

셀프리 다중안테나 다운링크 시스템에서 하이브리드 빔포밍 디자인

명정호, 김근영, 고영조
한국전자통신연구원

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

Hybrid Beamforming Design in Cell-Free MIMO Downlink

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

요 약

본 논문에서는 셀프리 다중안테나 다운링크 시스템에서 하이브리드 빔포밍 디자인에 따른 성능 분석을 수행하였다. 제안하는 시스템의 디지털 빔포밍은 한정된 수의 RF 체인을 고려한 사용자 선별방식을 기반으로, 액세스 포인트간 별도의 채널 정보 공유 없이 액세스 포인트 각각에서 독립적으로 추정된 채널 정보를 활용하여 간섭제거 빔포밍으로 디자인하였다. 아날로그 빔포밍은 멀티패널 환경을 고려한 고정된 아날로그 빔포밍을 사용하였으며, 각 패널 간의 거리와 수직각도 변화에 따른 성능분석을 수행하였다. 실험결과를 통해 셀프리 다중안테나 다운링크 환경에서는 기존 쉘레 빔포밍 기반 송신 기법보다 간섭제거 빔포밍이 더 높은 주파수 이용효율을 얻는 것을 확인할 수 있다. 또한, 액세스 포인트의 밀집도에 따라 최적의 아날로그 빔포밍이 존재함을 확인할 수 있다.

I. 서 론

무선 트래픽 증가와 더불어 높은 수준의 균일한 데이터 전송속도를 제공하기 위한 다양한 전송 기술들이 연구되고 있다. 그 중, 셀프리 다중안테나 전송기술은 분산 안테나 구조를 이용하여, 채널 정보 획득 및 프론트홀 용량 문제와 같은 구현 문제를 극복하면서, 차세대 미래 이동통신 후보 기술로 많은 관심을 받고 있다[1-3].

셀프리 다중안테나 전송은 시분할 방식으로 동작하는 특징을 가지고 있다. 따라서, 무선 액세스 포인트(access point, AP)와 사용자(User equipment, UE)사이의 채널상호성을 가정하여, AP에서는 UE가 전송하는 기준신호를 이용하여 다운링크 채널 정보를 획득한다. 획득한 채널정보를 이용하여 CPU와 프론트홀로 연결된 분산된 AP가 다수 UE들에게 동시에 데이터를 전송하는 것이 특징이다. AP가 많을수록 비교적 단순한 신호처리 기법으로 최적의 성능을 달성할 수 있으며, UE에게 높은 수준의 일정한 전송용량을 제공할 수 있는 기술로 널리 알려져 있다.

본 논문에서는 분산된 다중안테나로 구성된 셀프리 다운링크 환경에서 한정된 수의 RF 체인을 고려한 지원 UE 선별 방식과 지역적 채널상태정보를 기반으로 하이브리드 빔포밍 디자인 방법을 제안하였다. 제안한 UE 선별방식은 수신 신호 레벨을 기준으로 선정하는 것을 특징으로 한다. 또한, 디지털 빔포밍은 AP 간 선정된 UE 정보 공유 후, 간섭제거 빔포밍을 활용하여 디자인한다. 아날로그 빔포밍은 고정된 빔을 사용하였으며, 멀티패널 환경을 고려하여 패널 사이의 거리 및 수직각도 변화에 따라 최적의 고정 빔을 찾도록 디자인하였다.

제안한 하이브리드 빔포밍을 사용할 경우, 동일/근접 AP에서 발생하는 간섭을 제어할 수 있기 때문에 기존 쉘레 빔포밍 보다 더 높은 주파수 이용효율을 달성할 수 있다.

II. 본 론

본 장에서는 셀프리 다중안테나 다운링크에서 UE 선정 및 하이브리드 빔포밍 디자인 방법을 제시한다. 제안 시스템은 L 개의 AP와 싱글 안테나를 가진 K 명의 UE를 고려한다. 각 AP는 M 개의 균일한 직사각형 구조의 멀티패널을 가정하였으며, 각 패널은 안테나 소자 N 개로 구성하였다. 또한, 각 AP에서의 사용하는 RF 체인의 수(M_{RF})는 패널 수와 동일하게 가정하였다.

제안 시스템의 k 번째 UE의 수신신호(y_k)는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$y_k = \sum_{l=1}^L \mathbf{h}_{kl} \mathbf{f}_{lk}^* x_k + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1, p \neq k}^K \mathbf{h}_{kl} \mathbf{f}_{lp}^* x_p + \sigma_k^2$$

여기서 $\mathbf{h}_{kl}, \mathbf{f}_{lk}^*, x_k, \sigma_k^2$ 는 k 번째 UE와 l 번째 AP사이의 채널, l 번째 AP에서 k 번째 UE를 위한 빔포밍 벡터, k 번째 UE의 데이터 심볼, 가우시안 노이즈를 의미한다.

다운링크 전송을 위하여, 각 AP에서는 국부적 채널정보를 기반으로 디지털 빔포밍을 계산하여 데이터를 전송한다. 기존 문헌에서 사용하는 쉘레 빔포밍은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\mathbf{f}_{lk}^* = \frac{\mathbf{h}_{kl}^*}{\|\mathbf{h}_{kl}^*\|}$$

각 AP에서는 RF 체인의 수에 제한이 있기에, 채널 크기가 큰 순서대로 M_{RF} 개의 UE를 선별하여 쉘레빔포밍을 계산하고 이를 통해 데이터를 전송한다.

제안한 기술에서는 사용자 정보 공유기반 디지털 빔포밍 디자인을 수행한다. 이를 위해 각 AP에서는 기존 채널 크기 기반으로 UE를 우선 선별하며, CPU를 통해 인접한 AP들에게 자신이 선택한 UE 정보를 추가 전달한다. 따라서, 각 AP에서는 자신의 선택한 UE와 더불어 인접한 AP로부터 받은 UE 정보를 받아 추가 채널 추정 절차

를 통해 채널 정보($\bar{\mathbf{H}}_l$)를 획득할 수 있다. $\bar{\mathbf{H}}_l$ 은 $K \times M$ 사이즈의 채널 행렬로, K 는 l 번째 AP에서 선별한 사용자 수(M_{KF})와 인접 AP로 받은 간섭제어 사용자 수(M_{IF})의 합으로 계산된다. 이후, l 번째 AP에서는 간섭제어 디지털 빔포밍(\mathbf{F}_l^{BB})을 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$\mathbf{F}_l^{BB} = \bar{\mathbf{H}}_l^* \left(\bar{\mathbf{H}}_l \cdot \bar{\mathbf{H}}_l^* + \frac{\sigma^2}{P_s} \mathbf{I}_K \right)^{-1}$$

이후, \mathbf{F}_l^{BB} 에서 왼쪽부터 M_{KF} 개 열에 해당하는 $M \times M_{KF}$ 사이즈 행렬, $\bar{\mathbf{F}}_l^{BB}$ 를 디지털 빔포밍으로 사용한다.

또한, 본 논문에서는 아날로그 빔포밍 디자인 기법을 제안한다. 제안 환경에서는 천장에 위치한 AP를 가정하였으며, 각 AP는 아래와 같이 고정된 방향으로 아날로그 빔포밍을 전송한다. 아날로그 빔포밍 형상을 결정하는 변수는 (a, θ) 로, 패널 간의 거리(a)와 수직각도(θ)를 바꿔가며 최적의 아날로그 빔 패턴을 찾으려 디자인한다.

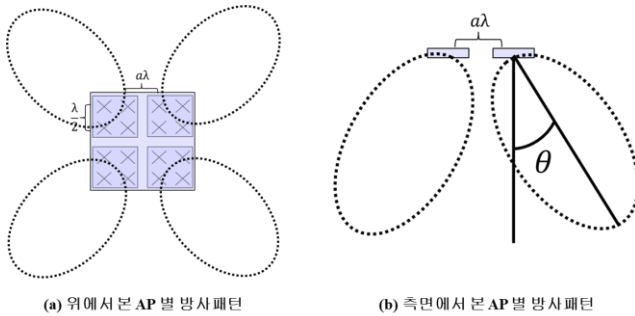


그림 1. AP 별 아날로그 빔 방사패턴

성능 분석을 위하여 시뮬레이션은 ITU-R indoor hotspot 모델(=28GHz)을 사용하였다[4]. 실험을 위하여 멀티 패널을 가진 AP를 균일하게 배치하였고, UE는 랜덤 위치를 가정하여 생성 및 실험하였다. 실험에 사용한 세부 파라미터는 아래와 같다.

<표 1. 셀프리 다중안테나 시뮬레이션 파라미터>

파라미터	파라미터 값
레이아웃	120 x 50 m
Carrier frequency	28GHz
AP / UE 수	48, 20
패널/안테나 소자 수	{2x2} / {2x2}
RF 체인 수	4
AP 별 Transmit Power	23dBm
빔포밍 기법	Conj: 켈레빔포밍 MMSE: 간섭제어 빔포밍

그림 2은 {AP, UE} 수가 {48, 20}인 환경에서 패널간 거리 및 수직 각도 설정에 따른 제안 빔포밍 기법의 주파수 이용효율을 보여준다. AP가 멀티패널-다중안테나로 구성된 경우, 기존 켈레 빔포밍 대신 제안한 간섭제어 빔포밍을 통해 더 높은 주파수 이용효율이 달성 가능한 것을 확인할 수 있다. 제안하는 AP 간 UE 정보 공유를 통해 각 AP에서 지원하는, 즉 가까운 곳에 위치한 UE 간의 간섭을 적극적으로 제어함으로써 성능을 이끌어 낸 것으로 확인된다. 또한, 실험결과를 통해 패널간 거리와 수직 각도가 성능 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 본 실험환경 {AP, UE}={48, 20}에서 하위사용자를 위한 최적의 환경은 $a=2$, $\theta=170$ 도로 확인된다.

III. 결론

본 연구에서는 셀프리 다중안테나 환경에서 사용자 공유를 이용한 하이브리드 빔포밍 전송 기술을 제안하였

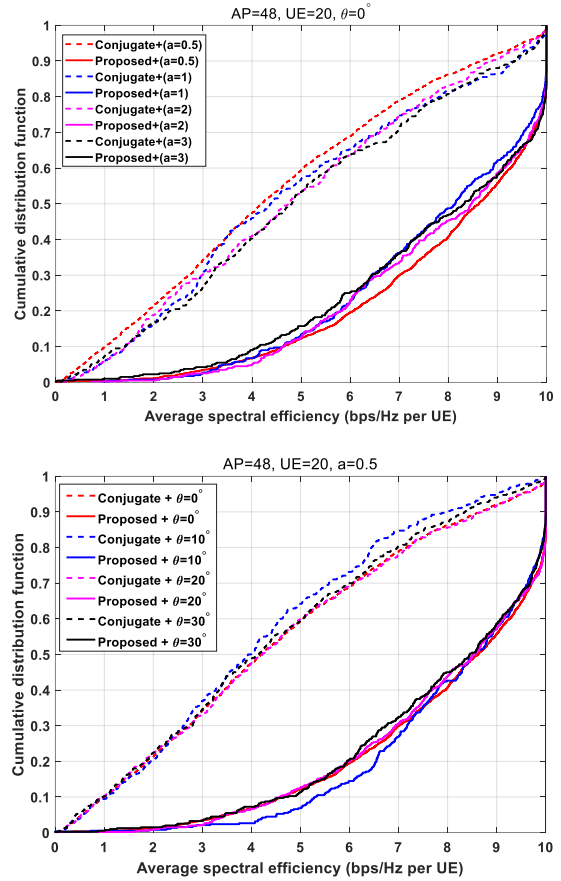


그림 2. (위)패널간 거리 (아래)수직 각도에 따른 성능

다. 실험 결과를 토대로 멀티패널-다중안테나 환경에서 간섭제어 전송기술이 전송용량 증가에 큰 도움이 될 수 있음을 확인하였다. 또한, 고정된 아날로그 빔포밍을 사용할 경우, 패널간 거리와 수직 각도의 설정에 따라 전송용량이 달라질 수 있음을 확인하였다. 우리는 이러한 연구결과를 확장하여, 다양한 셀프리 다중안테나 환경에서 최적의 하이브리드 빔포밍 디자인 기법에 대한 연구를 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [1] H. Q. Ngo et al., "Cell-Free Massive MIMO Versus Small Cells," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, no. 3, pp. 1834-1850, March 2017.
- [2] G. Interdonato et al., "Ubiquitous Cell-free Massive MIMO Communications," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Aug. 2019.
- [3] J. Zhang et al., "Cell-Free Massive MIMO: A New Generation Paradigm," IEEE Access, vol. 7, pp. 99878-99888, Aug. 2020.
- [4] Report ITU-R M.2410-0, Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020, 2017년 10월.