

실제 셀룰러 환경에서의 위상 구조를 고려한 3-셀 클러스터를 적용한 릴레이 활용 간섭 정렬

김호연^o, 문영식, 김재홍, 노종선

서울대학교 전기정보공학부

3-Cell Cluster Relay-Aided Interference Alignment Considering Realistic Cellular Environment

Ho-Youn Kim^o, Young-Sik Moon, Jae-Hong Kim, Jong-Seon No

Department of Electrical and Computer Science Engineering, Seoul National University

ferui@ccl.snu.ac.kr, myskill@ccl.snu.ac.kr, kilmd55@ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr

요 약

본 논문은 셀룰러 환경에서의 상향회선(Uplink) 통신에서의 간섭정렬에 대하여 다룬다. 상향회선 통신은 일반적으로 IMAC(Interfering Multiple Access Channel) 채널로 고려되나, 우리는 일반적으로 전제하는 셀의 육각구조와 네트워크의 위상적 구조를 고려하여 3 개의 셀을 하나의 클러스터(슈퍼 셀)로 고려하는 기법을 제시하고, 릴레이의 도움을 받아 셀 외부 실질적 간섭 분포까지 고려하는 간섭정렬 기법을 생각한다.

1. 서론

본 논문은 실제 셀룰러 환경을 가정한다. 셀룰러 통신은 상향회선 통신과 하향회선 통신으로 나뉘는데, 우리는 상향회선 통신을 다룬다. 보통 상향회선 통신은 단순 IMAC 으로 모델링이 되지만, 이는 셀룰러 네트워크의 위상적 구조를 전혀 고려하지 않는 모델이며, 이를 고려하여 만드는 3-셀 클러스터 구조가 이득이 있음을 보인다.

특히, 셀룰러 환경에서 기존 간섭정렬 기법들은 유저의 단말기를 통해서 간섭정렬을 달성하는데, 이는 비 현실적이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 릴레이의 도움을 받아서 간섭 문제를 해결하는 기법들이 최근까지 계속해서 연구가 되고 있다.

이 논문에서 우리는 3 개의 셀을 하나의 클러스터로 묶어서 1 개의 슈퍼 셀 단위로 간섭을 처리하며, 한 개의 클러스터에 한 개의 릴레이를 두어 간섭정렬을 달성한다. 이를 통해 릴레이 개수를 충분히 돕에 따라 실제 네트워크에서 한 곳에 집중적으로 몰리는 로드를 분산한다.

2. 시스템 모델

우리는 quasi-static flat fading 환경이 작용하는 multi-cell cellular network 상황을 생각한다. 이 네트워크는 셀이 C 개, 각 셀당 유저 K 명으로 구성되어 있다. 각 기지국과 단말기의 안테나 개수는 M 개로 동일하며, 릴레이에는 M_r 개의 전송 안테나, N_r 개의 수

신 안테나가 있다.

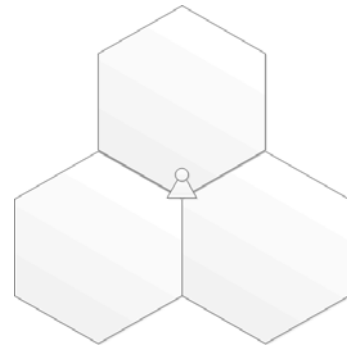


그림 1. 1 개의 릴레이를 중앙에 배치한 3-셀 클러스터링

Multi-cell cellular network 에서 그림 1 처럼 3-셀 클러스터링을 통하여, 전체 네트워크를 3 개의 셀끼리 묶어서 다시 나눈다. 그러면 우리는 클러스터 내 간섭정렬 문제와 클러스터 간 간섭정렬 문제로 전체 간섭정렬 문제를 나눌 수 있다. (그림 2)

$\mathbf{H}_{c,k}$, $\hat{\mathbf{H}}_{c,r}$, $\hat{\mathbf{H}}_{r,k}$ 는 각각 단말기와 기지국, 기지국과 릴레이, 릴레이와 단말기 사이의 채널 정보를 나타내는 각각 $M \times M$, $M \times M_r$, $N_r \times M$ 크기의 행렬이다.

t -th time slot 에 상향통신 단계에서 그림 2 를 참고하여 한 클러스터의 실질적인 간섭 지역을 고려하면, 기지국 c 에서 받은 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이 때, 실질적인 클러스터 간 간섭유저는

K 명이라고 생각한다. 이 때, 릴레이간 간섭은 파워 조절을 통해 존재하지 않는다고 가정한다.

$$y_c(t) = \sum_{k \in \mu(c)} \mathbf{H}_{c,k} \mathbf{x}_k(t) + \sum_{k \in \mu(c)} \mathbf{H}_{c,k} \mathbf{x}_k(t) + \sum_{k \in \mathcal{C}(c)} \hat{\mathbf{h}}_{c,r_{\mathcal{C}(c)}} \mathbf{G}_{r_{\mathcal{C}(c),t-1}} \tilde{\mathbf{H}}_{r_{\mathcal{C}(c),k}} \mathbf{x}_k(t-1) + \sum_{k \in \mathcal{B}(\mathcal{C}(c))} \hat{\mathbf{h}}_{c,r_{\mathcal{C}(c)}} \mathbf{G}_{r_{\mathcal{C}(c),t-1}} \tilde{\mathbf{H}}_{r_{\mathcal{C}(c),k}} \mathbf{x}_k(t-1) + \mathbf{n}_c(t)$$

$\mathcal{C}(c)$, $\mu(c)$, $\mathcal{B}(n)$ 는 각각 셀 c 가 속한 클러스터 집합, 셀 c 가 서비스를 제공하는 유저 집합 그리고 클러스터 n 의 경계유저 집합이다. $r_{\mathcal{C}(c)}$ 는 클러스터 $\mathcal{C}(c)$ 에 대응하는 릴레이이다. $\mathbf{G}_{r_{\mathcal{C}(c),t}}$ 는 t 번째 시간에 릴레이의 $M_r \times N_r$ 크기의 계수 행렬이다. 기지국에서의 총 노이즈 $\mathbf{n}_c(t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{n}_c(t) = \hat{\mathbf{h}}_{c,r_{\mathcal{C}(c)}} \mathbf{G}_{r_{\mathcal{C}(c),t-1}} \mathbf{n}'_r(t) + \mathbf{n}'_c(t)$$

$\mathbf{n}'_r(t)$ 는 릴레이에서의 노이즈, $\mathbf{n}'_c(t)$ 는 기지국에서의 노이즈이다. T -symbol extension을 거치면, 위의 신호는 아래와 같이 단순화할 수 있다.

$$\mathbf{y}_c = \sum_{k \in \mu(c)} \bar{\mathbf{H}}_{c,k} \mathbf{V}_k \mathbf{m}_k + \sum_{k \in \mu(c)} \bar{\mathbf{H}}_{c,k} \mathbf{V}_k \mathbf{m}_k + \mathbf{n}_c$$

$$\bar{\mathbf{H}}_{c,k} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{c,k} & & & & \\ \hat{\mathbf{h}}_{c,r_{\mathcal{C}(c)}} \mathbf{G}_{r_{\mathcal{C}(c),1}} \tilde{\mathbf{H}}_{r_{\mathcal{C}(c),k}} & & & & \\ & & & & \\ & & & & \mathbf{H}_{c,k} \\ & & & \hat{\mathbf{h}}_{c,r_{\mathcal{C}(c)}} \mathbf{G}_{r_{\mathcal{C}(c),t-1}} \tilde{\mathbf{H}}_{r_{\mathcal{C}(c),k}} & \mathbf{H}_{c,k} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{n}_c = [\mathbf{n}_c^T(1) \quad \mathbf{n}_c^T(2) \quad \dots \quad \mathbf{n}_c^T(T)]^T, \mathbf{y}_c = [\mathbf{y}_c^T(1) \quad \mathbf{y}_c^T(2) \quad \dots \quad \mathbf{y}_c^T(T)]^T$$

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{V} \otimes \mathbf{1}_{(K+1) \times 1}$$

\mathbf{V} 는 임의의 M 차원의 비정칙행렬이다.

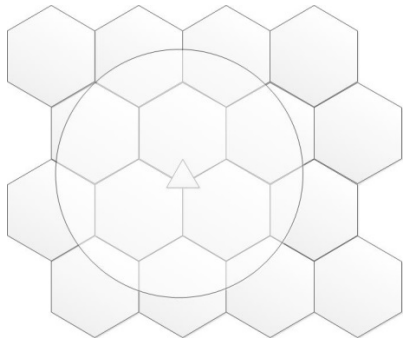


그림 1. 클러스터 간 간섭의 실질적 영향 범위

3. 3-셀 클러스터링의 이득

그림 1에서 보는 구조가 유일하게 클러스터 내부의 릴레이가 쓰는 파워를 클러스터 내 기지국에게 공평하게 분배할 수 있는 구조이다. 동시에 전체 네트워크를 동일한 모양의 슈퍼-셀로 왜곡 없이 분할할 수 있는 구조이다.

4. 전체 네트워크 간섭정렬 조건

일반적으로, 기지국 c 에서 간섭정렬을 위한 조건은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{span}(\bar{\mathbf{H}}_{c,k} \mathbf{V}_k) = \text{span}(\bar{\mathbf{H}}_{c,k'} \mathbf{V}_{k'}) \quad \forall k, k' \in \mu(c)$$

$$\text{rank}([\bar{\mathbf{H}}_{c,k_1} \mathbf{V}_{k_1}, \dots, \bar{\mathbf{H}}_{c,k_K} \mathbf{V}_{k_K}, \bar{\mathbf{H}}_{c,k'} \mathbf{V}_{k'}]) = dK + d, k_i \in \mu(c), k' \notin \mu(c)$$

위의 조건과 동치인 조건은 아래와 같다. 증명은 참고문헌 [1]을 참고한다.

$$\begin{pmatrix} \bar{\mathbf{h}}_{r_{\mathcal{C}(c),k}} \mathbf{H}_{c,k}^{-1} - \bar{\mathbf{h}}_{r_{\mathcal{C}(c),k'}} \mathbf{H}_{c,k'}^{-1} \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{h}}_{r_{\mathcal{C}(c),k}} \mathbf{H}_{c,k}^{-1} - \bar{\mathbf{h}}_{r_{\mathcal{C}(c),k'}} \mathbf{H}_{c,k'}^{-1} \end{pmatrix}^T \otimes \bar{\mathbf{h}}_{c,r_{\mathcal{C}(c)}} \text{vec}(\mathbf{G}_{r_{\mathcal{C}(c),t}})$$

$$= \begin{cases} 0_{M^2 \times 1}, & \forall k \notin \mu(c) \\ \text{vec}(\mathbf{F}_{c,t,k-(c-1)K}), & \forall k \in \mu(c) \end{cases}$$

$\mathbf{F}_{c,t,k-(c-1)K}$ 는 $\mathbf{S}_c = [\bar{\mathbf{H}}_{c,k_1} \mathbf{V}_{k_1}, \dots, \bar{\mathbf{H}}_{c,k_K} \mathbf{V}_{k_K}, \bar{\mathbf{H}}_{c,k'} \mathbf{V}_{k'}]$ 를 기본가우스 행 연산에 의해 얻은 upper-left의 항등행렬 부분을 제외한 lower-right $MK \times MK$ 크기의 서브정칙행렬의 $M \times M$ 서브 정칙행렬이다.

위의 결과를 토대로 $\mathbf{G}_{r_{\mathcal{C}(c),t}}$ 를 iterative 한 알고리즘을 통해 설계하여 간섭정렬을 달성할 수 있다.

5. 릴레이 안테나 개수&유저당 송신 자유도

제안된 기법은 4의 간섭정렬 조건을 만족하기 위하여 아래와 같은 릴레이 전송/수신 안테나 개수가 필요하다.

$$M^r = 3M$$

$$N^r = (4K - 1)M$$

이 때, 각 유저당 달성할 수 있는 송신 자유도는 아래와 같다.

$$\text{DoF} = \frac{MK}{K+1}$$

증명은 참고문헌 [1]을 참고한다.

6. 추가 연구 사항

제안된 기법은 클러스터 내/외부 간섭문제를 모두 릴레이를 통해 해결한다. 우리는 클러스터 외부 간섭은 빔포머 설계를 통해 해결하고 그로 인해 릴레이의 안테나 요구사항을 향상시키는 부분을 중점적으로 연구하고 있다. 추가로 실제적인 네트워크에서의 BER 성능을 보기 위해 Spatial channel model에서의 성능 검증에 착수하고 있다.

7. 참고 문헌

- [1] Xuesong Wang, Yong-Ping Zhang, Philipp Zhang, Xiaotao Ren, "Relay-aided Interference Alignment for MIMO Cellular Networks", *ISIT2012*, 2012.
- [2] Guillaud, M., Gesbert, D., "Interference Alignment in Partially Connected Interfering Multiple-Access and Broadcast Channels", *GLOBECOM 2011*, 2011.
- [3] Sujie Chen, Roger S., "Clustering for Interference Alignment in Multiuser Interference Network," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 63, no.6, pp. 2613-2624, July. 2014.