

셀-경계 유저의 전송 자유도 상생을 위한 릴레이 활용

*김호연 *노종선

*서울대학교

ferui@ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr

Relay use for degrees of freedom improvement of cell-edge users

*Ho-Youn Kim, *Jong-Seon No

*Seoul National University

요약

본 논문에서는 셀-경계 유저의 자유도 향상을 위해 릴레이를 활용한다. 본 논문에서는 셀-경계 유저의 자유도 향상을 위해서 릴레이를 활용한 간섭 정렬 기법을 구성하고 이를 통해 기존의 주파수 재사용 기법에 비교해서 전송 자유도를 향상시킬 수 있음을 보인다.

I. 서론

셀룰러 네트워크에서 셀-경계 유저는 기지국으로의 채널 환경이 셀-내부 유저에 비해서 비교적 열화되어있다. 따라서, 셀-경계 유저의 전송률을 향상시키는 것은 매우 중요한 이슈로 여겨져 왔다.

간섭이 존재하는 다중-셀, 다중-유저 셀룰러 네트워크에서 간섭을 제어하기 위하여 주파수 재사용 등의 직교 기법(orthogonal scheme)이 제안되었다. 그러나, 이러한 직교 기법은 구현 난이도에서는 장점이 있지만, 최종적인 성능 측면에서는 단점이 명확하다.

최근 간섭이 존재하는 환경에서 전송 자유도 향상을 위한 기법으로 릴레이를 활용하는 간섭 정렬 기법이 제안되었고, 본 논문에서는 이를 활용하여 셀-경계 유저를 위한 릴레이 활용법을 제안하고, 이를 기존의 주파수 재사용과 전송 자유도의 측면에서 비교한다.

II. 본론

II.1 시스템 모델

본 절에서는 그림 1 과 같이 전 이중 릴레이가 존재하는 2-셀, 2 명의 셀-경계 유저 셀룰러 네트워크 내 상향 통신 상황을 고려한다. 이는 편의성을 위한 것으로, 후에 언급하는 방법을 확장하여 임의의 다중-셀, 다중-유저 셀룰러 네트워크에도 적용할 수 있다. 이 때, 셀-경계 유저에서 기지국으로의 직경로 채널 세기는 릴레이에서 기지국으로의 직경로 채널에 비해 매우 약하여 무시할 수 있다고 가정한다. 각 유저의 안테나 개수는 한 개로 가정하고 기지국의 안테나 개수는 2 개로 가정한다. 마찬가지로, 이는 임의의 다중 안테나(MIMO) 환경 및 다중 릴레이 환경으로 확장될 수 있다.

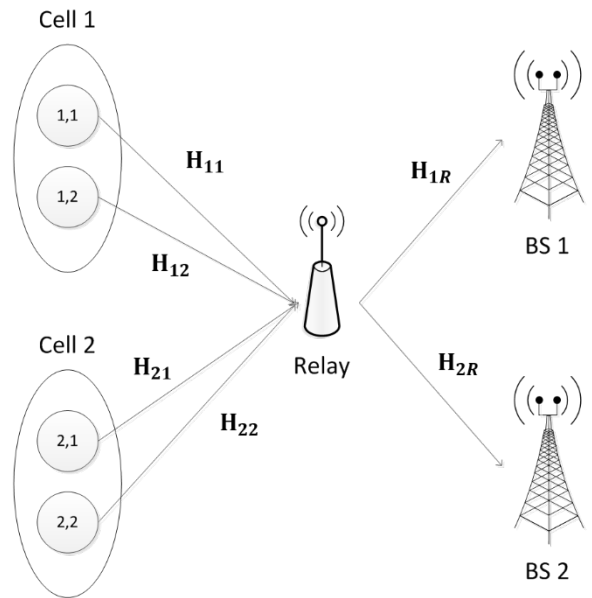


그림 1 네트워크 모델

이 때, 기지국 i 의 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_i = \mathbf{H}_{iR}x_R + n_i, \quad i = 1, 2$$

$\mathbf{H}_{iR} \in \mathbb{C}^{2 \times 4}$ 는 릴레이에서 기지국 i 로의 채널 행렬 값, x_R 은 릴레이에서 전송하는 신호이며 n_i 는 기지국 i 에서의 잡음이고, 이는 평균이 0 이고 분산이 1 인 연속 복소 가우시안 확률분포를 따른다고 가정한다.

이 때, 릴레이에서 수신하는 신호 y_R 은 아래와 같다.

$$y_R = \sum_{m,n} \mathbf{H}_{mn}x_{mn} + n_R, \quad m, n = 1, 2$$

$\mathbf{H}_{mn} \in \mathbb{C}^{4 \times 1}$ 는 기지국 m 내의 유저 n 으로부터 릴레이로의 채널 행렬 값, x_{mn} 은 기지국 m 내의 유저 n 이 전송하는 신호이며, $\mathbf{n}_R \in \mathbb{C}^{4 \times 1}$ 는 릴레이에서의 잡음 벡터이고, 이는 평균이 0 이고 분산이 1 인 연속 복소 가우시안 확률분포를 따른다고 가정한다.

위 네트워크에서 릴레이의 안테나 개수 요구량은 최소 4 개이다. 이의 일반화에 대해서는 뒤에서 설명한다. 릴레이에서는 zero-forcing 에 기반한 디코더를 활용하여 각 유저들의 전송 신호를 획득한다. (참고문헌 [1]) 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$(x_{11}, x_{12}, x_{21}, x_{22}) = g(y_R)$$

이 때, g 는 릴레이에서의 디코딩 함수이다.

릴레이에서 기지국들로 전송되는 신호 x_R 은 다음과 같다.

$$x_R = v_{11}x_{11} + v_{12}x_{12} + v_{21}x_{21} + v_{22}x_{22}$$

이 때, v_{mn} 은 기지국 m 내의 유저 n 이 전송하는 신호를 기지국에서 분리해내기 위한 간섭 정렬 빔포밍 벡터이다.

II.2 빔포머 및 기지국 zero-forcer 설계

기지국 i 의 수신 신호는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$y_i = \mathbf{H}_{iR}(v_{11}x_{11} + v_{12}x_{12} + v_{21}x_{21} + v_{22}x_{22}) + n_i$$

만약, 셀 1 를 위한 빔포머가 생성하는 신호 공간과 셀 2 를 위한 빔포머가 생성하는 신호 공간이 서로 직교할 수 있게 각 빔포머를 설계한다면, 기지국 1 과 기지국 2 는 서로 자신이 원하는 신호를 완벽하게 분리할 수 있다. 이 조건을 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$\text{span}(v_{11}, v_{12}) \perp \text{span}(v_{21}, v_{22}), \quad v_{mn} \in \mathbb{C}^{4 \times 1}$$

위 식을 영공간을 활용하여 나타내면 다시 아래와 같이 쓸 수 있다. 이 때, 셀 m 의 빔포머 v_{m1}, v_{m2} 는 서로 선형 독립이다.

$$\text{null}(v_{11}, v_{12}) = \text{span}(v_{21}, v_{22})$$

이 때, 행렬 $[v_{11}, v_{12}]$ 의 계수(rank)는 2 이므로, 영 공간의 차수는 2 이고 $\text{span}(v_{21}, v_{22})$ 의 차수는 2 이므로, 언제나 위 조건들을 만족하는 빔포머 집합을 만들 수 있음을 알 수 있다.

위와 같이 빔포머를 설계하면 기지국 i 에서의 zero-forcer $\mathbf{U}_i \in \mathbb{C}^{2 \times 2}$ 는 아래의 조건을 만족할 수 있도록 설계한다.

$$\text{span}(\mathbf{U}_i) = \text{null}(v_{j1}, v_{j2}), \quad j \neq i$$

위 빔포머 설계에 따른 네트워크 전송 자유도는 II.4 에서 언급하도록 한다.

II.3 릴레이 안테나 개수

제시한 네트워크에서는 II.1 에서 언급한 대로 최소 4 개의 릴레이 안테나가 필요하다. 이는 zero-forcing 디코더를 활용하여 유저의 신호를 릴레이에서 문제없이 디코딩 하기 위함이다.

이를 확장하여 C -셀, 셀-경계 K 유저 셀룰러 네트워크에서 제안한 기법을 활용하기 위해서는 릴레이 안테나 개수 N_R 은 아래와 같은 조건을 만족해야 한다.

$$N_R \geq CK$$

만약, 각 유저의 안테나 개수가 M 개라고 한다면, N_R 은 아래와 같은 조건을 만족해야 한다.

$$N_R \geq CKM$$

언급한 조건들이 만족된다면, II.2 에서 도시한 대로 각 셀의 신호를 분리해낼 수 있는 빔포머 집합의 존재성이 보장된다.

II.4 주파수 재사용 기법과의 비교

본 절에서는 제안한 기법을 사용한 시스템의 성능을 자유도 관점에서 기존 셀룰러 네트워크의 간섭 제어 기법인 주파수 재사용 기법과 비교한다. 시스템 모델은 II.1 에서 예시로 제시한 네트워크를 사용한다.

주파수 재사용 기법의 경우 2 개의 셀이 존재하므로 주파수 대역을 서로 나누어서 각 셀에 할당해야 한다. 이 경우, 자유도 측면에서 성능 열화가 절반만큼 발생한다. 그리고 각 셀 당 유저가 2 명이 있고 각각 안테나가 한 개 있으므로 총 두 개의 독립적 신호가 전송되고 기지국의 안테나 개수는 2 개이므로 이를 독립적으로 디코딩할 수 있다. 고로 네트워크의 총 전송 자유도는 $1 \times 2 \times 2 \times \frac{1}{2} = 2$ 이다.

제안한 기법의 경우, 빔포머 설계 및 기지국에서의 zero-forcing 을 통하여 각 기지국 간의 간섭은 제거할 수 있으므로 네트워크의 총 전송 자유도는 $1 \times 2 \times 2 = 4$ 로써 앞서 언급한 전송 자유도의 2 배가 됨을 확인할 수 있다. 이를 확장하여 C -셀 네트워크의 경우에는 기존의 주파수 재사용 기법에 비해서 전송 자유도를 C 배 만큼 더 얻을 수 있다.

II.5 추가 연구 사항

본 논문에서 제안한 기법을 심볼 확장과 결합하여 충분한 신호 공간을 유저-릴레이 전송 구간에서 확보한다면, 더 일반적인 릴레이 안테나 구성에서도 동작할 수 있으므로, 이 방향으로 제안한 기법을 확장한다.

추가로 셀룰러 네트워크 내에서 여러 개의 릴레이를 활용한다면, 릴레이 간 추가적인 간섭 정렬 기법의 적용이 필요하게 되므로 이 부분을 추가로 연구한다.

III. 결론

본 논문에서는 셀룰러 네트워크 내 셀-경계 유저가 간섭을 제어하기 위한 수단으로 활용하던 주파수 재사용 기법에 비교해서 간섭 정렬에 기반하여 전송 자유도 성능을 향상시킬 수 있는 기법을 제시하였다. 제안한 기법을 통해 기존 기법에 비해서 주파수 재사용으로 인한 성능 열화를 완화시킬 수 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] A. Goldsmith, "Wireless Communications, 2nd ed" Cambridge Univ. Press, 2005.
- [2] Ilan Shomorony, Amir Salman Avestimehr, "Degrees of Freedom of Two-Hop Wireless Networks: Everyone Gets the Entire Cake," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 60, no.5, pp.2417-2431, May. 2014.
- [3] Sunghyun Kim, I-Hsiang Wang, Changho Suh "A relay can increase degrees of freedom in bursty mimo interference networks," 2015 *IEEE International Symposium on Information Theory*, pp.1059-1063, June. 2015.