

다중 사용자 서비스 품질 향상을 위해 전송률 분할 기술을 이용한 최대 최소 공정성 저 복잡도 빔포밍 설계에 관한 연구

김도선, 박정훈, 김동구

연세대학교

{kds1018, jhpark, dkkim}@yonsei.ac.kr

A Study on Low-Complexity Beamforming Design with Max-Min Fairness Using Rate Splitting Strategy for improved Quality of Service in Multi-User Networks

Doseon Kim, Jeonghun Park, Dong Ku Kim

Yonsei University

요약

본 논문은 다중 사용자 다중 안테나 하향 링크 네트워크에서 전송률 분할 기술을 이용해 모든 사용자에게 좋은 서비스 품질을 제공해 주는 저 복잡도 빔포밍 설계 방법을 제안한다. 최대 최소 공정성 문제의 주요 목적은 공통 메시지와 사용자별 개인 메시지를 조절하여 가장 낮은 전송률을 받는 사용자의 전송률을 최대화함으로써 모든 사용자에게 균일한 전송률을 제공하는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최적화 문제를 두 단계로 나눈다. 첫 번째 단계에서는 공통 메시지 부분이 주어진 환경에서 1차 KKT 조건을 이용하여 전송률을 최대화시킬 수 있는 빔포밍 벡터를 찾는다. 두 번째 단계에서는 고정된 빔포밍 벡터에서 모든 사용자가 좋은 전송률을 보장할 수 있도록 공통 메시지 부분을 재할당한다. 이 두 단계를 반복하면서 빔포밍 벡터와 공통 메시지 부분을 공동으로 설계한다. 모의실험을 통해 제안 방법이 기존의 방법들보다 낮은 복잡도를 가짐과 동시에 최소 전송률 측면에서 성능이 우수함을 검증한다.

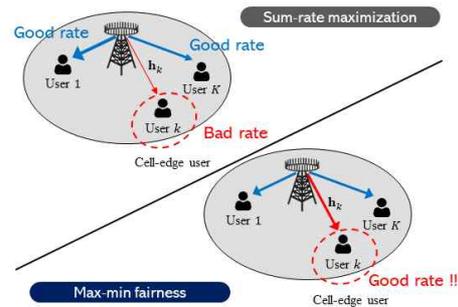
I. 서론

5G 및 6G 네트워크에서 계속되는 목표 중 하나는 많은 무선 사용자들을 연결하여 연결된 모든 사용자가 특정 수준의 서비스 품질을 충족하도록 좋은 전송률을 제공하는 것이다. 이 문제는 최대 최소 공정성 문제로 알려져 있으며 다중 안테나 빔포밍 설계 분야에서 활발히 연구되었다[1].

최근에는 사용자 간 간섭을 완화하여 전송률을 향상시키기 위해 공간 분할 다중 접속 기술과 비직교 다중 접속 기술을 모두 수용하는 전송률 분할 기술이 최대 최소 공정성 문제에 대한 해결 방법으로 연구되고 있다[2]. 전송률 분할 기술은 정보 심볼을 공통 메시지와 개인 메시지로 나누어 전송하는데, 여기서 공통 메시지는 모든 사용자가 디코딩 가능하도록 하고, 개인 메시지는 의도된 사용자만 디코딩 가능하도록 설계한다. 이러한 구조를 활용하여 각 사용자는 공통 메시지를 제거하기 위해 연속 간섭 제거 방식을 사용하여 간섭량을 줄인 다음 개인 메시지를 디코딩 한다. 이를 통해 안 좋은 채널 환경을 겪는 사용자의 경우 공통 메시지를 조절하여 사용자의 전송률을 증가시켜 향상된 서비스 품질을 제공받음으로써 가장 낮은 전송률을 제공받는 사용자의 전송률을 최대화시킬 수 있다.

이러한 이점에도 불구하고 전송률 분할 기술을 활용한 최대 최소 공정성 문제는 모든 사용자에게 대한 최적의 빔포밍 벡터를 공동으로 찾아야 하기 때문에 어렵다. 이전 연구들은 CVX와 같은 최적화 툴박스를 이용해 최적화 문제를 해결했지만, 최적화 툴박스는 매우 복잡도가 높아 일반적으로 실제 하드웨어에서의 구현은 어렵다[3].

본 논문에서는 하향 링크 다중 사용자 구조에서 전송률 분할 기술을 이용하여 최적화 툴박스에 의존하지 않고 최적화 문제를 해결하기 위한 새로운 빔포밍 설계 방법을 제안한다. 구체적으로 1차 KKT 조건을 이용하



[그림 1] 시스템 모델

여 최적의 빔포밍 벡터를 찾은 후, 고정된 빔포밍 벡터에서 모든 사용자가 좋은 전송률을 보장받을 수 있도록 공통 메시지 부분을 재할당한다. 모의 실험을 통해 이 두 단계를 반복하는 횟수를 증가시킴으로써 기존 방법에 비해 최소 전송률 측면에서 성능이 향상됨을 검증한다.

II. 본론

본 논문에서는 [그림 1]과 같이 한 개의 기지국과 다중 사용자로 구성된 하향링크 시스템을 고려한다. 기지국은 N 개의 안테나를 가지고 있으며 K 명의 단일 안테나를 갖는 사용자에게 서비스를 제공한다. 1계층 전송률 분할 기술을 이용하여 기지국은 각 사용자에게 공통 메시지 $m_{c,1}, \dots, m_{c,K}$ 와 개인 메시지 $m_{p,1}, \dots, m_{p,K}$ 를 전송한다. 모든 공통 메시지 부분은 공통 메시지 m_c 로 결합한 후 모든 사용자에게 공유된 공동 코드북을 이용하여 공통 스트림 s_c 로 인코딩된다. 개인 메시지 $m_{p,k}$ 는 각 사용자가 독립적으로 개인 코드북을 통해 개인 스트림 $s_{p,k}$ 로 인코딩된다.

공통 스트림과 K 개의 개인 스트림을 빔포밍 벡터와 선형적으로 결합하여 형성한 송신 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{F}\mathbf{s} = \mathbf{f}_c s_c + \sum_{i=1}^K \mathbf{f}_i s_{p,i} \quad (1)$$

수식 (1)에서 $s_c, s_{p,k}$ 는 가우시안 분포를 따르고, $\mathbf{f}_c, \mathbf{f}_i$ 는 각각 공통 스트림과 개인 스트림과 관련된 빔포밍 벡터이다.

기지국과 사용자 k 간의 채널 벡터는 $\mathbf{h}_k \sim CN(0, \mathbf{R}_k)$ 로 정의하고 기하학적 원리 스케터링에 따라 형성된 채널 공분산 행렬 \mathbf{R}_k 를 갖는 채널로 모델링한다. 이를 이용해 사용자 k 에서 수신한 신호는 다음과 같다.

$$y_k = \mathbf{h}_k^H (\mathbf{f}_c s_c + \mathbf{f}_k s_{p,k}) + \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_i s_{p,i} + z_k \quad (2)$$

수식 (2)에서 z_k 는 사용자 k 에 대한 가우시안 잡음을 의미한다.

사용자 k 가 공통 스트림 s_c 를 디코딩 할 수 있는 전송률은 다음과 같다.

$$R_{c,k} = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_c|^2}{\sum_{i=1}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_i|^2 + \sigma^2/P} \right) \quad (3)$$

모든 사용자가 연속 간섭 제거 기법을 사용할 수 있도록 보장하기 위해 공통 스트림의 전송률은 다음과 같이 수식 (3)의 최소값으로 설정해야 한다. 즉, $R_c = \min_k(R_{c,k})$. 사용자 k 는 연속 간섭 제거 기법을 이용해 공통 스트림을 제거한 후에 개인 스트림 $s_{p,k}$ 를 디코딩 하기 위한 전송률은 다음과 같다.

$$R_{p,k} = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_i|^2 + \sigma^2/P} \right) \quad (4)$$

모든 사용자는 공통 스트림에 대한 전송률 부분을 $\sum_{\ell=1}^K C_\ell = R_c$ 와 같이 균일하게 분배 받은 후, 사용자 k 에서의 전송률 합계는 $C_k + R_{p,k}$ 로 표현할 수 있다. 이를 통해, 최소 전송률을 갖는 사용자의 전송률을 최대화시키기 위한 최대 최소 공정성 문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_1 : \max_{\mathbf{F}, \mathbf{c}} & \left[\min_k (C_k + R_{p,k}) \right] \\ s.t. : \min & (R_{c,k}) \geq \sum_{i=1}^K C_i \end{aligned} \quad (5)$$

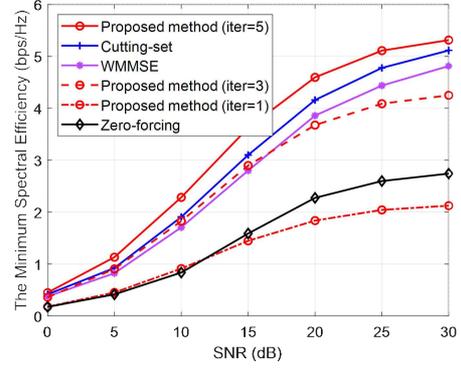
최적화 문제를 풀기 위해 전체 과정을 두 단계로 구성하며, 첫 번째 단계에서는 수식 (5)에서의 최대 최소 공정성 문제를 해결하기 위해 라그랑지안 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\lambda(\bar{\mathbf{f}}) = (C_k + \bar{R}_{p,k}) + \gamma \left(\sum_{i=1}^K C_i - \bar{R}_c \right) \quad (6)$$

수식 (6)에서 γ 는 라그랑지안 상수이다. 수식 (5)의 최대값을 찾기 위해 1차 KKT 조건을 이용하면 최적의 빔포밍 벡터를 찾을 수 있다.

두 번째 단계에서는 1단계에서 찾은 빔포밍 벡터를 고정하고, 워터 필링 기법과 유사한 방식을 사용하여 최소 전송률을 갖는 사용자에게 공통 스트림 전송률 부분 C_i 를 재할당해준다. 구체적으로, 모든 사용자가 동일한 전송률을 제공받도록 모든 사용자의 공통 메시지 부분을 재할당한다. 이와 같은 두 단계로 구성된 알고리즘을 반복하면 모든 사용자가 특정 서비스 품질을 만족하면서, 가장 낮은 전송률을 제공받는 사용자의 전송률을 최대화 시켜줄 수 있는 최적의 빔포밍 벡터와 공통 메시지 부분을 공동으로 설계할 수 있다.

III. 모의실험 성능 결과 및 분석



[그림 2] 반복 횟수에 따른 최소 전송률 성능 비교

모의실험을 통해 본 논문에서 제안한 방법을 이용해 최소 전송률을 갖는 사용자의 전송률을 SNR 증가에 따라 기존 방법과 비교해 보았다. [그림 2]를 통해 제안한 방식이 CVX 툴박스를 사용하는 WMMSE 방법보다 성능이 5% 향상됨을 검증하였다. 반복 횟수를 증가시키면서 비교해 보았을 때, 반복 횟수가 3회 일 때는 기존의 방법과 성능이 유사해지고, 반복 횟수가 5회 이상 되었을 때 기존 방법보다 성능이 향상되는 것을 확인하였다. 결과적으로 본 논문에서 제안한 방법이 낮은 반복 횟수로도 기존 방법에 비해 성능이 향상되는 저 복잡도 설계 기법이라는 것을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 다중 사용자 다중 안테나 하향 링크 네트워크에서 전송률 분할 기술을 이용해 모든 사용자에게 좋은 서비스 품질을 제공해 주는 빔포밍 설계 방법을 제안한다. 최대 최소 공정성 문제를 두 단계로 나누어 첫 번째 단계에서는 최적의 빔포밍 벡터를 찾고, 두 번째 단계에서는 최소 전송률을 갖는 사용자에게 공통 스트림 전송률 부분을 재할당하여 전송률 합계를 증가시킬 수 있도록 하였다. 이를 통해 우리는 기존 방법에 비해 저 복잡도를 가짐과 동시에 최소 전송률 성능이 5~8% 향상됨을 모의실험을 통해 검증하였다. 향후 본 논문에서 다루었던 방법들을 다중 셀로 확장하여 연구할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) Grant through the Ministry of Science and ICT (MSIT), Korea Government, under Grant 2022R1A5A1027646

참고 문헌

- [1] Y. -F. Liu, Y. -H. Dai and Z. -Q. Luo, "Max-Min Fairness Linear Transceiver Design for a Multi-User MIMO Interference Channel," 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC), Kyoto, Japan, 2011, pp. 1-5.
- [2] 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," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 9, no. 3, pp. 349-353, March 2020.
- [3] M. Grant and S. Boyd, "CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.1," <http://cvxr.com/cvx>, Mar. 2014.