

Cell-Free 다중안테나 시스템에서 상향링크 수신신호 최대화 빔포밍 및 전력할당 방식별 성능 연구

김근영, 명정호, 고영조
한국전자통신연구원

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

Performance Analysis of Receive Beamforming and Power Allocation in Cell-Free MIMO Uplink

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

요 약

Cell-free 다중안테나 시스템 상향링크에서 신호성분 수신전력을 최대화하는 빔포밍 방식과 단말별 수신전력을 동일하게 하는 전력할당 방식에 대한 성능 분석 내용을 다룬다. 비교 대상인 모든 단말이 최대 송신전력으로 전송하는 전력할당 방식에 비해 더 적은 총 송신전력을 사용하면서, 더 좋은 주파수 효율을 얻고 단말 별 더 균일한 주파수 효율을 얻는 것을 확인할 수 있다.

I. 서 론

Cell-free 다중안테나 시스템은 분산 안테나를 배치하여 협력 송수신을 통해 단말의 위치 및 단말 수 증가에 상관없이 비교적 균일한 성능을 제공할 수 있는 시스템으로, 6G 이동통신 후보기술로 주목 받고 있다 [1]. 본 논문은 cell-free 다중안테나 시스템 상향링크에서 신호성분 수신 전력을 최대화하는 MRC (maximum ratio combining) 빔포밍 방식과 동일한 신호성분 수신전력을 얻기 위한 전력할당 방식의 성능을 분석한다.

II. 본론

다중안테나 상향링크에서 신호성분 수신 신호전력을 최대화하면서, 수신 신호 전력을 동일하게 하기 위한 최적화 문제는 다음과 같이 표현할 수 있다 [1].

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \min_i p_i \mathbf{f}_i^\dagger \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^\dagger \mathbf{f}_i \\ & \text{subject to} \quad \mathbf{f}_i^\dagger \mathbf{f}_i = 1 \quad \forall i \\ & \quad \quad \quad 0 \leq p_i \leq p_i^{\max}, \quad \forall i \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, p_i 는 단말 i 의 할당 전력, \mathbf{f}_i 는 빔포밍 벡터, \mathbf{h}_i 는 사용자의 채널 벡터를 의미한다.

최적화 문제의 해인 빔포밍 벡터는 MRC 방식으로 다음처럼 구할 수 있다 [1].

$$\mathbf{f}_i = \frac{\mathbf{h}_i}{\|\mathbf{h}_i\|} \quad (2)$$

최적화 문제의 해인 전력 할당 방식은 다음과 같이 채널 norm의 제곱에 반비례하게 할당하는 것이다 [1].

$$\bullet \quad i = \arg \min_j p_j^{\max} \|\mathbf{h}_j\|^2 \text{인 사용자에게 대한 전력할당} \quad p_i = p_i^{\max} \quad (3)$$

$$\bullet \quad i \neq \arg \min_j p_j^{\max} \|\mathbf{h}_j\|^2 \text{인 사용자에게 대한 전력할당} \quad p_i = \frac{s_{\min}^{UL}}{\|\mathbf{h}_i\|^2} \quad (4)$$

여기서, p_i^{\max} 는 단말 i 의 최대 송신전력, s_{\min}^{UL} 은 최적화 문제의 해이다.

본 논문에서는 이러한 빔포밍 및 전력할당 방식에 대한 성능을 시뮬레이션을 통해 보여주고 이를 분석하고자 한다. 시뮬레이션에서 사용한 채널 모델은 IMT-2020 성능 평가 환경을 제시한 ITU-R 문서 중 indoor hot spot 모델을 준용하였다 [2]. 반송파 주파수는 30GHz이며, 가로 120m, 세로 50m 직사각형 영역에 단일 안테나를 가진 액세스 포인트 (Access Point, AP)를 40, 400, 4000를 거의 동일한 간격으로 배치하였다. 단일 안테나를 가진 단말 40개를 랜덤한 위치로 생성하였고, 최대 송신전력은 23dBm 하여, 주파수 효율, 송신전력, 수신전력에 대한 성능을 분석하였다. 식 (4)같이 채널에 반비례하여 전력을 할당하는 경우와 각 단말이 최대 송신전력으로 전송하는 경우의 성능을 비교하였다.

그림 1은 액세스 포인트 수 변화에 따른 단말당 주파수 효율 성능을 보여준다. CHInv는 채널 norm의 제곱에 반비례한 전력할당 시, Pmax는 단말이 최대 전송전력으로 전송시 성능을 보여준다. 액세스 포인트 수가 증가할 수록 주파수 효율이 증가하며, CHInv 방식이 PMax 방식보다 조금 더 좋은 성능을 보이며, 균등한 값을 가진다. 액세스 포인트 수가 증가할수록 CHInv 방식과 PMax 방식이 거의 동일한 성능을 보인다.

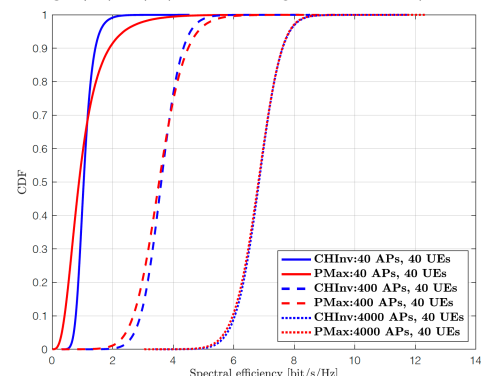


그림 1. AP 수 변화에 따른 주파수 효율
그림 2는 주파수 효율에 대한 하위 5%, 50%, 95% 단말

의 성능을 보여준다. 하위 5% 단말 성능에서는 CHInv가 더 좋은 성능을 보이나, 하위 95% 단말 성능에서는 PMax가 더 좋은 성능을 보인다.

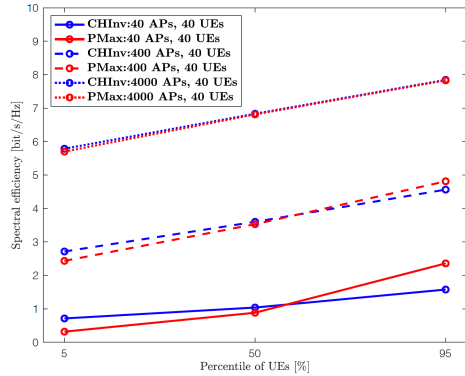


그림 2. AP 수 변화에 따른 성능하위단말 주파수 효율
그림 3은 액세스 포인트 수 변화에 따른 간섭성분을 제외한 신호성분 수신전력을 보여준다. 액세스 포인트 수 증가에 따라 신호성분 수신신호 전력은 커지며, PMax가 CHInv에 비해 더 큰 신호성분 수신전력을 보이지만, 간섭도 함께 증가하므로, 주파수 효율에서는 그림 1에서 보듯이 더 좋은 성능을 보이는 것은 아니다.

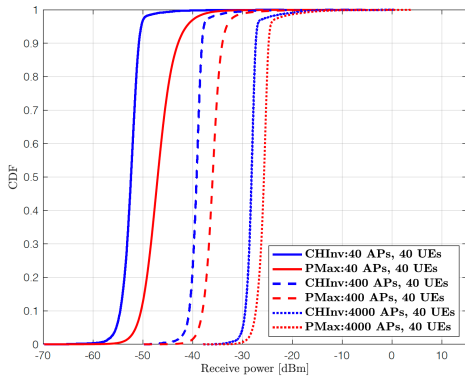


그림 3. AP 수 변화에 따른 신호성분 수신신호 전력
그림 4는 액세스 포인트 수 변화에 따른 단말 별 송신전력을 보여준다. PMax는 모든 단말이 최대 송신전력으로 송신하는 반면, CHInv는 모든 단말이 동일한 수신전력으로 수신되도록 신호를 송신한다. 액세스 포인트 수가 증가함에 따라 단말 별 송신전력이 증가한다. 이는 액세스 포인트 수 증가에 따라 채널 norm 값이 비슷해지고, 이에 따라 단말 별로 되도록이면 큰 수신전력으로 수신되도록 단말 별로 비슷하게 큰 송신전력으로 송신하기 때문이다. CHInv 방식에서 액세스 포인트 수 증가에 따라 단말 별 송신전력이 거의 비슷해지는 현상도 액세스 포인트 수 증가에 따라 단말 별 채널의 norm이 비슷해지게 되는 현상에서 비롯된 것이다.

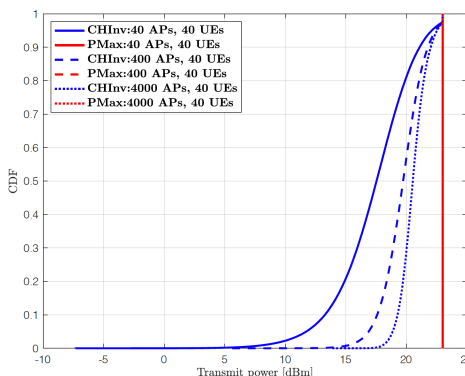


그림 4. AP 수 변화에 따른 단말별 송신신호 전력
그림 5는 액세스 포인트 수 변화에 따른 단말 총 송신

전력을 보여준다. 액세스 포인트 수 변화에 따라 CHInv 방식에서 총 송신전력이 증가하지만, PMax 보다 더 작은 전력을 송신한다.

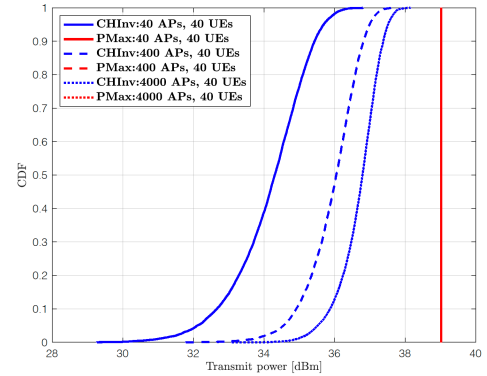


그림 5. AP 수 변화에 따른 단말 총 송신신호 전력
결론적으로 CHInv 방식이 PMax 방식보다 더 작은 총 송신전력을 사용하지만, 더 좋은 주파수 효율을 보이고, 특히, CHInv 방식이 더 적은 액세스 포인트에서도 더 균등한 주파수 효율을 보이고, 하위 5% 단말의 주파수 효율 역시 향상된다.

III. 결론

cell-free 다중안테나 시스템은 셀 경계에서 성능 저하 문제, 단말 증가에 따른 단말 별 성능 저하 문제 등을 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 cell-free 다중안테나 시스템 상향링크에서 신호성분 수신전력을 최대화하는 빔포밍 방식 사용시 단말 별 수신전력을 동일하게 하는 전력할당 방식이 최대 송신전력을 전송하는 전력할당 방식에 비해 더 작은 전력을 사용하면서 더 좋은 주파수 효율 성능을 보이는 것을 확인하였다. 특히, 액세스 포인트 수가 400 개인 경우, 주파수 효율 성능 하위 5% 단말 성능이 5G 목표 대비 거의 10 배에 근접하는 2.7bps/Hz 정도의 성능을 보이기 때문에 400MHz 대역폭을 사용할 경우, 1Gbps 정도 채널전송 속도 지원도 가능할 것으로 예상된다. 본 논문에서 제시된 방식 이외에 간섭을 제거하는 빔포밍 방식, 신호대간섭잡음비를 최대화하는 빔포밍 방식 등 다양한 빔포밍 방식을 고려할 수 있으며, 전력할당 방식도 목적할수에 따라 채널 norm 값에 비례한 방식 등 다양한 방식을 고려할 수 있다. 또한, 상향링크 보다 좀 더 어려운 하향링크에서 성능 분석도 추가로 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2021-0-00746, Tbps 급 무선통신 기술 개발).

참 고 문 헌

- [1] 김근영, 명정호, 고영조, "Cell-Free 다중안테나 시스템에서 상향링크 수신신호 최대화 빔포밍 및 전력할당 방식 연구," 한국통신학회 동계학술대회, 2021년 2월.
- [2] Report ITU-R M.2410-0, Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020, 2017년 10월.