

Cell-Free 다중안테나 시스템에서 하향링크 간섭 및 신호 최적화 빔포밍 및 전력할당 방식 연구

김근영, 명정호, 고영조
한국전자통신연구원

kykim12@etri.re.kr, jhmyung@etri.re.kr, koyj@etri.re.kr

Transmit Beamforming and Power Allocation for Interference and Signal Optimization in Cell-Free MIMO Downlink

Keunyoung Kim, Jung Ho Myung, Young-Jo Ko
Electronics and Telecommunications Research Institute

요 약

Cell-free 다중안테나 시스템 하향링크에서 간섭을 최소화하면서 자기 신호를 최대화하는 수신 신호를 최대화하면서 모든 사용자가 동일한 신호대간섭잡음비를 갖도록 하는 빔포밍 방식과 전력할당 방식을 제시하였다. 제시된 방식은 pseudo-inverse 기반 zero-frocing 방식이며, 제시된 방식의 성능 검증을 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 통해, 사용자 수 증가 및 사용자 위치에 상관없이 균일한 성능 제공이 가능한 것을 확인할 수 있다.

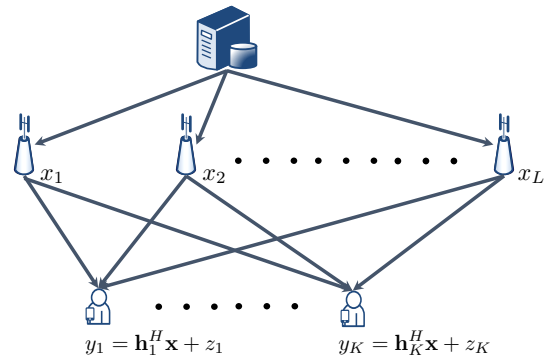
I. 서 론

현재 이동통신시스템은 간섭 회피를 위해 무선 자원을 분할 사용하기 때문에 사용자가 증가할수록 사용자당 전송율을 감소하게 된다. 또한, 기지국을 기반으로 서비스를 제공하기 때문에 셀 경계 사용자에게는 수신신호 세기 감소와 간섭 증가로 인해 사용자 위치에 따른 성능 변화가 발생한다. 사용자 수 증가에 따른 용량 감소 문제를 해결하기 위해서는 사용자가 무선 자원을 공유하고, 간섭 제어를 통해 사용자별 간섭 없이 신호를 전송할 수 있는 자유도 증가가 필요하고, 높은 신호대간섭잡음비를 확보할 수 있는 환경을 통해 자유도 증가를 사용자별 용량 증가로 전환할 수 있어야 한다. 사용자별 위치에 따른 성능 변화를 극복하기 위해서는, 안테나를 촘촘하고 균일하게 배치하여 모든 사용자에게 균일한 채널 환경을 제공해야 하고, 간섭 제어를 통해 균일한 신호대간섭잡음비를 확보할 수 있어야 한다.

Cell-free 다중안테나 시스템은 central processing unit (CPU)를 통해 연결된 지역적으로 분산된 access point (AP)를 배치하여, 송수신기간 거리 단축을 통해 높은 채널 이득을 확보할 수 있고, 송수신점간 협력 신호 처리를 통한 간섭 제어를 통해 모든 사용자에게 균일한 성능 제공이 가능하다 [1]. 본 논문에서는 cell-free 다중안테나 시스템 하향링크에서 사용자 간섭을 최소화하면서 수신신호를 최대화하면서, 모든 사용자가 동일한 신호대간섭잡음비를 제공하기 위한 간섭신호의 최대값을 최소화하는 최적화 문제를 설정하고, 빔포밍 방식과 전력할당 방식으로 zero-forcing 방식을 제시하고, 이에 대한 성능 검증을 수행한다.

II. 본론

하나의 CPU, L개의 AP와 K개의 사용자로 구성된 cell-free 다중안테나 시스템 하향링크는 다음과 같이 표현할 수 있다.



각 AP l 에서는 사용자 k 에게 전송하는 신호 s_k 를 프리코딩한 신호 x_l 를 다음과 같이 구성한다.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 = \sqrt{q_{11}}g_{11}s_1 + \dots + \sqrt{q_{1K}}g_{1K}s_K \\ x_2 = \sqrt{q_{21}}g_{21}s_1 + \dots + \sqrt{q_{2K}}g_{2K}s_K \\ \vdots \\ x_L = \sqrt{q_{L1}}g_{L1}s_1 + \dots + \sqrt{q_{LK}}g_{LK}s_K \end{bmatrix} = \mathbf{V}\mathbf{s} \quad (1)$$

여기서 q_{lk} 는 AP l 에서 사용자 k 에게 할당된 전력, g_{lk} 는 송신 빔포밍 계수이다. 할당된 전력과 빔포밍 계수로 표현된 프리코딩 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \sqrt{q_{11}}g_{11} & \sqrt{q_{12}}g_{12} & \dots & \sqrt{q_{1K}}g_{1K} \\ \sqrt{q_{21}}g_{21} & \sqrt{q_{22}}g_{22} & \dots & \sqrt{q_{2K}}g_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sqrt{q_{L1}}g_{L1} & \sqrt{q_{L2}}g_{L2} & \dots & \sqrt{q_{LK}}g_{LK} \end{bmatrix} \quad (2)$$

빔포밍 계수는 모든 AP와 사용자에 대해, $|g_{lk}|^2=1$ 가 된다. 각 AP에서 전송할 수 있는 최대 송신 전력을 만족하기 위해서는 모든 AP에 대해, $[\mathbf{W}^H]_{ll} \leq q^{\max}$ 를 만족해야 한다.

하향링크에서 간섭을 최소화하고, 수신신호를 최대화하면서, 성능을 균일하게 하는 최적화 문제는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\min_{\mathbf{v}_k} \quad & \max_{k=1,\dots,K} \sum_{i=1, i \neq k} |\mathbf{v}_i^H \mathbf{h}_k|^2 = \mathbf{h}_k^H \mathbf{V}_{-k} \mathbf{V}_{-k}^H \mathbf{h}_k \\
\text{subject to} \quad & |g_{lk}|^2 = 1, \quad \forall k \text{ and } \forall l, \\
& \sum_{k=1}^K q_{lk} = q_l \leq q^{\max}, \quad \forall l.
\end{aligned} \quad (3)$$

여기서 \mathbf{V}_{-k} 는 \mathbf{V} 에서 k 번째 열을 제외한 행렬이다.

일반적으로, \mathbf{v}_k 는 $\mathbf{h}_k^H \mathbf{v}_k$ 가 실수가 되도록 잡을 수 있다. Cell-free 다중안테나 시스템은 AP 수가 사용자 수보다 많기 때문에, 간섭을 완전히 제거할 수 있다. AP의 총 송신 전력이 아닌, AP 별 전력제한이 있는 경우, pseudo-inverse에 기반한 zero-forcing (ZF) 방식이 아닌, generalized inverse에 기반한 수리적 최적화 방법으로 구한 빔포밍 및 전력방식이 최적 방식이 된다 [2]. 이 최적화 문제는 second order cone programming으로 interior point 알고리즘으로 KL 개의 변수를 구하는 볼록 최적화 문제이다. 볼록 최적화 문제를 효율적으로 풀 수 있는 알고리즘이 존재하나, AP의 수 L 이 큰 경우 등에는 복잡도를 무시할 수 없다. 따라서, pseudo-inverse 기반 방식이 최적 방식이 아니지만, 수리적 최적화 없이 해를 구할 수 있고, AP가 많을 경우, 최적해에 근접한 성능을 제시하기 때문에 본 논문에서는 pseudo-inverse에 기반한 빔포밍 방식을 제시한다. AP 별 전력 제한이 있는 경우, ZF 프리코딩 방식은 다음과 같다 [3].

$$\mathbf{V} = \sqrt{s_{\max}^{\text{DL}}} \mathbf{H}(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \quad (4)$$

여기서, AP 별 전력 제한을 만족하기 위해 다음을 만족해야 한다.

$$s_{\max}^{\text{DL}} = \frac{q^{\max}}{\max_l [\mathbf{H}(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H]_{l,l}} \quad (5)$$

이러한 방식의 빔포밍과 전력할당 방식을 사용할 경우, 사용자는 다음과 같은 동일한 신호대간섭잡음비를 얻을 수 있다.

$$\text{SINR}_k^{\text{DL}} = \frac{s_{\max}^{\text{DL}}}{\sigma^2} \quad (6)$$

제시된 빔포밍과 전력할당 방식의 성능 분석을 위해, 120mX50m 공간에 200 개의 AP가 설치하고, 사용자 수가 2개 및 20개인 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 각 사용자는 해당 공간에서 균등분포 하도록 하고, 사용자별 주파수 효율은 몬테카를로 방식으로 평균을 구하였다. 시뮬레이션 결과에서 DL MR은 하향링크에서 수신신호를 최대화하는 방식인 maximum ratio transmission (MRT)을 의미한다.

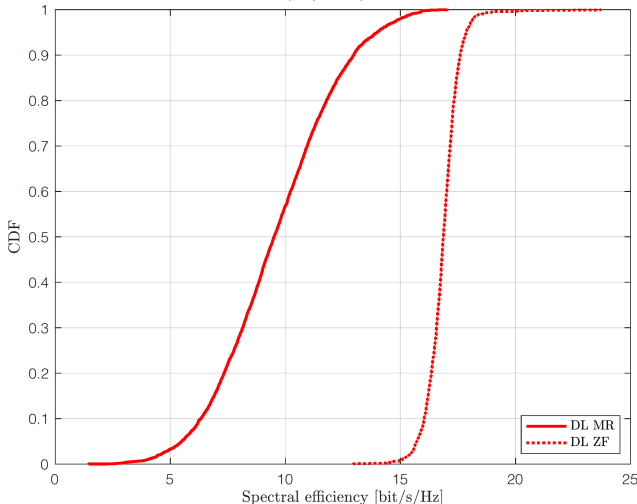


그림 2. 사용자 수가 2명인 경우 주파수 효율

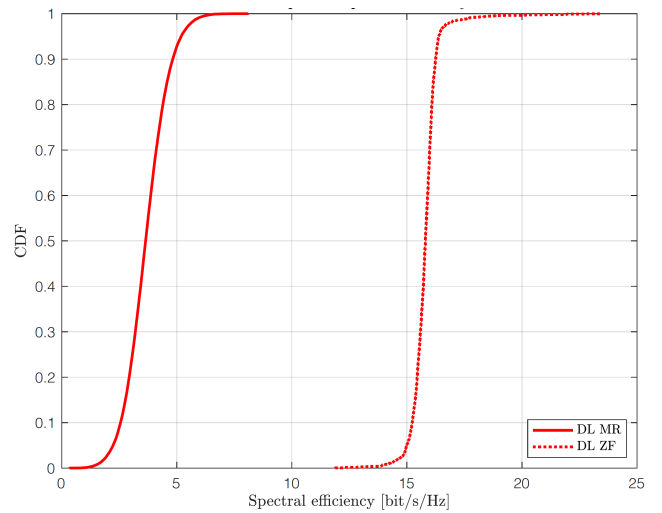


그림 3. 사용자 수가 20명인 경우 주파수 효율

시뮬레이션 결과에서 가파른 기울기는 사용자에게 위치에 상관없이 균일한 성능 제공이 가능하다는 것을 의미한다. 또한, ZF 방식의 경우, 사용자 수가 증가하더라도 거의 비슷한 사용자별 주파수 효율 성능이 나오는 것을 확인할 수 있다. 반면, MRT 방식은 ZF 방식에 비해 기울기가 작고, 사용자 수 증가에 따른 성능 감소가 발생한다.

III. 결론

cell-free 다중안테나 시스템 하향링크에서 pseudo-inverse에 기반한 ZF 빔포밍과 전력할당 방식을 통해, 사용자 위치와 증가와 상관없이 사용자에게 균일한 성능 제공이 가능하다는 것을 제시하였다. 적절한 간섭 제어 방식 없이 각 사용자의 수신신호를 최대화하는 MRT 방식의 경우, 사용자 수가 증가함에 따라 사용자별 주파수 효율 성능이 감소하는 것을 확인할 수 있다.

MRT 방식은 AP 간 채널 정보 공유없이 간단한 방식이라는 장점이 있지만, 성능 향상을 위해서는 적절한 간섭제어 방안이 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2018-0-00218, 초고주파 이동통신 무선백홀 전문연구실)

참고 문헌

- [1] S. Elhoushy, M. Ibrahim, W. Hamouda, "Cell-Free Massive MIMO: A Survey," IEEE Communications Survey & Tutorials, Vol. 24, Issue 1, Oct. 2021.
- [2] A. Wiesel, Y. C. Eldar, and S. Shamai, "Zero-forcing precoding and generalized inverses," IEEE Trans. Signal Process., vol. 56, no. 9, pp. 4409-4418, 2008.
- [3] S.-R. Lee, J.-S. Kim, S.-H. Moon, H.-B. Kong, and I. Lee, "Zero-forcing beamforming in multiuser MISO downlink systems under per-antenna power constraint and equal-rate metric," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 1, pp. 228-236, 2013.