

경로선택 기반 에너지 효율적 FDD 대용량 안테나 시스템

김승년, 심병호

뉴미디어통신공동연구소, 서울대학교

snkim@islab.snu.ac.kr, bshim@islab.snu.ac.kr

요약

본 논문에서는 FDD 대용량 안테나 시스템의 채널 피드백 오버헤드를 줄이기 위한 에너지 효율적 경로선택 기법을 제안하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 기법이 전력 및 채널 피드백 오버헤드를 크게 감소시켰음을 확인하였다.

I. 서론

근래, 대용량 안테나 시스템이 5G 및 6G 이동통신 시스템에서 전송률 향상을 달성하기 위한 핵심 기술로써 많은 주목을 받고 있다. 이론적으로 대용량 안테나 시스템은 안테나 개수에 비례하는 전송률 이득을 얻을 수 있으며 대용량의 전송 안테나를 기지국에 배치하여 전송률을 극대화할 수 있다. 그러나 대용량 안테나 시스템의 단점은 많은 수의 전송 안테나 때문에 에너지 소모가 극심하다는 점이다. 이러한 에너지 소모를 감소시키기 위해서는 각 단말에게 할당되는 전송 전력을 최적화하는 기술이 필수적이다.

전송 전력 분배 기법의 에너지 소모량 감소 성능을 극대화하기 위해서는 기지국이 정확한 하향링크 채널 정보를 획득하는 것이 필수적이다. Time-division-duplexing (TDD) 시스템에서는 채널 상호성을 사용하여 기지국이 단말의 상향링크 파일럿 신호로부터 직접 채널 정보를 획득할 수 있으나, frequency-division-duplexing (FDD) 시스템에서는 채널 상호성이 성립하지 않아 단말이 기지국의 하향링크 파일럿 신호로부터 채널정보를 추정하고 이를 다시 기지국에 피드백하는 과정이 필요하다. 이때, 채널정보를 전송하기 위해 필요한 피드백 자원의 수가 기지국의 안테나 개수에 비례하기 때문에 대용량 안테나 시스템에서 채널 피드백 오버헤드는 매우 심각한 문제이다 [1].

본 논문에서는 경로선택 기법을 통해 하향링크 채널정보를 압축하고 이를 기반으로 데이터 송신 및 전력 분배를 수행하여 피드백 오버헤드를 감소시키는 기법을 제안한다. 시뮬레이션 결과를 통해 같은 피드백 자원을 사용하였을 때 제안하는 경로선택 기반 전력 분배기법이 기존 전력분배 기법보다 에너지 감소 성능이 훨씬 뛰어남을 확인하였다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 N개의 송신 안테나를 가진 기지국이 한 개의 수신 안테나를 가진 K명의 단말을 지원하는 FDD 기반 대용량 안테나 시스템을 가정한다. 이때 기지국과 단말 k 사이의 하향링크 채널벡터 \mathbf{h}_k 는 아래와 같이 정의된다.

$$\mathbf{h}_k = \sum_{i=1}^P g_{k,i} \mathbf{a}(\theta_{k,i}) = \mathbf{A}_k \mathbf{g}_k$$

여기서 $g_{k,i} \sim CN(0,1)$ 은 i번째 경로의 경로이득이고 $\mathbf{a}(\theta_{k,i})$ 는 i번째 경로의 각도정보 $\theta_{k,i}$ 에 해당하는 스티어링 벡터이다.

III. 경로선택 기반 전력분배 기법

제안하는 경로선택 기반 전력분배 기법은 크게 두 가지 단계로 이루어진다. 먼저 기지국은 하향링크 채널 벡터가 아닌 일부 경로 정보를 기반으로 하향링크 데이터 프리코딩을 수행한다. 이때 데이터 프리코딩 벡터 \mathbf{w}_k 는 아래와 같이 정의된다.

$$\mathbf{w}_k = \sqrt{p_k} \sum_{i \in \Omega_k} g_{k,i} \mathbf{a}(\theta_{k,i}) = \mathbf{A}_{\Omega_k} \mathbf{g}_{\Omega_k}$$

여기서 p_k 는 단말 k를 위한 전력 계수이고 Ω_k 는 단말 k를 위한 경로 인덱스 집합이다. Ω_k 는 다양한 설계방식이 적용될 수 있는데 line-of-sight (LoS) 경로만 포함하도록 설계할 수도 있고 경로이득이 큰 몇 개의 경로 인덱스만 포함하도록 설계할 수도 있다. 데이터 프리코딩 벡터 \mathbf{w}_k 는 하향링크 채널벡터 전체가 아닌 일부 경로정보 $\{g_{k,i}, \theta_{k,i}\}_{i \in \Omega_k}$ 만으로 이루어져 있으므로 단말이 채널정보를 피드백할 때 필요한 피드백 자원이 획기적으로 감소된다.

앞서 제안한 데이터 프리코딩 벡터를 사용하였을 때 단말 k의 전송률 R_k 는 아래와 같이 계산된다.

$$R_k = \log_2 \left(1 + \frac{p_k \left(L + \left\| \mathbf{A}_k^H \mathbf{A}_{\Omega_k} \right\|_F^2 \right)}{\sum_{j \neq k}^K p_j \left\| \mathbf{A}_k^H \mathbf{A}_{\Omega_j} \right\|_F^2 + \sigma_n^2} \right)$$

이때 L은 단말 k를 위해 선택한 경로의 개수이다. 또한 기지국의 송신전력 P_{tx} 는 아래와 같이 계산된다.

$$P_{tx} = L \sum_{k=1}^K p_k$$

마지막으로 시스템의 에너지 효율 E_e 는 합전송률과 송신전력의 비율로 정의된다.

$$E_e = \frac{\sum_{k=1}^K R_k}{P_{tx}} = \frac{\sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{p_k \left(L + \| \mathbf{A}_k^H \mathbf{A}_{\Omega_k} \|_F^2 \right)}{\sum_{j \neq k}^K p_j \| \mathbf{A}_k^H \mathbf{A}_{\Omega_j} \|_F^2 + \sigma_n^2} \right)}{L \sum_{k=1}^K p_k}$$

따라서 에너지 효율을 극대화하기 위한 최적화 문제는 아래와 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} & \max_{p_k} E_e \\ \text{s.t. } & R_k \geq R_k^{\min}, k = 1, \dots, K \\ & P_{tx} \leq P_{\max} \end{aligned}$$

위의 최적화 문제는 successive convex approximation (SCA) 기법을 사용하여 효과적으로 해결할 수 있다.

III. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 $N=32$ 개의 송신 안테나를 가진 기지국이 1개의 수신 안테나를 가지는 6명의 단말을 지원하는 대용량 안테나 시스템을 가정하였다. 채널은 다중경로채널 모델을 사용하였으며 경로 개수는 $P=6$ 개를 사용하였다. 또한 각 단말마다 3개의 경로를 선택하였으며 피드백 자원은 $B=8$ 개를 사용하였다.

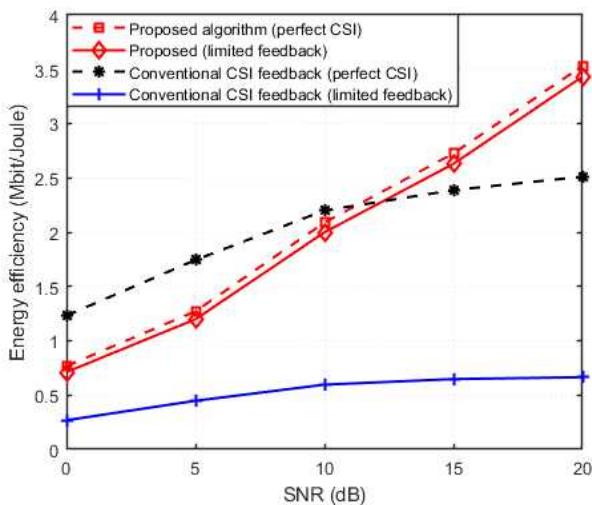


그림 1. SNR에 따른 에너지 효율 그래프

그림 1에서는 SNR에 따른 에너지 효율을 도시하였다. 시뮬레이션을 통해 유한한 피드백 자원을 사용하는 경우 제안하는 경로선택 기반 전력분배기법이 기존 채널 피드백 기반 전력분배기법보다 훨씬 높은 에너지 효율 성능을 보임을 확인하였다. 또한 SNR 10dB 이상에서는 완벽한 채널정보를 기반으로 하는 전력분배기법보다 높은 성능을 달성함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.(UD190033ED)

참고 문헌

- [1] Yoo, Taesang, Nihar Jindal, and Andrea Goldsmith. "Multi-antenna downlink channels with limited feedback and user selection." IEEE Journal on Selected Areas in Communications 25.7 (2007): 1478-1491.