

전송률 분할 다중 접속 기술에서 서비스 품질 향상을 위한 최대 최소 공정성 빔포밍 설계에 관한 연구

김도선, 최진석*, 박정훈**, 김동구

연세대학교, *울산과학기술원, **경북대학교

kds1018@yonsei.ac.kr, *jinseokchoi@unist.ac.kr, **jeonghun.park@knu.ac.kr, dkkim@yonsei.ac.kr

A Study on the Max-Min Fairness Beamforming Design for Quality of Service Improvement in Rate-Splitting Multiple Access

Doseon Kim, Jinseok Choi*, Jeonghun Park**, Dong Ku Kim

Yonsei Univ., *Ulsan National Institute of Science and Tech. **Kyungpook National Univ.

요 약

본 논문은 다중 안테나 하향링크 네트워크에서 전송률 분할 다중 접속 기술을 이용해 모든 사용자에게 좋은 서비스 품질을 제공해주는 빔포밍 설계 방법을 제안한다. 최대 최소 공정성 문제의 주요 목표는 공통 메시지와 사용자 별 개인 메시지를 조절하여 모든 사용자에게 균일한 좋은 전송률을 제공하는 것이다. 이 문제를 해결하는 것은 빔포밍 벡터와 공통 메시지 부분에 대한 여러 최적화 변수가 목적 함수에 복잡하게 포함되어 있어 해결하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전체 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 다른 방법보다 최소 전송률 측면에서 성능이 우수함을 검증한다.

I. 서론

유비쿼터스 연결을 달성하기 위해 많은 무선 사용자들을 연결하는 것은 5G 및 6G 네트워크에서 지속적인 목표이다. 이러한 목표에서 한 가지 핵심은 연결된 모든 사용자가 특정 수준의 서비스 품질을 충족하도록 균일하게 좋은 전송률을 제공하는 것이다. 이 문제는 최대 최소 공정성으로 알려져 있으며 다중 안테나 빔포밍 설계 분야에서 활발히 연구되었다[1].

최근에는 공간 분할 다중 접속 기술과 비직교 다중 접속 기술을 모두 사용하는 전송률 분할 다중 접속 기술이 최대 최소 공정성 문제에 대한 해결 방법으로 연구되고 있다[2]. 전송률 분할 다중 접속 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 디코딩한다. 이를 통해 안 좋은 채널 환경을 겪는 사용자의 경우 공통 메시지를 조절하여 사용자의 전송률을 증가시켜 향상된 서비스 품질을 제공 받을 수 있다.

이러한 이점에도 불구하고 전송률 분할 다중 접속 기술을 활용한 최대 최소 공정성 문제는 전송률 향상을 위한 최적의 빔포밍 벡터와 공통 메시지 부분을 공동으로 찾아야 하기 때문에 어렵다. 이전 연구들을 CVX와 같은 최적화 툴박스를 이용해 최적화 문제를 해결했지만, 최적화 툴박스는 매우 복잡하므로 일반적으로 실제 하드웨어에서의 구현은 어렵다[3].

본 논문에서는 전송률 분할 다중 접속 방식을 이용한 최대 최소 공정성 문제에서 최적화 툴박스에 의존하지 않고 최적화 문제를 해결하기 위해 두 단계로 구성된 새로운 최적화 방식을 제안한다. 첫 번째 단계에서는 공

통 메시지 부분이 주어진 조건에서 1차 KKT 조건을 이용해 최적의 빔포밍 벡터를 찾는데 중점을 둔다. 두 번째 단계에서는 고정된 빔포밍 벡터 조건에서 워터 필링 기법과 유사한 방식을 통해 최소 전송률을 갖는 사용자의 전송률을 최대화 할 수 있도록 모든 사용자의 공통 메시지 부분을 재할당한다. 이러한 두 단계를 반복하면서 빔포밍 벡터와 공통 메시지 부분을 공동으로 설계한다. 모의실험 결과를 통해 제안한 방법이 이전 방법에 비해 최소 전송률 측면에서 성능이 향상됨을 검증한다.

II. 본론

본 논문에서는 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 다중 접속 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 사용자에게 공통 메시지는 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.

공동 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 공동 스트림과 개인 스트림과 관련된 빔포밍 벡터이다.

기지국과 사용자 k 간의 채널 벡터는 $\mathbf{h}_k \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{R}_k)$ 로 정의하고 기하학적 원링 스캐터링에 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.

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

모든 사용자는 공통 스트림에 대한 전송률 부분을 $\sum_{\ell=1}^K C_\ell = R_c$ 와 같이 균

일하게 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.

$$\max_{\mathbf{F}, \mathbf{C}} [\min_k (C_k + R_{p,k})] \quad (5)$$

수식 (5)에서의 최대 최소 공정성 문제를 해결하기 위해 두 가지 단계로 나눈다. 첫 번째 단계에서는 $\bar{\mathbf{f}} = [\mathbf{f}_c^T, \mathbf{f}_1^T, \dots, \mathbf{f}_K^T]^T$ 와 같이 빔포밍 벡터의 차원을 높인 후, 수식 (3)과 (4)를 $\bar{\mathbf{f}}$ 에 대해 다음과 같이 정리한다.

$$\bar{R}_{c,k} = \log_2 \left(\frac{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{A}_k \bar{\mathbf{f}}}{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{B}_k \bar{\mathbf{f}}} \right), \bar{R}_{p,k} = \log_2 \left(\frac{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{C}_k \bar{\mathbf{f}}}{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{D}_k \bar{\mathbf{f}}} \right) \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{A}_k, \mathbf{B}_k, \mathbf{C}_k, \mathbf{D}_k$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_k &= \text{blkdiag}[\mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H, \dots, \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H] + \frac{\sigma^2}{P} \mathbf{I}, \\ \mathbf{B}_k &= \mathbf{C}_k - \text{blkdiag}[\mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H, \mathbf{0}, \dots, \mathbf{0}], \\ \mathbf{C}_k &= \text{blkdiag}[\mathbf{0}, \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H, \dots, \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H] + \frac{\sigma^2}{P} \mathbf{I}, \\ \mathbf{D}_k &= \mathbf{A}_k - \text{blkdiag}[\mathbf{0}, \dots, \underbrace{\mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H}_{(k+1)\text{번째행렬}}, \dots, \mathbf{0}]. \end{aligned} \quad (7)$$

최적화 문제 수식 (5)에 수식 (6)을 적용한 후 최소값을 구하기 위해 라그랑지안 함수로 나타내면 다음과 같다.

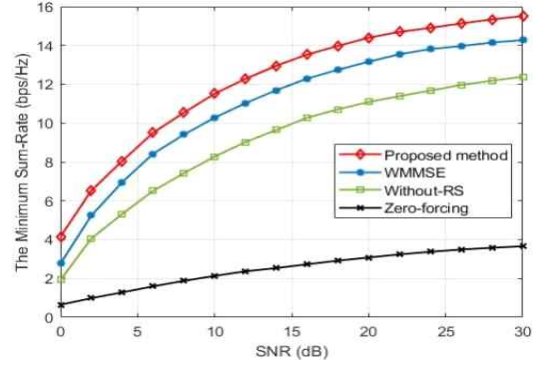
$$\lambda(\bar{\mathbf{f}}) = (C_k + \bar{R}_{p,k}) + \gamma \left(\sum_{\ell=1}^K C_\ell - \bar{R}_c \right) \quad (8)$$

수식 (8)에서 γ 는 라그랑지안 상수이다. 수식 (5)의 최소값을 찾기 위해 1차 KKT 조건을 이용하면 최적의 빔포밍 벡터를 찾을 수 있다.

두 번째 단계에서는 1단계에서 찾은 빔포밍 벡터 $\bar{\mathbf{f}}$ 를 고정하고, 위터 필링 기법과 유사한 방식을 사용하여 최소 전송률을 갖는 사용자에게 공통 스트림 전송률 부분 C_ℓ 을 많이 할당해준다. 구체적으로, 처음에는 사용자 별로 전송률 합계를 오름차순으로 정렬한 후, 최소 전송률 합계를 갖는 사용자에게 두 번째로 적은 전송률 합계를 갖는 사용자의 전송률과 같아지게끔 공통 메시지 부분을 할당한다. 그 후, 세 번째로 적은 전송률 합계를

갖는 사용자의 전송률과 같아지도록 첫 번째와 두 번째 사용자의 공통 스트림 전송률 부분을 할당한다. 이와 같은 방식으로 반복하면 모든 사용자가 동등한 전송률을 할당받아 균일한 서비스 품질을 보장받을 수 있다.

III. 모의실험 성능 결과 및 분석



[그림 1] 제안 방법과 기존 방법 간의 최소 전송률 성능 비교

모의실험을 통해 본 논문에서 제안한 방법을 이용해 최소 전송률을 갖는 사용자의 전송률 합계를 기존 방법과 비교해 보았다. [그림 1]을 통해 제안한 방식이 CVX 툴박스를 사용하는 WMMSE 방법보다 성능이 5% 향상됨을 확인 할 수 있고, 전송률 분할 다중 접속 기법을 사용하는 것이 그렇지 않은 without-RS 방법에 비해 성능이 8% 향상됨을 검증하였다.

III. 결론

본 논문에서는 다중 안테나 하향링크 네트워크에서 전송률 분할 다중 접속 기술을 이용해 모든 사용자에게 좋은 서비스 품질을 제공해주는 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 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

참 고 문 헌

- [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.