

논문 2011-48TC-9-1

순차적 선택 기반의 전송 기지국 클러스터 형성 방법

(A Base Station Clustering Method Based on Sequential Selection Approach)

유 형 길*, 성 원 진**

(Hyung-gil Yoo and Wonjin Sung)

요 약

본 논문에서는 셀룰러 이동통신 시스템에서 협력적으로 신호를 전송하는 기지국 집합인 클러스터를 효율적으로 생성하기 위한 방법을 제안한다. 이를 위해 선택된 클러스터 내 기지국들과 협력적 전송이 가능한 후보 기지국들 중 협력 전송에 참여 시 가중합 전송률 측면에서 최대의 이득을 줄 수 있는 기지국들을 순차적으로 선택하여 클러스터에 포함하는 방식을 사용한다. 특히 제안방식에서는 시스템 운용과 구현 측면에서의 복잡도를 고려하여 특정 협력 전송 클러스터에 포함될 수 있는 기지국의 개수를 제한하며, 또한 채널 환경의 변화에 따라 클러스터 조합이ダイナミック하게 변경됨을 특징으로 한다. 기존의 비협력 전송 방식 및 고정된 클러스터 방식과의 컴퓨터 시뮬레이션을 활용한 비교를 통해 순차적 선택 기반 클러스터 형성 방식이 특히 평균 전송률 측면의 하위 사용자 성능을 향상시키는 효과가 있음을 보임으로써 사용자 간의 공평성 문제를 개선할 수 있는 방식임을 입증한다.

Abstract

In this paper, we propose an efficient method to create clusters of geographically distributed base stations which cooperatively transmit signals in cellular mobile communication systems. The proposed method utilizes a sequential selection approach to choose candidate base stations which can provide maximum weighted sum-rate gain when they participate in the cooperative transmission with the existing cluster. In particular, the proposed method limits the maximum number of base stations in a cluster by considering the system operational and implementation complexities. Moreover, the combinations of clusters dynamically change along with variations of channel environments. Through computer simulations, performance of the proposed method is verified by comparing with the non-cooperative transmission method and the static clustering method. Numerical result shows that the proposed sequential selection based clustering method is especially advantageous for the performance improvement of lower percentile users in terms of average throughput, and thus the proposed method can effectively improve the fairness among users.

Keywords : 다중 사용자 MIMO, 기지국 클러스터, 가중합 전송률 최대화, 협력전송 시스템

I. 서 론

최근 이동통신 시스템의 다중 셀 내 존재하는 지리적

으로 분산된 기지국들과 다중 셀 내 존재하는 다수 단말 간의 협력적 전송(CoMP, coordinated multi-point transmission and reception)을 통해 송수신 신호의 품질을 높이고 전체 시스템의 용량을 증대하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1~2] 이에 관련해 현재 3GPP 표준화 그룹에서는 LTE-Advanced에 새롭게 적용될 핵심 후보 기술 중 하나인 CoMP에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다.^[3] 특히 다중 셀 내 기지국 간 협력적 신호 전송 기술은 이동통신 셀룰러 이동통신의 성능에 가장 큰 열화요인으로 작용하는 셀 간 간섭

* 학생회원, ** 평생회원, 서강대학교 전자공학과
(Department of Electronic Engineering, Sogang University)

※ 이 논문은 2011년도 중견연구자지원사업 (한국연구재단 과제번호 2011-0016146) 및 대학 IT 연구센터 지원사업 (NIPA-2011-C1090-1131-0009)의 연구결과로 수행되었음.

접수일자: 2011년6월8일, 수정완료일: 2011년9월16일

(ICI, inter-cell interference)을 가장 효과적이고 적극적으로 완화할 수 있는 방법 중 하나이다.

동일한 주파수 또는 시간 자원을 활용하여 협력적으로 신호를 전송 하는 다중 셀 내 기지국 집합을 클러스터로 정의할 때, 동일 클러스터 내 협력적으로 신호를 전송 받는 단말의 개수에 따라 단일 사용자를 위한 협력적 전송과 다중 사용자를 위한 협력적 전송으로 분류가 가능하다. 단일 사용자를 위한 협력적 전송은 해당 사용자의 신호 품질을 최대화할 수 있는 장점이 있지만, 다수 개의 기지국 안테나를 활용한 공간 다중화 이득이 줄어드는 단점이 있다. 이에 반하여 다중 사용자를 위한 협력적 전송은 사용자 간 간섭 (IUI, inter-user interference)이 발생할 수 있다는 단점이 있으나, 이를 효과적으로 잘 완화시킬 경우 높은 주파수 효율을 얻을 수 있다는 장점이 있다.^{[4][5]}

동일 클러스터 내에서 다중 사용자를 위한 협력적 전송 시 IUI를 줄이기 위한 방안으로는 클러스터 내 다중 안테나를 활용하여 최소평균 자승오차 (MMSE, minimum mean squared error) 또는 강제 영점형성 (ZF, zero-forcing) 빔포밍을 수행하는 방법이 있다. 이러한 빔포밍 방식과 함께 클러스터 내 사용자들의 채널 상태 정보 (CSI, channel state information) 정보에 기반하여 사용자들이 서로에게 미치는 간섭의 영향을 고려하여 각 사용자에게 할당되는 전력을 다르게 분배하는 전력제어 방식을 사용할 수 있다.^[6~7] 또한 빔포밍 방식과 전력제어 방식을 결합하여 IUI를 줄이면서도 주파수 효율을 높이기 위한 송신 신호 전처리 과정을 수행하는 방식을 프리코딩 기법이라 명명하며, 이에 관련한 활발한 연구가 진행 중이다.

비록 클러스터에 포함되는 협력 전송 기지국의 개수의 증가에 따라 ICI의 영향을 효과적으로 감소시킬 수는 있으나, 실질적인 시스템 구현 및 운영 복잡도를 고려할 때 클러스터 내 기지국 개수의 제한 없는 증가는 바람직하지 않다. 이러한 복잡도의 원인으로는 동일 클러스터 내 기지국 간 공유가 요구되는 제어 신호 및 전송 데이터의 교환으로 인한 오버헤드의 증가뿐만 아니라, 다수 개의 기지국 채널 정보를 추정하기 위해 증가되는 파일럿 신호에 의한 주파수 효율의 감소 및 채널 정보 추정 오류의 증가 등이 있다. 따라서 이러한 다양한 현실적 요인들 및 ICI 감소에 의한 이득을 종합적으로 고려하여 클러스터 내 기지국의 개수를 적절히 결정하는 것이 바람직하다.^[8~9] 그러나 클러스터의 크기가

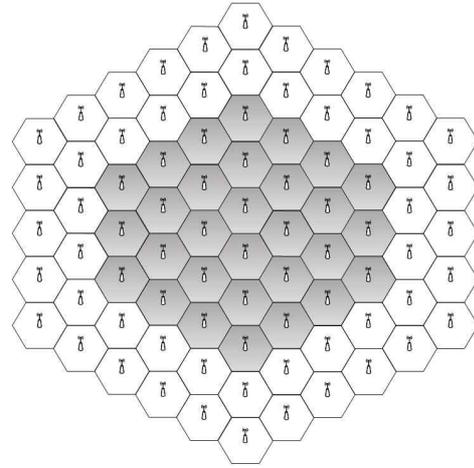


그림 1. 셀룰러 시스템 모델

Fig. 1. Cellular system model.

제한 될 경우에는 외부 클러스터에서 송신하는 신호에 의해 클러스터 간 간섭이 발생하게 되며, 이는 특히 클러스터 경계 지역에 위치하는 단말에게 있어 주요한 성능열화 요인으로 작용하게 된다.

본 논문에서는 다중 셀 내 기지국 간 협력적 전송을 사용하는 시스템에서 인접 셀 간 간섭, 사용자 간 간섭 뿐 아니라 인접 클러스터 간 간섭의 영향을 효율적으로 줄일 수 있는 클러스터 형성 방식을 제안한다. 이를 위해 클러스터들의 조합을 적응적으로 변경하여 운용하는 방법을 사용하여 특정 사용자가 클러스터 경계에 위치하지 않도록 제어하며, 또한 현실적인 구현 및 운영 복잡도를 고려하여 채널 상태 정보의 추정 정확도를 포함하는 일반적인 시스템 운용환경 요인들에 따라 클러스터 내 협력 전송 기지국의 개수를 제한할 수 있는 방안을 제시하는 것을 목적으로 한다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 협력 클러스터를 구성하는 방식과 클러스터링 방식 별 평균 전송률의 누적 분포 함수 (CDF, cumulative distribution function)를 비교하여 분석한다.

이하의 구성은 다음과 같다. II장에서 시스템 모델과 신호 모델을 정의하며, III장에서는 협력 전송을 위한 가중합 전송률을 최대화 하는 스케줄링 및 프리코딩 행렬을 결정하는 방법에 대하여 설명한다. IV장에서는 지리적으로 분산되어 있는 다수의 기지국들이 협력 클러스터를 구성하는 방안을 제시하고, 이어서 순차적 선택 기반의 전송 기지국 클러스터링 방식을 제안한다. V장에서는 클러스터링 방식 별 평균 전송률을 통해 성능을 비교 및 분석하며, VI장에서는 결론을 맺는다.

II. 신호 및 시스템 모델

이동통신 셀룰러 시스템은 다수 개의 셀들로 구성되어 있으며, 각각의 셀에는 신호 전송을 담당하는 기지국이 위치한다. 다중 셀 내 기지국 간 협력적 전송을 고려하는 경우에는 동일 클러스터에 포함된 단말들은 클러스터 내 다수 개의 기지국들과 MIMO 채널을 이루게 되어 공간 다중화 기법을 사용하여 동시에 서비스를 제공받을 수 있다. 그림 1에서는 총 80개의 셀들이 존재하는 시스템을 예시하고 있으며, 그 중 짙은 색으로 표시된 $N_C = 30$ 개의 셀들은 기지국 간 협력적 전송을 위한 클러스터에 포함이 가능한 최대 영역을 나타낸다. 현실적인 시스템에서는 클러스터 내 기지국 간 협력 전송의 운용 복잡도를 고려할 때 임의의 클러스터 내에 포함될 수 있는 협력 기지국의 최대 개수에 제한을 두는 것이 바람직하다. i 번째 클러스터 내에 M_i 개의 기지국이 포함되어 있다면, i 번째 클러스터 기지국 집합은

$$c_i = \{b_1, b_2, \dots, b_{M_i}\} \quad (1)$$

와 같이 정의하며, 시스템 내에 이러한 클러스터가 I 개 있는 경우 클러스터 조합을

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_I\} \quad (2)$$

와 같은 집합으로 표현할 수 있다.

클러스터 별로 항상 고정된 협력 전송 기지국을 갖는 방식의 예시를 그림 2에서 나타내고 있다. 동일한 밝기로 표기된 셀들은 동일한 클러스터에 포함됨을 의미하

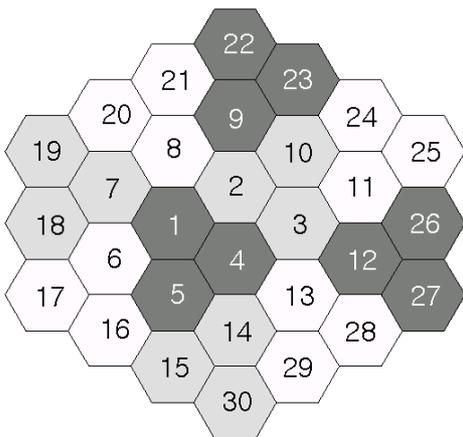


그림 2. 클러스터링 조합의 예시 (3-cell static cluster)
Fig. 2. An example of the clustering combination (3-cell static cluster).

며, 각 클러스터는 3개의 기지국들로 구성되어 있다. 따라서 이를 C 집합으로 표시하면 다음과 같다.

$$C = \{c_1, c_2, \dots, c_{10}\} \quad (3)$$

$$= \{\{1,4,5\}, \{2,3,10\}, \dots, \{14,15,30\}\}.$$

수식 (1)과 같이 i 번째 클러스터에 포함된 기지국 개수를 M_i 이라 하고 신호 전송을 위해 스케줄러에 의해 선택된 단일 안테나 사용자 단말의 수를 K 라 정의하면, k 번째 사용자의 채널 벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$\mathbf{h}_k = [h_{k1}, \dots, h_{kM_i}], \quad k \in K \text{ and } m \in M_i \quad (4)$$

이때 h_{km} 은 k 번째 단말과 m 번째 기지국 사이의 채널을 의미하게 된다. 또한, i 번째 클러스터 내 송수신 MIMO 채널을 $\mathbf{H}_i = [\mathbf{h}_1^T, \dots, \mathbf{h}_K^T]^T$ 와 같이 $K \times M_i$ 행렬로 정의할 수 있다. 이하에서는 표기의 간략화를 위해 클러스터 인덱스 i 는 혼란이 없는 한 수식에서 제외하도록 한다. 해당 클러스터 내에서 K 개의 단말이 받는 수신 신호는

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{G}\mathbf{d} + \mathbf{z} \quad (5)$$

와 같이 표현이 가능하며, 모든 행렬 및 벡터들은 복소 심볼을 원소로 갖는다. 이때, \mathbf{G} 는 송신 신호의 선처리를 위한 프리코딩 행렬로써 각 안테나 당 전송 가능한 최대 전력이 P_m 이라 하면

$$\sum_{k=1}^K |g_{mk}|^2 \leq P_m, \quad m = 1, \dots, M \quad (6)$$

와 같은 안테나 별 전력구속조건 (PAPC, per-antenna power constraints) 조건을 만족하여야 한다. 협력 기지국에서 단말을 위해 전송하고자 하는 데이터 심볼 벡터를 $\mathbf{d} = [d_1, \dots, d_K]^T$ 로 표기한다. 외부 클러스터로부터의 간섭 신호 및 수신기에서의 열잡음 벡터는 $\mathbf{z} = [z_1, \dots, z_K]^T$ 로 표현할 수 있으며, 각각의 원소 z_k 의 평균 전력을 $\sigma_k^2 = E[|z_k|^2]$ 으로 정의한다.

클러스터 내 k 번째 단말의 순간 전송률은 해당 단말이 스케줄러에 의해 서비스를 받도록 선택을 받은 경우

$$R_k = \log_2 \left(1 + \frac{\|\mathbf{h}_k^H \mathbf{g}_k\|^2}{\sum_{j \neq k} \|\mathbf{h}_k^H \mathbf{g}_j\|^2 + \sigma_k^2} \right) \quad (7)$$

와 같이 정의되며,^[10] 해당 단말이 스케줄러에 의해 선택 받지 못한 경우에는 $R_k = 0$ 이 된다. 또한 moving average 방식에 의하여 해당 단말의 평균 전송률은

$$T_k \leftarrow \left(1 - \frac{1}{t_c}\right) T_k + \frac{1}{t_c} R_k \quad (8)$$

와 같이 업데이트 되며, t_c 는 moving average window size를 의미하는 값으로써 t_c 가 클수록 순간 전송률 R_k 의 변화가 평균 전송률 T_k 에 미치는 영향이 작아지게 된다.

III. 협력전송을 위한 스케줄링 및 프리코딩

프리코딩은 빔포밍 행렬 \mathbf{W} 와 전력제어 행렬 \mathbf{Q} 를 사용하여 $\mathbf{G} = \mathbf{W}\mathbf{Q}^{1/2}$ 와 같이 표현할 수 있다. ZF 빔포밍을 적용하는 경우 빔포밍 행렬 \mathbf{W} 는

$$\mathbf{W} = \mathbf{H}^H(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)^{-1} \quad (9)$$

와 같이 표현된다. 전력제어 행렬 \mathbf{Q} 는

$$\mathbf{Q} = \text{diag}\{q_1, \dots, q_K\}, \text{ where } q_k = q / \|\mathbf{w}_k\|^2 \quad (10)$$

와 같이 각 사용자에게 전달되는 송신전력이 q 의 값을 갖게 하며, 이때 q 는 수식 (6)의 PAPC 조건을 등식으로 만족시킬 수 있는 최대값으로 결정된다.

클러스터로 정의된 협력 셀들 내에 존재하는 사용자들을 대상으로 비례적 공정 (PF, proportional fair) 기반의 가중합 전송률 최대화 순차적 사용자 선택방식을 적용한다. 이는 k 번째 단말의 가중치는 $w_k = 1/T_k$ 와 같이 수식 (8)에서 업데이트 된 사용자 별 평균 전송률의 역수를 가중치로 활용하며, 수식 (7)의 순간 전송률에 사용자 별 가중치를 포함하여 동시에 서비스를 제공 받을 사용자의 가중합 전송률을 최대로 할 수 있는 사용자를 순차적으로 선택해가는 방식이다.^[11~12]

클러스터 c_i 에 포함되어 있는 사용자 인덱스 집합을 U 라고 하고, 스케줄링 되어 동시에 서비스를 받을 다중 사용자 인덱스 집합을 S_{c_i} 라 정의하면, 첫 번째 사용자의 경우 앞서 선택된 단말이 없으므로 클러스터 내 IUI에 의한 영향을 받지 않기 때문에 단일 사용자를 위한 가중 전송률만을 고려하여 아래와 같이 선택하고,

$$S_{c_i}(1) = \arg \max_{k \in U} w_k \log \left(1 + \frac{\|\mathbf{h}_k^H\|^2}{\sigma_k^2} \right) \quad (11)$$

2번째부터 M 번째 사용자의 경우는 기 선택되어 스케줄링 집합 S 내에 포함된 사용자 단말로부터 주고받는 IUI의 영향을 고려하여 스케줄링을 수행하게 된다. 이미 선택된 단말들과 클러스터 내 협력전송 기지국들과의 채널 행렬을 \mathbf{H}_S 라 할 때, n 번째 사용자 후보인 인덱스 k 를 포함한 $n \times M$ 채널을 $\mathbf{H}(k) = [\mathbf{H}_S^T \ \mathbf{h}_k^T]^T$ 와 같이 정의하고, 정의된 $\mathbf{H}(k)$ 채널을 위한 프리코딩 행렬을 $\mathbf{G}(k) = [\mathbf{g}_1(k) \ \dots \ \mathbf{g}_{n-1}(k) \ \mathbf{g}_n(k)]$ 로 표기한다. 이미 선택된 사용자들과 n 번째 사용자 후보와의 가중합 전송률을 고려한 선택은

$$S_{c_i}(n) = \arg \max_{k \in U, k \notin S} \sum_{i \in \{S, k\}} w_i \log \left(1 + \frac{\|\mathbf{h}_i^H \mathbf{g}_i(k)\|^2}{\sum_{j \neq i} \|\mathbf{h}_i^H \mathbf{g}_j(k)\|^2 + \sigma_i^2} \right) \quad (12)$$

와 같이 수행된다. 클러스터 내에 선택 가능한 최대 개수의 사용자를 모두 선택 후, 그 중 클러스터 내의 가중합 전송률을 최대로 할 수 있는 사용자들만 부분적으로 선택하는 rank adaptation을 추가로 고려하게 된다.

IV. 순차적 선택 기반의 클러스터 형성 방법

클러스터 간 간섭에 의해 큰 성능 감소를 보이는 단말은 주로 클러스터 간 경계 영역에 위치한 단말이다. 그러므로 주기적 또는 비주기적으로 클러스터 조합을 새로 생성하는 방법을 사용함으로써 각 사용자 단말들이 항상 클러스터의 경계 지역에 위치하게 되는 상황을 방지할 수 있으며, 이로 인해 클러스터 간 간섭에 의한 성능 감소를 효과적으로 방지할 수 있게 된다. 따라서 본 장에서는 선택된 클러스터 내 기지국들과 협력적 전송이 가능한 후보 기지국들 중 협력 전송에 참여 시 최대의 이득을 줄 수 있는 기지국들을 순차적으로 선택하여 클러스터에 포함하는 방식을 제시한다. 순차적으로 클러스터 조합을 결정하는 방식을 사용함으로써 매 time-frame 마다 협력 전송 기지국들은 단말과 기지국의 지리적 위치의 변화, 경로 손실, 쉐도잉, 페이딩을 포함하는 채널 상태 정보의 변화, 그리고 사용자 단말의 평균 전송률 및 그에 따른 가중치 값들의 변화들을 포함하는 다양한 요인들에 의해서 유동적으로 변화할 수 있다. 협력 전송 클러스터가 유동적으로 변화함에 따라 클러스터 간 경계 영역이 또한 유동적으로 변화하는 특징을 갖게 되어 셀 경계에 위치한 단말에 대한 클러스

터 간 간섭을 효과적으로 줄일 수 있다.

제안하는 순차적 기지국 선택 기반의 클러스터 조합 생성 알고리즘은 가중합 전송률을 기반으로 하여 이를 최대화 할 수 있는 협력 전송 기지국 클러스터들을 생성하는 방식으로, 클러스터 조합 결정 방식은 표 1의 알고리즘으로 표현되며, 이는 구체적으로 아래에서 설명하는 초기화 단계, 클러스터 생성단계, 및 클러스터 확장 단계의 3 단계로 이루어진다.

1. 초기화 단계

초기화 단계에서는 클러스터 내 포함 가능한 협력 전송 기지국의 최대 개수를 제한하는 M_C 값을 정하게 되며, 이 M_C 값은 a) 단말 또는 시스템의 채널 상태정보 추정 방식 및 그 정확도, b) 기지국 간 협력전송을 위한 제어 신호 및 데이터 신호 공유 방법, c) 기지국 간 협력전송 방식, d) 시스템 내 기지국의 지리적 분포 정보 등을 포함하는 다양한 시스템 운용 환경 요인들에 의해 결정될 수 있다. 또한, 클러스터 인덱스를 $i = 1$ 로 설정하며, 클러스터 집합 $C = \{\emptyset\}$ 및 선택되지 않은 기지국 집합 $D = \{1, 2, \dots, N_C\}$ 을 초기화한다.

2. 클러스터 생성 단계

클러스터 생성 단계는 선택되지 않은 기지국 집합 D 에 속한 기지국 들 중에서 i 번째 클러스터에 포함될 첫 번째 기지국을 선정하는 단계이다. 선택되지 않은 기지국이 없는 경우, 즉 $D = \{\emptyset\}$ 가 될 경우에는 알고리즘을 종료하고, 선택할 셀이 있는 경우에는 D 집합에 포함된 셀 내에 존재하는 단말들의 평균 전송률이 가장 낮은 임의의 기지국 b_i 를 선택하며, 선택된 기지국 b_i 을 i 번째 클러스터 집합 c_i 에 포함시켜 클러스터 크기 l 을 1로 업데이트 하며, 동시에 D 집합에서 제외시키는 동작을 수행하게 된다. 클러스터 생성 단계에서 선택된 기지국 b_i 를 기준으로 하여 클러스터 확장 단계에서 가중합 전송률을 최대화 하는 방향으로 협력 전송 기지국 클러스터 크기를 확장하게 된다.

3. 클러스터 확장 단계

클러스터 집합 c_i 와 협력적 전송이 가능한 기지국들의 후보들을 집합 B 라 할 때, 집합 B 는 c_i 와 인접한 셀들 내에 소속된 기지국으로 한정하여 생성한다. 만약 클러스터 크기를 나타내는 파라미터 l 이 M_C 보다 크거나, 집합 B 내의 기지국 후보들이 존재하지 않을 경우

표 1. 순차적 선택 기반의 클러스터 형성 알고리즘
Table 1. Clustering method based on sequential selection algorithm.

<pre> step 1) 초기화 단계 Set $M_C, i = 1$ Set $D = \{1, 2, \dots, N_C\}$ step 2) 클러스터 생성 단계 if $U = \{\emptyset\}$ then END else if Find b_i such that $b_i = \operatorname{argmin}_{b \in S} \sum T_{U_b}$ Update $c_i \leftarrow \{c_i \cup b_i\}$ Update $D \leftarrow D / \{b_i\}$ $l = 1$ end if step 3) 클러스터 확장 단계 Set $B = \{b / c_i \text{와 인접한 셀}\}$ While $l \leq M_C, B \neq \emptyset$ do $l = l + 1$ Find b_l such that $b_l = \operatorname{argmax}_{b \in B} \{f_{\text{WSR}}(\{c_i \cup b\})\}$ if $f_{\text{WSR}}(c_i) + f_{\text{WSR}}(b_l) \geq f_{\text{WSR}}(\{c_i \cup b\})$ then $i = i + 1$ go to step 2) else if Update $c_i \leftarrow \{c_i \cup b_l\}$ Update $D \leftarrow D / \{b_l\}$ end if end while $i = i + 1$ go to step 2) </pre>
--

클러스터 확장을 중단하고 클러스터 인덱스 i 를 증가시킨 후 두번째 단계인 클러스터 생성 단계로 이동하여 새로운 클러스터를 생성한다. 반면에 집합 B 에 선택할 셀이 남아 있는 경우 $l = l + 1$ 로 업데이트한 후 협력 전송 이득이 최대인 기지국 b_l 을 선택하여 클러스터를

확장시키며, $\alpha = \{c_i \cup b\}$ 로 정의되는 클러스터 내에 포함되는 협력 전송 기지국들과 그에 소속된 사용자 단말 집합 S_α 을 대상으로 얻어질 수 있는 가중합 전송률의 기대치를 계산하는 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$f_{\text{WSR}}(\alpha) = \sum_{i \in S_\alpha} w_i R_i, \quad \text{where } \alpha = \{c_i \cup b\} \quad (13)$$

가중합 전송률의 기대치 계산을 위해서는 수식 (11), 수식 (12)와 같이 클러스터에 포함된 단말들을 대상으로 현재 순간에 서비스를 받을 K 명의 사용자를 선택하는 스케줄링 과정과 스케줄링 받은 사용자를 대상으로 한 송신 신호 선처리를 위한 프리코딩 행렬 \mathbf{G} 를 생성하는 과정이 함께 이루어져야 한다.

협력전송 이득이 최대인 기지국 b_l 을 선택하기 위한 방법으로는

$$b_l = \underset{b \in B}{\operatorname{argmax}} \{f_{\text{WSR}}(\{c_i \cup b\})\} \quad (14)$$

와 같이 협력전송의 기대값이 가장 큰 기지국을 선택하며, b_l 을 선택하면, 클러스터 집합 c_i 내 기지국들과 선택된 기지국 b_l 내 기지국 간의 협력 전송의 기대값 $f_{\text{WSR}}(\{c_i \cup b_l\})$ 과 비협력 전송의 기대값 $f_{\text{WSR}}(c_i) + f_{\text{WSR}}(b_l)$ 을 비교하여 비협력 전송의 기대값이 큰 경우 $i = i + 1$ 로 업데이트 후 클러스터의 확장을 중단하고 새로운 클러스터 생성 단계로 이동하며, 협력 전송의 기대값이 큰 경우 $c_i \leftarrow \{c_i \cup b_l\}$ 와 같이 클러스터 집합 c_i 에 기지국 b_l 을 포함하고, 클러스터 확장 단계를 반복 수행하게 된다.

V. 성능 평가

제안된 순차적 기지국 선택 기반의 클러스터 조합 생성 알고리즘에 의하여 지리적으로 분산되어 있는 다중 셀 내 기지국들이 협력적으로 신호를 전송하는 클러스터 집합을 효율적으로 구성할 수 있으며, 이는 비협력 전송만을 고려하는 셀룰러 이동통신의 가장 큰 성능 열화요인으로 손꼽히는 셀 간 간섭을 효과적으로 감소시킬 수 있다. 뿐만 아니라 제안 방식에서는 클러스터를 구성하는 협력 전송 기지국들이 주변 환경의 변화에 따라 유동적으로 변화하기 때문에 클러스터 경계가 고정되어 있지 않다는 특징을 가지며, 이는 특히 클러스터 간 경계 영역에서 크게 발생하는 클러스터 간 간섭에

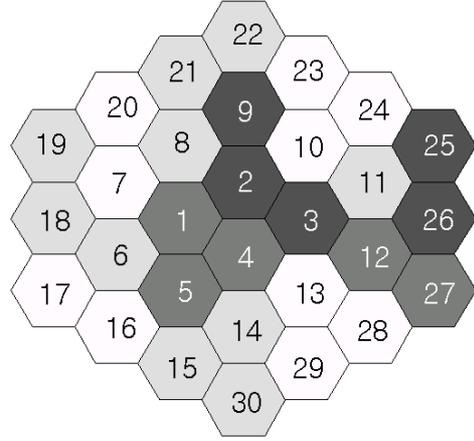


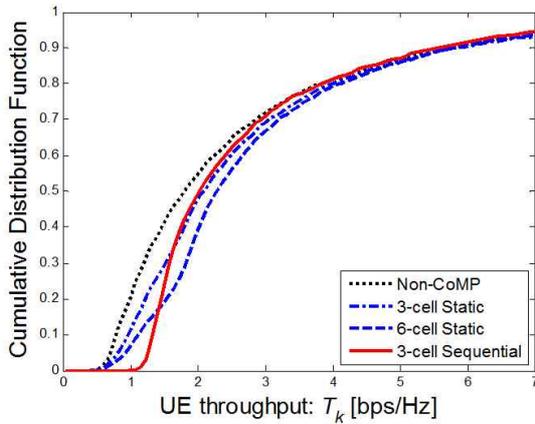
그림 3. 순차적 선택 기반의 클러스터링 조합의 예시 (3-cell sequential cluster)

Fig. 3. An example of the sequential selection based clustering combination (3-cell sequential cluster).

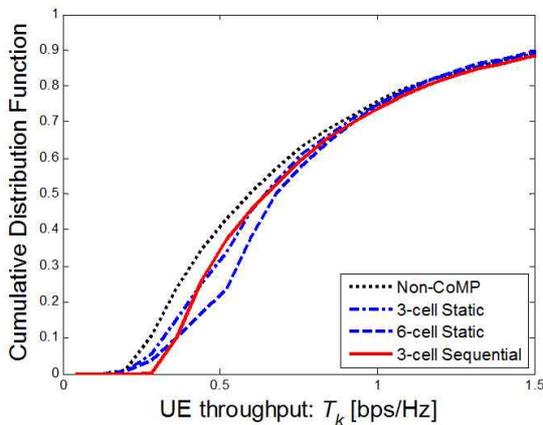
의한 성능 감소를 방지할 수 있다.

제안 방식의 성능 평가를 위해 다음과 같은 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 시스템 모델은 그림 1에서 예시한 80개의 셀로 이루어지는 환경을 사용하였으며, 각 셀에서는 옴니 안테나를 고려하여 빔패턴에 의한 영향을 고려하지 않았다. 또한 시스템 내 기지국 및 단말들은 모두 단일 안테나를 가지고 있으며, 기지국 안테나의 최대 출력은 24dBm을 넘지 않도록 PAPC 전력 제한 조건을 사용하였으며, 수식 (9)의 빔포밍 행렬 \mathbf{W} 는 ZF 빔포밍을 적용하여 클러스터 내에 IUI가 발생하지 않게 하였다. 실험을 위해 각 셀 당 5명의 사용자를 발생시켰으며 ($N_U = 5$) 데이터의 신뢰도를 향상시키기 위하여 각 단말 당 40회씩 셀 내 균일하게 분포하는 과정을 수행하였으며, 고정된 단말 위치에 대하여 500회의 time-frame을 진행하였다. 각각의 time-frame내에서는 채널 값이 고정되며, 서로 다른 time-frame 간에는 채널 값이 독립적으로 변화한다.

그림 3은 $M_C = 3$ 을 적용한 3-cell sequential의 특정 time-frame에서의 클러스터 형성 예시를 나타내고 있다. 3-cell static과 달리 제안 방식을 적용한 경우에는 클러스터 별로 다양한 개수의 협력 셀을 포함할 수 있다. 또한 협력 셀이 3개인 경우에도 3-cell static은 항상 서로 마주보는 3개의 셀이 협력 클러스터를 이루는 반면, 제안 방식은 $\{2, 3, 9\}$, $\{6, 18, 19\}$, $\{8, 21, 22\}$ 의



(a) 셀 당 1명의 사용자 존재할 경우
(a) The case of one user exists in each cell.



(b) 셀 당 5명의 사용자 존재할 경우
(b) The case of five user exists in each cell.

그림 4. 클러스터링 방식에 따른 평균 사용자 전송률 CDF
Fig. 4. CDF of average user throughput according to the clustering method.

협력전송 클러스터 집합에서 보는 바와 같이 클러스터를 구성하는 협력 셀들의 지리적 분포 또한 다양한 특징을 가질 수 있음을 알 수 있다.

그림 4의 (a), (b)에서는 클러스터에 포함이 가능한 협력 전송 기지국 개수의 제한을 $M_C = 3$ 으로 설정하고, 각 셀당 1명 혹은 5명의 사용자가 발생할 경우 제안 방식을 사용한 성과와 (3-cell Sequential), 비협력 전송 방식의 성능 (Non-CoMP), 그리고 클러스터 별로 항상 고정된 협력 전송 기지국을 갖는 3-cell, 6-cell Static의 성능을 비교하여 나타내었다. 그림 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 셀 간 경계 및 클러스터 간 경계 영역에 의해 하위 사용자의 성능이 심하게 감소하는 기존 방식

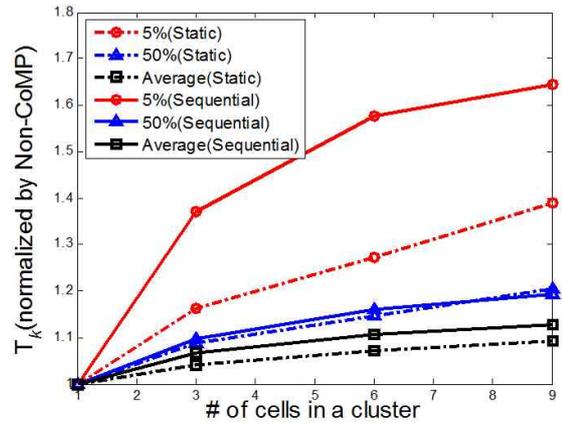


그림 5. 클러스터 제한 크기에 따른 비협력 전송 대비 5%, 50%, 평균 성능 이득 ($N_U = 5$)
Fig. 5. 5%, 50%, average performance gain compared to Non-CoMP according to limitation of the cluster size ($N_U = 5$).

표 2. 평균 사용자 전송률(T_k)의 5%, 50%, 평균 비교 ($M_C = 3, N_U = 5$)
Table 2. 5%, 50%, average of the average user throughput ($M_C = 3, N_U = 5$).

T_k	Non-CoMP	3-cell Static	3-cell Sequential
5 %	0.23 (100.0%)	0.27 (116.3%)	0.32 (137.1%)
50 %	0.59 (100.0%)	0.64 (108.7%)	0.65 (109.6%)
Average	0.82 (100.0%)	0.85 (104.1%)	0.88 (106.7%)

들과 비교한 경우 제안 방식은 하위 사용자의 성능을 크게 향상시킴을 확인할 수 있다. 특히 하위 5% 성능은 6-cell Static 방식과 비교해도 뒤지지 않으며, 이는 제안 방식이 상대적으로 작은 크기의 클러스터로 하위 사용자의 성능 향상을 가져올 수 있으며, 셀 간 간섭뿐 아니라 인접 클러스터 간 간섭의 영향을 효과적으로 억제할 수 있는 방식임을 보여준다. 또한 셀 당 사용자 수가 증가할수록 스케줄링에 의해 선택받는 빈도 수가 줄어들기 때문에 사용자 별 평균 전송률은 감소하는 것을 확인할 수 있다.

그림 5에서는 M_C 에 따른 5%, 50%, 평균 영역에서의 평균 사용자 전송률을 비협력 전송 방식에 정규화 하여 비협력 전송 방식에 비해 static 및 sequential 방식이 얼마나 성능 이득을 보이는지 나타내었다. M_C 가 1인 경우 각각의 클러스터에 하나의 기지국만 속하게 되므로 비협력 전송의 경우가 되며, M_C 가 3, 6, 9로 증가할수록 사용자 별 평균 전송률이 증가하며, 특히 5%에 위

치한 제안된 sequential 방식을 사용한 하위 사용자들의 성능 향상 폭이 가장 큰 것을 확인하였다.

$M_C = 3$ 을 적용한 제안방식인 3-cell Sequential 방식과 기존의 방식인 Non-CoMP, 3-cell Static의 평균 사용자 전송률의 성능을 표 2에서 비교하였다. 제안 방식은 5%, 50%. 평균 모두 전 영역에서 기존 방식 대비 성능 이득이 발생하였으며, 특히 제안 방식의 5% 하위 사용자의 성능 이득은 비협력 전송 대비 37.1%의 성능 향상을 확인할 수 있으며, 셀 간 간섭뿐 아니라 클러스터 간 간섭 완화 효과에 의하여 하위 사용자 영역에서의 성능 이득이 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 이동통신 시스템의 셀 경계의 사용자가 받는 인접 셀 간섭에 의한 성능 열화를 극복하기 위해 기지국 간 협력 MIMO 기술을 고려하였으며, 특히 기지국 간 협력 MIMO 시스템에서 순차적 선택 기반의 전송 기지국 클러스터 형성 기법을 제안하였다. 제안하는 방식은 채널 환경에 따라 협력전송 클러스터가 유동적으로 변화시킨다는 특징을 가지며, 이는 기존에 고정된 클러스터를 갖는 방식 대비 작은 개수의 기지국 간 협력을 통해서도 더욱 높은 평균 전송률 측면에서의 하위 사용자 성능 이득을 보장한다. 클러스터 내 협력 전송 기지국 개수를 줄임으로써 시스템의 운용 및 구현 복잡도를 줄이고 하위 사용자의 성능 향상을 통해 사용자 간 공평성을 보장해 줄 수 있는 제안 방식의 장점을 고려할 때, 현재 활발히 표준화 작업이 진행 중인 기지국 간 협력 전송을 사용하는 차세대 이동통신 시스템에서 활용 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] H. Zhang, H. Dai, and Q. Zhou, "Base station cooperation for multiuser MIMO: Joint transmission and BS selection," in *Proc. IEEE CISS'04*, Mar. 2004, pp. 1-6.
- [2] H. Dai, A. F. Molisch, and H. V. Poor, "Downlink capacity of interference-limited MIMO systems with joint detection," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 2, pp. 442-453, Mar. 2004.
- [3] 3GPP, TR 36.814, "Further Advancements for E-UTRA; Physical Layer Aspects"
- [4] G. Caire and S. Shamai, "On the achievable throughput of a multiantenna Gaussian broadcast channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 7, pp. 1692-1706, Jul. 2003.
- [5] P. Viswanath and D. N. C. Tse, "Sum capacity of the vector Gaussian broadcast channel and downlink-uplink duality," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 49, no. 8, pp. 1912-1921, Aug. 2003.
- [6] M. Kobayashi and G. Caire, "Joint beamforming and scheduling for a multi-antenna downlink with imperfect transmitter channel knowledge," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 7, pp. 1468-1477, Sep. 2007.
- [7] M. Kobayashi and G. Caire, "An iterative algorithm for maximum weighted sum-rate of Gaussian MIMO-BC," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 8, pp. 1640-1646, Aug. 2006.
- [8] H. Huang, M. Trivellato, A. Hottinen, M. Shafi, P. Smith, and R. Valenzuela, "Increasing downlink cellular throughput with limited network MIMO coordination," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 6, pp. 2983-2989, Jun. 2009.
- [9] J. Moon and D. Cho, "Efficient cell-clustering algorithm for inter-cluster interference mitigation in network MIMO systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 3, pp. 326-328, Mar. 2011.
- [10] G. Caire, G. Taricco, and E. Biglieri, "Optimum power control over fading channels," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 5, no. 45, pp. 1468 - 1489, Jul. 1999.
- [11] 이지원, 성원진, "영점 강제 다중 사용자 MIMO 전송 시 셀 간 정보 교환을 활용한 협력적 PF 스케줄러의 성능 평가," 전자공학회 논문지, 제 47권 TC편, 제 2호, 40-46쪽, 2010년 2월
- [12] T. Yoo and A. Goldsmith, "On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 528- 541, Mar. 2006.

— 저 자 소 개 —



유 형 길(학생회원)
2010년 서강대학교
전자공학과 학사
2010년 ~현재 서강대학교
전자공학과 석사과정

<주관심분야 : 기지국 간 협력통신, MU-MIMO,
LTE-Advanced>



성 원 진(평생회원)
1990년 서울대학교
전자공학과 학사
1992년 University of Michigan
EECS 석사
1995년 University of Michigan
EECS 박사

1996년 1월~2000년 8월 Hughes Network
Systems 책임 연구원
2000년 9월~현재 서강대학교 전자공학과 교수
<주관심분야 : 이동무선통신, 통계통신이론>