든 사용자의 요구 전송률을 충족하여야만 한다. 하지만, 이러한 사용자 간 요구되는 전송률의 상이성은 네트워크 자체의 성능을 증가시키기 위한 합-전송률 최대화 및 최소-전송률 최대화와 같은 기존의 문제로는 해결하기 어렵다. 본 논문에서는 이를 극복하기 위해 사용자들의 요구 전송률과 각 사용자에게 제공되는 전송률의 차이를 최소화 할 수 있는 전송률 분할 다중접속 기반의 전송률 매칭 기법을 제안한다. 뿐만 아니라, 이를 위한 non-convex 최적화 문제를 successive convex approximation을 통해 convex 최적화 문제로 재구성한 뒤 최적값에 근사한 해를 효율적으로 구한다. 이를 기반으로, 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 기법인 전송률 분할 다중접속 기반 전송률 매칭 기법이 사용자들의 요구 전송률 충족 측면에서 기존의 다른 기법들에 비해 우수한 성능을 보임을 확인한다.

Key Words : Rate-matching, Rate-splitting multiple access, Traffic demands

ABSTRACT

With the changes in main traffic of wireless communications from mobile voice to mobile multimedia data by the evolution of high data rate wireless applications, the traffic demands of users have become different from each other. Therefore, it is indispensable to satisfy such traffic demands with limited resources such as transmit power and time/frequency. However, existing technologies, namely sum-rate maximization and max-min fairness which only consider the improvement of the quality of the networks, cannot solve the individual requirements of users. To tackle this, in this paper, we propose a novel rate-matching framework using rate-splitting multiple access (RSMA) that minimizes the difference between the traffic demands and offered rate. Moreover, to handle the non-convexity of the problem, we employ a successive convex approximation to convert the problem to convex and derive the suboptimal solution efficiently. Numerical results show the superiority of the proposed scheme over the conventional schemes in terms of fulfillment of traffic demands.

* 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.

• First Author : Ajou University, Department of Artificial Intelligence Convergence Network, john12234@ajou.ac.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : Ajou University, Department of Electrical and Computer Engineering, wjshin@ajou.ac.kr, 중신회원

* Seoul National University, Department of Electrical and Computer Engineering, jhlee@cml.snu.ac.kr, 학생회원

** Ajou University, Department of Electrical and Computer Engineering, qkrwngk8471@ajou.ac.kr, 학생회원

논문번호 : 202302-030-A-RU, Received February 21, 2023; Revised March 22, 2023; Accepted March 22, 2023

I. 연구 배경 및 목적

최근 무선 셀룰러 네트워크의 주요 트래픽이 모바일 음성에서 멀티미디어 데이터로 변화함에 따라, 네트워크 내 다수의 사용자 간에 요구되는 전송률은 서로 상이하다는 특징이 존재한다¹¹. 또한, 기지국이 사용할 수 있는 송신전력 및 주파수/시간 자원은 한정되어 있기 때문에, 기지국은 사용할 수 있는 자원을 효율적으로 사용하여 서로 다른 요구 전송률들을 충족시켜야 한다¹¹. 이처럼 제한된 자원을 사용해서 다수의 사용자에게 서비스를 제공하기 위해서는 다중 사용자 다중입력 다중출력(Multi-User Multiple-Input Multiple-Output, MU-MIMO) 시스템의 사용이 필수적이다. 이때, 다수의 사용자에게 동시에 서비스를 제공하는 다중 사용자 다중입력 다중출력 시스템의 특성상 다수의 사용자 간의 신호 간섭은 필연적으로 발생하며, 이를 효과적으로 제어하기 위해서는 기지국에서 정확한 채널 상태정보(Channel State Information, CSI)를 알고 있어야 한다. 하지만 시간에 따라 급변하는 채널의 구성요소, 사용자의 이동성 등으로 인해 기지국 측에서 사용자로부터 정확한 채널 상태정보를 피드백 받는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 또한, 사용자 측에서 발생 되는 채널 추정오류로 인해 사용자 측에서조차 정확한 채널 상태정보를 얻는 것은 매우 어렵다.

이러한 제한된 조건 속에서 사용자 간에 발생하는 신호 간섭의 제어를 위해, 부정확한 채널 상태정보만을 가지고도 다양한 네트워크 환경에서 신뢰성 있는 서비스를 제공할 수 있는 전송률 분할 다중접속기술(Rate-Splitting Multiple Access, RSMA)은 최근 학계와 산업체에서 상당한 주목을 받고 있다¹². 또한, 전송률 분할 다중접속기술은 부정확한 채널 상태정보에 강인한 성질을 보일 뿐만 아니라 높은 주파수 효율성과 에너지 효율성을 보인다는 장점이 존재한다¹³. 뿐만 아니라, 전송률 분할 다중접속기술은 기존의 다중접속기술인 공간 분할 다중접속기술(Spatial Division Multiple Access, SDMA), 비-직교 다중접속기술(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), 그리고 멀티캐스팅(Multicasting)을 특별한 경우로써 모두 포함하며, 기존의 다중접속기술들에 비해 우수한 성능을 보임이 입증되었다¹⁴.

이와 같은 전송률 분할 다중접속기술의 다양한 장점들을 기반으로 다양한 채널 환경에서 전송률 분할 다중접속기술을 사용하여 합-전송률 최대화(sum-rate maximization) 및 최소-전송률 최대화(max-min

fairness) 등을 위한 연구들이 활발히 수행되었으며 실험결과를 통해 그 우수한 성능이 입증되었다¹⁵. 그러나 네트워크 내 상이하게 요구되는 다수 사용자의 요구 전송률을 충족시키기 위해서는 사용자들의 요구 전송률에 따라 프리코딩 벡터를 디자인하여 사용자들에게 서비스를 제공해야 하는데, 이는 네트워크 자체의 성능 및 형평성을 증가시키기 위한 기존의 기술인 합-전송률 최대화 및 최소-전송률 최대화로는 해결하기 어렵다.

본 논문에서는 네트워크 내 사용자 간에 서로 다르게 요구되는 전송률을 충족시킴으로써 더욱 유연하고 안정적인 무선 셀룰러 네트워크를 구축하기 위해, 전송률 분할 다중접속기술 기반의 전송률 매칭(Rate-Matching) 기법을 제안하고 시뮬레이션 결과를 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 상태정보를 알고 있는 상황을 고려하였다. 반면에, 모든 사용자들의 요구 전송률은 기지국이 정확하게 알고 있다고 가정하였다.

기지국에서는 그림 1과 같이 서로 다른 전송량을 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 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 $n \sim CN(0, \sigma_n^2)$ 의 확률 분포를 띄는 잡음이다. 이후 수신단에서는 수신된 신호로부터 공유 데이터 스트림을 우선적으로 디코딩 한 후 디코딩된

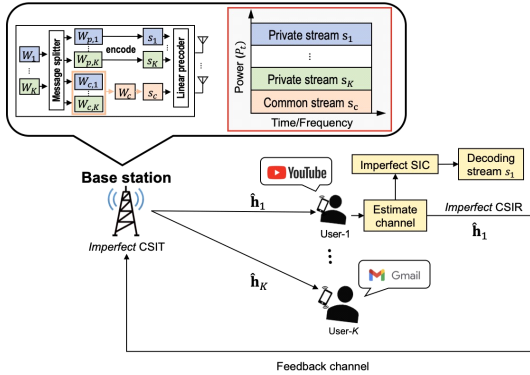


그림 1. 네트워크 내 사용자 간 서로 다른 요구 전송률을 가지는 경우의 제안하는 시스템 모델
 Fig. 1. System model of proposed scheme when each user in networks requires the different traffic demands

공유 메시지 중 자신에게 해당하는 메시지를 추출한다. 이후 순차적 간섭제어(Successive Interference Cancellation, SIC)를 통해 수신한 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 가정 하였으므로, 사용자는 불완전한 SIC를 통하여 공유 데이터 스트림을 제거한다. 따라서 k 번째 사용자의 공유 메시지와 개인 메시지의 달성 가능한 전송률은 각각

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

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

와 같이 표현된다⁷⁾. 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. 또한, L 은 공유 메시지와 개인 메시지에 대한 인덱스로 구성된 집합으로써 $L = \{c, 1, \dots, K\}$ 와 같이 표현된다. 이때 공유 데이터 스트림은 모든 사용자가 디코딩 할 수 있

어야 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 충족시키기 위한 문제는

$$P_1 : \min_{\mathbf{p}, \mathbf{c}} \sum_{j=1}^K |R_{\text{target},j} - R_j|^2 \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad R_{c,k} \geq \sum_{j=1}^K C_j, \quad (4)$$

$$C_k \geq 0, \quad (5)$$

$$\mathbf{p}^H \mathbf{p} \leq P_t. \quad (6)$$

와 같은 최적화 문제로 공식화 될 수 있다. P_1 의 \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 표현된다. 또한 P_t 는 기지국이 사용 가능한 총 송신 전력이다. R_k 는 k 번째 사용자의 달성 가능한 합계 전송률로써 $R_k = C_k + R_{p,k}$ 와 같이 표현되고, $R_{\text{target},k}$ 는 k 번째 사용자의 요구 전송률로써 임의의 상수이며 단위는 bit/sec/Hz이다. 하지만, P_1 은 non-convex한 문제로써 최적의 해를 바로 구하는 것은 매우 어렵다. 이를 해결하기 위해, P_1 은 III장에서 successive convex approximation (SCA)을 통해 convex한 문제로 재구성 된다⁸⁾.

III. 제안하는 전송률 매칭 기법

P_1 을 convex한 문제로 변환하기 위해 개인, 합계 전송률에 대한 대체변수 $\alpha_{p,k}$ 와 q_k 를 추가하여 이를

$$P_2 : \min_{\mathbf{p}, \mathbf{c}, \alpha_p, \mathbf{q}} \|\mathbf{r}_{\text{target}} - \mathbf{q}\|^2 \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \quad R_{p,k} \geq \alpha_{p,k}, \quad \alpha_{p,k} \geq 0, \quad (8)$$

$$C_k + \alpha_{p,k} \geq q_k, \quad q_k \geq 0, \quad (9)$$

$$(4), (5), (6)$$

와 같이 P_2 로 재구성할 수 있고 (7)의 $\mathbf{r}_{\text{target}}$, \mathbf{q} , α_p 는 각각 $\mathbf{r}_{\text{target}} = [R_{\text{target},1}, \dots, R_{\text{target},K}]^T$, $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_K]^T$, $\alpha_p = [\alpha_1, \dots, \alpha_K]^T$ 이다. 또한, $R_k = C_k + R_{p,k}$ 로 인해 P_2 는 P_1 을 보존한다. 하지만, P_2 는 전송률 제약조건 (4), (8)로 인해 여전히 non-convex한 문제이다. 이를 해결하기 위해 공유, 개인 메시지 각각에 대한 signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR)인 $\gamma_{c,k}$, $\gamma_{p,k}$ 에 대한 대체변수 $a_{c,k}$, $b_{p,k}$ 를 추가하여 P_2 를

$$P_3 : \min_{\mathbf{p}_c, \mathbf{a}_c, \mathbf{b}_p} \|\mathbf{r}_{\text{target}} - \mathbf{q}\|^2 \quad (10)$$

$$\text{s.t. } \log_2(1 + a_{c,k}) \geq \sum_{j=1}^K C_j, \quad (11)$$

$$\gamma_{c,k} \geq a_{c,k}, \quad a_{c,k} \geq 0, \quad (12)$$

$$\log_2(1 + b_{p,k}) \geq \alpha_{p,k}, \quad \alpha_{p,k} \geq 0, \quad (13)$$

$$\gamma_{p,k} \geq b_{p,k}, \quad b_{p,k} \geq 0, \quad (14)$$

$$(5), (6), (9)$$

와 같이 재구성 할 수 있고 추가된 제약조건인 (12), (14)의 첫 번째 식에 의해 P_3 는 P_2 를 보존한다. 이때, (10)의 \mathbf{a}_c , \mathbf{b}_p 는 각각 $\mathbf{a}_c = [a_{c,1}, \dots, a_{c,K}]^T$, $\mathbf{b}_p = [b_{p,1}, \dots, b_{p,K}]^T$ 이다. 하지만, P_3 또한 (12), (14)의 첫 번째 식으로 인하여 여전히 non-convex한 문제이다. 따라서, 이를 재구성하기 위해 (12)의 첫 번째 식을 전개하면

$$\frac{|\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{p}_c|^2}{a_{c,k}} \geq \sum_{j=1}^K |\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{p}_j|^2 + \sum_{j \in L} \mathbb{E}[|\mathbf{e}_k^H \mathbf{p}_j|^2] + \sigma_n^2 \quad (15)$$

와 같이 나타내어지며, (15)의 좌변에 있는 식인

$$\frac{|\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{p}_c|^2}{a_{c,k}}$$

는 quadratic-over-linear 형태로 $[\mathbf{p}_c; a_{c,k}]$

에 대한 convex 함수이다. 이후 $\frac{|\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{p}_c|^2}{a_{c,k}}$ 를

$f_1(\mathbf{p}_c, a_{c,k}) = \frac{|\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{p}_c|^2}{a_{c,k}}$ 와 같이 정의한 뒤 1차 테일러 근사를 이용하여 이를 affine 함수로 근사하면

$$\hat{f}_1(\mathbf{p}_c^{[n]}, a_{c,k}^{[n]}) = \frac{2\text{Re}[\mathbf{p}_c^{[n]H} \hat{\mathbf{h}}_k \hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{p}_c^{[n]}]}{a_{c,k}^{[n]}} - \frac{\mathbf{p}_c^{[n]H} \hat{\mathbf{h}}_k \hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{p}_c^{[n]}}{(a_{c,k}^{[n]})^2} a_{c,k}^{[n]} \quad (16)$$

로 나타낼 수 있다. (16)에서 n 은 n 번째 SCA iteration을 의미한다. (16)에 따라 제약조건 (12)는

$$\begin{aligned} & \hat{f}_1(\mathbf{p}_c^{[n]}, a_{c,k}^{[n]}) \\ & \geq \sum_{j=1}^K |\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{p}_j|^2 + \sum_{j \in L} \mathbb{E}[|\mathbf{e}_k^H \mathbf{p}_j|^2] + \sigma_n^2 \end{aligned} \quad (17)$$

와 같이 근사 될 수 있으며 이는 convex 제약조건이다. 여기서 $f_1(\mathbf{p}_c, a_{c,k})$ 가 convex 함수이므로 근사된 (17)은 first-order condition에 의해 제약조건 (12)의 첫 번째 식을 보존한다. 동일한 방식으로 (14)의 첫 번째 식을 전개하면

$$\begin{aligned} & \frac{|\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{p}_k|^2}{b_{p,k}} \\ & \geq \sum_{j=1, j \neq k}^K |\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{p}_j|^2 + \sum_{j \in L} \mathbb{E}[|\mathbf{e}_k^H \mathbf{p}_j|^2] + \sigma_n^2 \end{aligned} \quad (18)$$

와 같이 나타내어지며, (18)의 좌변에 있는 식인

$$\frac{|\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{p}_k|^2}{b_{p,k}}$$

또한 quadratic-over-linear 형태이기 때문

에 $[\mathbf{p}_k; b_{p,k}]$ 에 대한 convex 함수이다. 이후 이를

$f_2(\mathbf{p}_k, b_{p,k}) = \frac{|\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{p}_k|^2}{b_{p,k}}$ 로 정의한 뒤 1차 테일러 근사를 이용하여 affine 함수로 근사하면 제약조건 (18)을

$$\begin{aligned} & \hat{f}_2(\mathbf{p}_k^{[n]}, b_{p,k}^{[n]}) \\ & \geq \sum_{j=1, j \neq k}^K |\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{p}_j|^2 + \sum_{j \in L} \mathbb{E}[|\mathbf{e}_k^H \mathbf{p}_j|^2] + \sigma_n^2 \end{aligned} \quad (19)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, 이 역시 $f_2(\mathbf{p}_k, b_{p,k})$ 가 convex 함수이기 때문에 first-order condition에 의해 근사된 제약조건 (19)는 제약조건 (14)의 첫 번째 식을 보존한다.

따라서 근사된 P_3 는 다음과 같이

$$P_4 : \min_{\mathbf{p}, \mathbf{c}, \alpha_p, \mathbf{q}, \mathbf{a}_c, \mathbf{b}_p} \|\mathbf{r}_{\text{target}} - \mathbf{q}\|^2 \quad (20)$$

$$\text{s.t. (5), (6), (9), (11), (13), (17),} \quad (19)$$

$$a_{c,k} \geq 0, \quad b_{p,k} \geq 0 \quad (21)$$

P_4 로 재구성될 수 있으며, 제약조건 (17), (19)로 인해 재구성된 문제 P_4 는 P_3 를 보존한다.

이렇게 재구성된 P_4 는 convex한 문제이며 CVX toolbox를 이용하여 풀 수 있지만, 제약조건 (11), (13)의 log 함수로 이루어진 식은 계산 복잡도가 높은 non-linear convex program에 속한다. 이러한 log 함수로 이루어진 제약조건들을 낮은 계산 복잡도로 더욱 효율적으로 해결하기 위해 이는 second-order cone (SOC) 제약조건으로 근사될 수 있다^[8]. 이를 바탕으로 제약조건 (11)의 첫 번째 식은

$$a_{c,k} - \sum_{j=1}^K C_j \ln 2 + v_{c,k}^{[n]} \geq \left\| \left[a_{c,k} + \sum_{j=1}^K C_j \ln 2 - v_{c,k}^{[n]}; 2\sqrt{u_{c,k}^{[n]}} \right] \right\|_2 \quad (22)$$

와 같이 재구성될 수 있으며, (22)에서 정의된 $v_{c,k}^{[n]}$ 와

$$u_{c,k}^{[n]} \text{는 각각 } v_{c,k}^{[n]} = \frac{a_{c,k}^{[n]}}{a_{c,k}^{[n]} + 1} + \ln(a_{c,k}^{[n]} + 1),$$

$$u_{c,k}^{[n]} = \frac{(a_{c,k}^{[n]})^2}{a_{c,k}^{[n]} + 1} \text{를 의미한다. 또한, (22)에서 } n \text{은}$$

log 함수로 이루어진 제약조건을 SOC 제약조건으로 근사하는 과정에서의 n 번째 iteration을 의미한다. 동일한 방식으로 (13)의 첫 번째 식은

$$b_{p,k} - \alpha_{p,k} \ln 2 + v_{p,k}^{[n]} \geq \left\| \left[b_{p,k} + \alpha_{p,k} \ln 2 - v_{p,k}^{[n]}; 2\sqrt{u_{p,k}^{[n]}} \right] \right\|_2 \quad (23)$$

와 같이 재구성될 수 있으며, (23)에서 정의된 $v_{p,k}^{[n]}$ 와

$$u_{p,k}^{[n]} \text{는 각각 } v_{p,k}^{[n]} = \frac{b_{p,k}^{[n]}}{b_{p,k}^{[n]} + 1} + \ln(b_{p,k}^{[n]} + 1),$$

$$u_{p,k}^{[n]} = \frac{(b_{p,k}^{[n]})^2}{b_{p,k}^{[n]} + 1} \text{를 의미한다.}$$

결론적으로, 전송률 분할 다중접속기술 기반 전송률 매칭을 위한 최적화 문제는

$$P_5 : \min_{\mathbf{p}, \mathbf{c}, \alpha_p, \mathbf{q}, \mathbf{a}_c, \mathbf{b}_p} \|\mathbf{r}_{\text{target}} - \mathbf{q}\|^2 \quad (24)$$

$$\text{s.t. (5), (6), (9), (17), (19), (22),} \quad (23)$$

$$a_{c,k} \geq 0, \quad b_{p,k} \geq 0, \quad \alpha_{p,k} \geq 0 \quad (25)$$

와 같이 P_5 로 재구성되며, 이는 CVX toolbox를 이용하여 간단하게 최적의 해를 구할 수 있다^[9].

IV. 실험결과

시뮬레이션을 위해 기지국이 4개의 송신안테나를 사용하여 단일 수신 안테나가 장착된 2명의 사용자를 서비스한다고 가정하였다. 또한, 기지국과 사용자 간의 채널 \mathbf{h}_k 는 $\mathbf{h}_k \sim CN(0, \sigma_h^2)$ 의 동일하고 독립적인 분포를 따르는 Rayleigh fading channel로, 이때 σ_h^2 은 1로 가정하였다. 아울러, 채널 추정 에러 벡터 \mathbf{e}_k 는 $\mathbf{e}_k \sim CN(0, \sigma_e^2)$ 인 동일하고 독립적인 확률 분포를 따른다고 가정하였으며, σ_e^2 은 0.1로 가정하였다. 잡음 전력 σ_n^2 은 1로 가정하였다.

그럼 2는 요구 전송률이 각각 2 bps/Hz, 4 bps/Hz 일 때 전송률 분할 다중접속기술과 공간 분할 다중접속기술을 사용하여, 각각의 요구 전송률과 제공된 전송률 간 차이의 평균값을 비교한 결과이다. 이때 공간 분할 다중접속기술에 대한 프리코더는 P_1 에서 공유 메시지에 대한 제약조건인 (4), (5)와 공유 메시지에 대한 최적화 변수 \mathbf{p}_c, \mathbf{c} 를 제거한 뒤 동일한 절차를 거쳐 설계되었다. 실험결과를 통해 전송률 분할 다중접속기술이 공간 분할 다중접속기술에 비해 동일 송신전력 대비 요구 전송률을 더 잘 충족시킴을 알 수 있으며, 이는 전송률 분할 다중접속기술을 사용하였을 때, 기지국에서 전송하고자 하는 메시지를 공유 메시지와 개인 메시지로 분할하는 비율에 따라 수신단에서 간섭 신호의 일부를 디코딩하고 일부는 잡음으로

V. 결 론

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

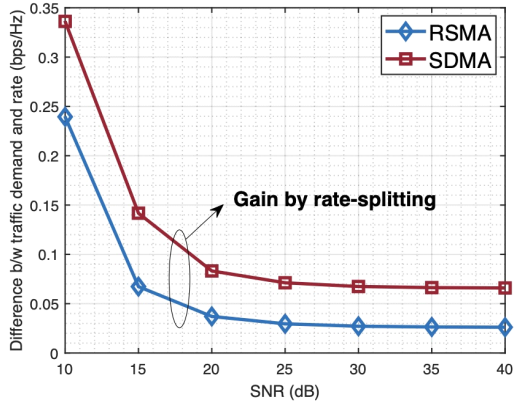


그림 2. 송신전력에 따른 $\frac{\sum_{k=1}^K |R_{target,k} - R_k|}{K}$ 값의 비교

Fig. 2. $\frac{\sum_{k=1}^K |R_{target,k} - R_k|}{K}$ comparison versus SNR

처리하여, 공간 분할 다중접속기술에 비해 유연한 간섭제어가 가능하기 때문이다.

또한, 그림 3은 각 사용자의 요구 전송률이 각각 2 bps/Hz, 4 bps/Hz 이고 송신 signal-to-noise ratio (SNR)가 10 dB 일 때, 전송률 분할 다중접속기술을 사용하여 제안하는 전송률 매칭 기법과 최소-전송률 최대화 기법을 비교한 결과이다. 실험결과를 통해 제안하는 전송률 매칭 기법이 사용 가능한 자원을 더욱 효율적으로 사용하여 최소-전송률 최대화 기법에 비해 unused rate나 unmet rate의 발생을 더욱 적게 발생시킴으로써, 사용자별로 요구되는 전송량을 더욱 잘 충족시키고 있음을 알 수 있다.

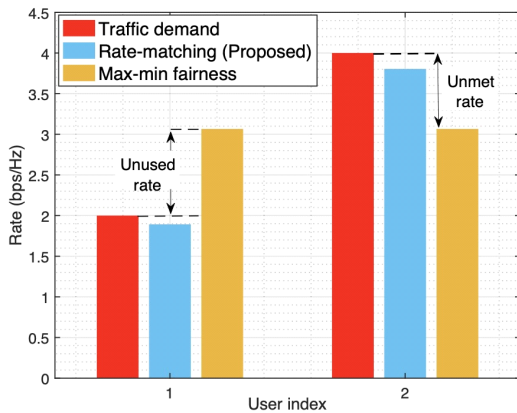


그림 3. SNR=10 dB 일 때의 전송률 분할 다중접속기술을 사용한 전송률 매칭 기법과 최소-전송률 최대화 기법 간의 전송률 비교

Fig. 3. Rate comparison of rate-matching and max-min fairness using RSMA when SNR=10 dB

References

- [1] Y. Zhong, X. Ge, H. H. Yang, T. Han, and Q. Li, "Traffic matching in 5G ultra-dense networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 8, pp.100-105, 2018.
- [2] Y. Mao, B. Clerckx, and V. O. Li, "Rate-splitting multiple access for downlink communication systems: bridging, generalizing, and outperforming SDMA and NOMA," *EURASIP J. Wireless Commun. and Netw.*, vol. 2018, no. 1, pp. 1-54, 2018.
- [3] B. Clerckx, H. Joudeh, C. Hao, M. Dai, and B. Rassouli, "Rate splitting for MIMO wireless networks: A promising phy-layer strategy for LTE evolution," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 98-105, 2016.
- [4] B. Clerckx, Y. Mao, R. Schober, and H. V. Poor, "Rate-splitting unifying SDMA, OMA, NOMA, and multicasting in MISO broadcast channel: A simple two-user rate analysis," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 3, pp. 349-353, 2019.
- [5] J. An, N. Ha, and W. Shin, "Sum-rate maximization of rate-splitting multiple access with zero-forcing beamforming," *J. KICS*, vol. 45, no. 9, pp. 1483-1492, 2020. (<https://doi.org/10.7840/kics.2020.45.9.1483>)
- [6] J. An, O. Dizdar, B. Clerckx, and W. Shin, "Rate-splitting multiple access for multi-antenna broadcast channel with imperfect CSIT and CSIR," *arXiv preprint arXiv:2102.08738*, 2021

- [7] B. Lee and W. Shin, "Max-min fairness precoder design for rate-splitting multiple access: Impact on imperfect channel knowledge," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 1, pp. 1355-1359, Sep. 2022.
- [8] L. Yin and B. Clerckx, "Rate-splitting multiple access for satellite -terrestrial integrated networks: Benefits of coordination and cooperation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 1, pp. 317-332, Jul. 2022.
- [9] M. Grant and S. Boyd, *CVX: Matlab Software for Disciplined Convex version 2.2*. <http://cvxr.com/cvx.2020>.

성 재 협 (Jaehyup Seong)



2022년 2월 : 아주대학교 전자공학과 졸업
2022년 3월~현재 : 아주대학교 AI융합네트워크학과 석사과정
<관심분야> 무선통신, 강화학습, 최적화이론

[ORCID:0009-0000-8405-701X]

이 주 환 (Juhwan Lee)



2020년 2월 : 서울대학교 전기·정보공학부 학사
2020년 3월~현재 : 서울대학교 전기·정보공학부 석박사통합과정
<관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 신호처리

[ORCID:0000-0001-7514-0903]

박 주 하 (Juha Park)



2018년 3월~현재 : 아주대학교 전자공학과 학사과정
<관심분야> 무선신호처리, 최적화 이론
[ORCID:0009-0004-7521-609X]

신 원 재 (Wonjae Shin)



2005년 2월 : 한국과학기술원 전자공학 학사
2007년 8월 : 한국과학기술원 전자공학 석사
2007년 8월~2013년 10월 : 삼성전자 종합기술원 전문연구원

2013년 11월~2014년 2월 : 삼성전자 DMC 연구소 책임연구원

2017년 8월 : 서울대학교 전기·정보공학부 공학박사
2017년 9월~2018년 2월 : Princeton 대학교 박사후연구원

2018년 3월~2021년 2월 : 부산대학교 전자공학과 조교수

2021년 3월~현재 : 아주대학교 전자공학과 조교수/부교수

<관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 머신러닝 및 빅데이터 신호처리

[ORCID:0000-0001-6513-1237]