

유사수직 상향링크 파일럿 프리코딩을 통한 파일럿 오버헤드 감소 기법

김승년, 심병호

뉴미디어통신공동연구소, 서울대학교

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

요약

본 논문에서는 유사수직 상향링크 파일럿 프리코딩을 통해 고밀집 네트워크 환경에서 발생하는 파일럿 오버헤드를 감소하는 기술을 제안하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 기법이 상향링크 파일럿 오버헤드를 크게 감소시켰음을 확인하였다.

I. 서론

향후 10년간 1000배 이상의 무선 트래픽량 증가를 충족하기 위해 5세대(5G) 셀룰러 네트워크는 통신 업계 및 학계에서 뜨거운 연구 주제가 되고 있다. 첫째, 5G 이동통신의 주파수 효율 개선을 위해 대용량 다중 입력 다중 출력(multiple-input multiple-MIMO) 기술이 제안되었다. 둘째, 5G 이동통신 시스템의 전송 대역폭을 확장하기 위해 밀리미터파 통신이 제안되었다. 특히 소형셀 개념이 셀룰러 시나리오에서 전송률 및 에너지 소비 절약을 위해 등장했다. 빈틈없는 커버리지를 만족시키기 위해 5G 셀룰러 네트워크를 위해 더 많은 수의 소형 셀이 춤춤하게 배치되어야 한다. 이에 따라 고밀집 네트워크(ultra dense network, UDN)는 5G 셀룰러 네트워크의 핵심 특징 중 하나로 떠오르고 있다. 그러나 고밀집 네트워크에 대한 연구는 아직 초기 단계에 있다. 네트워크 구조 및 셀룰러 밀도 한계와 같은 일부 기본적인 연구는 미래의 5G 셀룰러 네트워크를 위해 더 많은 연구가 필요한 실정이다. [1].

본 논문에서는 유사수직 상향링크 파일럿 프리코딩을 통해 파일럿 오버헤드를 감소시키는 기법을 제안한다. 제안하는 기법의 핵심은 유사수직 알고리즘을 통해 설계된 파일럿 행렬을 기존 파일럿 신호에 곱해서 전송하는 것이다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 유사수직 상향링크 파일럿 프리코딩 기법이 상향링크 파일럿 오버헤드를 크게 이상 감소시켰음을 확인하였다.

II. 본론

제안하는 유사수직 상향링크 파일럿 프리코딩 기법은 크게 세 가지 단계로 이루어진다. 첫 번째로 각 셀에 대하여 유사수직인 K개의 셀과 각 셀과 유사수직인 셀 집합을 선택한다. 두 번째로 선택한 K개의 셀 사이의 채널에 대하여 zero-forcing 기반 파일럿 프리코딩 벡터를 계산한다. 마지막으로 획득한 파일럿 프리코딩 벡터를 통해 상향링크 파일럿 프리코딩을 수행한다.

셀 m 내의 단말이 전송하는 파일럿 프리코딩 벡터를 w_m 이라고 정의하자. 또한 셀 m 내의 단말과 기지국 사이의 방향벡터를 $a(\theta_{m,m})$ 이라고 하고 셀 m 내의 단말과 다른 셀 n 사이의 방향

벡터를 $a(\theta_{m,n})$ 이라고 하자. 단말의 전송안테나 개수가 충분한 이상적인 상황에서는 모든 다른 셀 n 사이의 방향벡터들과 수직인 벡터를 찾아서 파일럿 프리코딩 벡터로 사용함으로써 다른 셀의 단말로부터 전송되는 파일럿 신호 간섭을 제거할 수 있다. 그러나 단말의 전송안테나 개수가 제한적인 일반적인 상황에서는 몇 개의 방향벡터를 대표적으로 선택하고 이들에 대해 zero-forcing을 수행해야 한다. 이러한 대표적인 K개의 방향벡터를 선택하기 위해 본 연구에서는 유사수직 유저 선택(semiorthogonal user selection, SUS) 알고리즘을 사용하였다 [2]. SUS 알고리즘은 원소의 개수가 K인 셀 그룹 C_0 를 선택하는 알고리즘이다. 또한 C_0 의 각 원소 g_k 에 대해 유사수직한 셀 그룹 T_k 을 선택한다. SUS 알고리즘은 크게 4단계로 이루어져 있다.

단계 1. 초기설정

먼저 아래와 같이 초기설정을 수행한다. 이때 i는 반복인자이다.

$$T_1 = \{1, \dots, B\}$$

$$i = 1$$

$$C_0 = \emptyset$$

단계 2. 선택된 셀의 방향벡터들로 이루어진 벡터공간에 대한 직교투영

T_i 의 원소인 각 셀 k에 대해 셀 m과 셀 k 사이의 방향벡터를 현재까지 선택한 셀의 방향벡터들로 이루어진 벡터공간에 아래와 같이 직교투영한다.

$$g_k = a_u(\theta_{m,k}) - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{g_{(j)}^H a_u(\theta_{m,k})}{\|g_{(j)}\|^2} g_{(j)}$$

만약 $i = 1$ 이면 $g_k = a(\theta_{m,k})$ 으로 설정한다.

단계 3. i번째 대표셀을 선택

계산한 직교투영벡터 중에 가장 크기가 큰 벡터에 해당하는 셀을 i번째 대표셀로 선택한다.

$$\pi(i) = \operatorname{argmax}_{k \in T_i} \|g_k\|$$

$$C_0 \leftarrow C_0 \cup \{\pi(i)\}$$

$$h_{(i)} = h_{\pi(i)}$$

$$g_{(i)} = g_{\pi(i)}$$

단계 4. T_i 업데이트

새로 얻은 $\mathbf{g}_{(i)}$ 에 대하여 $\mathbf{g}_{(i)}$ 와 유사수직인 방향벡터를 가지는 셀들을 선택하고 i를 업데이트한다.

$$T_{i+1} = \left\{ k \in T_i, k \neq \pi(i) \mid \frac{|\mathbf{g}_{(i)}^H \mathbf{a}_u(\theta_{m,k})|}{\|\mathbf{a}_u(\theta_{m,k})\| \|\mathbf{g}_{(i)}\|} < \alpha \right\}$$

$$i \leftarrow i + 1$$

이 때 α 는 유사도이다. 최종적으로 선택된 셀 집합 $\{\pi(1), \dots, \pi(K)\}$ 의 방향벡터 집합

$\{\mathbf{a}_u(\theta_{m,\pi(1)}), \dots, \mathbf{a}_u(\theta_{m,\pi(K)})\}$ 은 서로에 대해 유사수직하다.

앞서 설명한 SUS 알고리즘을 통해 대표적 셀 집합 $\{\pi(1), \dots, \pi(K)\}$ 을 찾고나면 셀 m 내의 단말이 사용하는 상향 링크 프리코딩 벡터 \mathbf{w}_m 는 zero-forcing operation을 통해 얻어진다. 구체적으로, 셀 m 이 속하는 셀 집합의 원소를 $\pi(m^*)$ 이라고 정의하자. 또한 방향벡터 집합

$\{\mathbf{a}_u(\theta_{m,\pi(1)}), \dots, \mathbf{a}_u(\theta_{m,\pi(K)})\}$ 를 모두 열벡터로 모은 행렬을 $\mathbf{A}_m = [\mathbf{a}_u(\theta_{m,\pi(1)}), \dots, \mathbf{a}_u(\theta_{m,\pi(K)})]$ 이라고 하자. 또한 \mathbf{A}_m 의 의사역행렬을 $\mathbf{G}_m = \mathbf{A}_m (\mathbf{A}_m^H \mathbf{A}_m)^{-1}$ 으로 정의하자. 그러면 셀 m 내의 단말이 전송하는 상향 링크 프리코딩 벡터 \mathbf{w}_m 는 \mathbf{G}_m 의 m^* 번째 열벡터로 정의된다. 이렇게 정의된 \mathbf{w}_m 은 $\mathbf{a}(\theta_{m,\pi(m^*)})$ 와는 내적하면 1이 되고 나머지 방향벡터들과는 내적하면 0이 되는 특징을 가지고 있다. 즉, \mathbf{w}_m 은 실제 방향벡터 $\mathbf{a}(\theta_{m,m})$ 와 유사 평행하고 나머지 방향벡터들과는 유사수직한 관계를 가진다. 따라서 앞 절에서 제안한 다중셀 클러스터링 기반 상향 링크 파일럿 프리코딩 벡터와 유사하게 다른 대표 방향벡터와 유사수직인 셀 내의 단말에서 전송되는 상향 링크 파일럿 신호 간섭이 상쇄될 수 있다.

III. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 $M=15$ 개의 셀과 단말이 존재하는 UDN 환경에서 채널은 다중경로 채널 모델을 사용하였으며 실험의 간편함을 위해 경로개수는 1로 설정하였다. 기지국은 8개의 송신안테나를 가지고 있으며 단말은 4개의 수신안테나를 가지고 있다고 가정하였다.

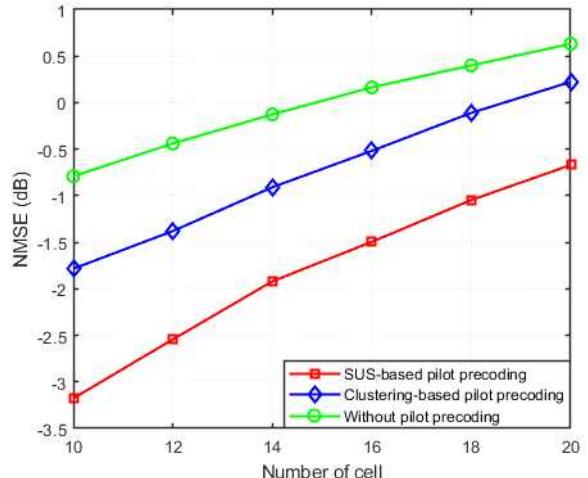


그림 1. 셀 개수에 따른 평균제곱오차 성능 그래프

그림 1에서는 셀의 개수에 따른 채널 추정 평균제곱오차를 도시하였다. 그림에서 확인한 바로는 제안하는 상향 링크 파일럿 프리코딩 기법 중 SUS 기반 프리코딩 기법이 가장 우수한 성능을 보였으며, 그 뒤에 클러스터링 기반 프리코딩 기법, 그리고 파일럿 프리코딩을 수행하지 않은 기법 순으로 성능이 좋음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터 지원 사업의 연구 결과로 수행되었음" (IITP-2020-2017-0-01637*)

참고 문현

- [1] J. Jose, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta, and S. Vishwanath, "Pilot contamination and precoding in multi-cell TDD systems," IEEE Transaction on Wireless Communication, vol. 10, no. 8, pp. 2640 - 2651, Aug. 2011.
- [2] 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.