

# 다중 셀 처리를 통한 협력 통신

Multi-Cell Cooperative Networks

이주열 (J. Lee) 무선간섭인지연구팀 선임연구원

김근영 (K. Kim) 무선간섭인지연구팀 선임연구원

이승환 (S.-H. Lee) 무선간섭인지연구팀 팀장

\* 본 연구는 방송통신위원회 방송통신기술개발사업의 연구결과로 수행되었음.

스마트폰의 대중화와 더불어 모바일 데이터 트래픽은 폭발적인 증가 추세에 있다. 이와 같은 트래픽 요구에 부합하도록 시스템 측면에서 주파수 사용 효율을 높이는 다양한 많은 기술들이 제안되고 있다. 또 한편에서는 사용자들 측면에서 사용자의 채널 환경에 변함 없이 일정한 체감 품질을 유지하는 기술에 대한 제안도 되고 있다. 본고에서는 최근 주목받고 있는 셀 간 간섭으로 저하되는 무선 이동통신의 품질을 다중 셀 간의 협력을 통해 해결하는 MCP (multi-cell processing)에 대한 전반적인 연구동향 등을 소개한다. MCP를 위한 방법들에 대한 고찰과 이론적 모델 및 이를 위한 기술적 과제 등에 대한 논의도 소개한다.

## 차세대통신기술 특집

- I. 서론
- II. MCP 연구 동향
- III. MCP 방법론
- IV. MCP의 이론적 모델
- V. MCP의 기술 이슈
- VI. 결론

## I. 서론

페이딩과 간섭 모두가 통신 품질 저하의 큰 요인이지만, 셀의 크기가 소형화 됨에 따라 셀 경계 부근의 사용자들에게 인접 셀로부터의 간섭에 의한 영향이 크게 되었다. 이는 커패시티(capacity) 측면에서나 체감 품질(quality of experience) 측면에서 성능에 많은 제약 사항이 되고 있다.

우선적으로, 간섭에 대한 영향을 없애기 위해, 인접 셀과 무선 자원(시간, 주파수, 코드)을 직교(orthogonal)하게 사용하는 간섭을 회피(avoidance)하는 CDMA, TDMA, (O)FDMA 등의 기술이 이용되어 왔다. 그러나 한정된 무선 자원을 직교로 나누어 사용하다 보니, 전송률 측면에서 이론적 커패시티와 상당한 격차를 보인다. 요즘과 같이 스마트폰을 이용한 멀티미디어 데이터 전송 등의 대용량의 서비스를 요구하는 사용자들이 많아짐에 따라 무선 자원을 직교하지 않게 하면서 간섭을 관리하는 기술이 중요해지고 있다. 다른 한편으로는, 간섭신호를 아예 잡음으로 간주하기도 하는데, 이는 SNR의 감소를 가져오므로 간섭량이 적은 경우를 제외하고는 적합하지 않다[1].

이상과 같이 기지국 간 협력이 없는 간섭 관리는 커패시티 측면에서 많은 희생이 요구되므로, 릴레이를 통한 부분적 협력이 모색되기도 했다. 또한, 이러한 부분적 협력보다 진보한 기지국 간의 협력에 대한 논의가 제한적이긴 하지만 3GPP의 LTE-Advanced에서 CoMP라는 표준기술로서 대두되고 있다. 이는 셀 간 협력을 통해 셀 경계 부근의 사용자의 성능을 높이는 기술인데, 근본적으로 Single Cell Processing(SCP) 기반 시스템에서 JP(joint processing)와 스케줄링/beamforming이 가능한 CS/CB와 같은 제한적인 협력만을 고려한다[2].

이상적인 Multi-Cell Processing(MCP)은 협력에 참여하는 모든 셀이 하나의 셀처럼 동작하고 안테나들만 분산 배치되어 있어 모든 데이터와 채널 정보의 처리를 하나의 장치에서 수행하는 것이다. 하지만 이와 같은

이상적인 MCP의 실현을 위해서는 다른 셀과 정보를 공유해야 하는데, 공유되는 정보의 양과 지연 시간 등에 제약이 가해진다.

요즘과 같이 스마트폰을 통한 대용량의 멀티미디어 서비스를 위해서는 공유되어야 할 데이터 양이 상당하다. 또한, 기지국과 단말 간의 간섭신호 처리를 위해서는 해당 셀뿐만 아니라 인접한 다른 셀로부터의 채널 정보도 필요하여 협력하는 기지국의 개수에 따라 공유되어야 할 채널 정보의 양도 지수적으로 늘어난다. 이와 같은 상당한 양의 데이터와 채널 정보의 공유를 위해서 극복해야 될 문제들이 어떤 것들이 있고, 어떠한 방법들이 연구 제시되어 있는지에 대해 알아 볼 필요가 있다.

본고에서는 셀 간 간섭으로 저하되는 무선 통신의 품질을 다중 셀 간의 협력을 통해 해결하는 MCP에 대한 전반적인 소개와 연구동향을 다룬다. MCP 연구의 개념과 중요성 등에 대한 논의를 포함하며, 현재까지 진행되고 있는 MCP의 방법론도 간단히 거론한다. MCP에 대한 간략한 연구 역사와 기술적으로 이슈가 되고 있는 스케줄링, 전력제어, beamforming, 프리코딩(precoding) 등등의 다중 셀 간 간섭 관리 방법들에 대해서도 살펴본다.

## II. MCP 연구 동향

셀 간의 협력 기술은 CDMA에서 사용자가 하나의 셀 영역에서 다른 셀 영역으로 이동하는 핸드오버 시 셀 경계 부근에서 macrodiversity를 이용하여 성능을 높이는 소프트 핸드오버(soft handover)로부터 시작되었다 [3],[4].

정보이론적 관점에서 모든 셀들이 무한대의 백홀 커패시티(backhaul capacity)로 연결되었다는 가정 하에, 초기 MCP에 대한 연구가 시작되었다. 초창기에 발표된 참고문헌 [5]와 [6]의 논문에서는 다중 셀의 여러 상

향링크(uplink)를 하나의 Central Processor(CP)에서 처리하는 Gaussian Multiple Access Channel(MAC)으로 간주하여 성능을 분석하였다. 특히, 참고문헌 [6]에서 제시된 Wyner model로 인하여 수학적 접근도 용이하게 되었고, 현재까지도 널리 사용되고 있다. MCP의 백홀 커패시티의 제한이 없을 때는 완전 협력(full cooperation)이 가능하므로, 참고문헌 [7]과 [8]에서처럼 네트워크화된 MIMO로의 해석도 가능하다.

참고문헌 [9]는 하향링크(downlink)의 MCP를 다룬 첫 논문으로, 모든 셀들의 백홀 커패시티가 무한대일 경우 프리코딩 방법에 대한 연구이다. 하향링크의 모든 셀들이 완전 협력하므로, 전체를 하나의 MIMO broadcast channel로 간주하여 성능을 분석하였다. MU-MIMO의 많은 기술 중 다중 사용자 간 프리코딩 등이 MCP의 성능 향상에 기여할 수 있다고 참고문헌 [10]에서 보여준다. 특히, 참고문헌 [11]에 따르면 낮은 레벨의 interference coordination만을 해도 성능이 많이 향상된다.

MCP를 위해서는 기본적으로 채널 정보(channel state information)에 대한 셀 간의 공유가 필요하다. 먼저 채널 측정이 필요한데, 자기 셀의 기지국으로부터의 채널 뿐만 아니라 인접 셀의 기지국으로부터의 채널도 측정하여야 한다. 프로토콜상으로는 pilot을 이용하여 채널을 측정하여 기지국으로 다시 피드백 시킨 후에, 셀 간 채널 정보를 공유한다. 참고문헌 [12]에서는 이와 같은 채널 측정과 채널 정보 공유를 위해 들어가는 오버헤드를 고려하여 종합적인 spectral efficiency에 대한 연구를 수행했다. 특히 참고문헌 [13]에서는 백홀 커패시티의 제한이 있을 경우, 셀 간의 정보 공유의 한계로 일부 정보만을 이용하여 협력(limited coordination) 시, 간섭의 영향을 인접 셀 간의 joint scheduling으로 성능을 향상시키는데, clustering을 배타적(disjoint)으로 하기도 하는 겹치기(overlap) 하여 클러스터 경계에 있는 사용자의 성능 향상에도 기여했다.

아직 MCP 연구는 초창기임에도 3GPP의 LTE-Ad-

vanced는 MCP를 채택하여 CoMP라는 명칭으로 표준화를 진행 중이며 곧 상용화 예정이다. 이와 같이 MCP에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으며, 본고 외의 보다 자세한 기술적 사항은 최근에 출간된 참고문헌 [14]를 참조한다.

## 1. LTE-Advanced의 CoMP

CoMP는 SCP를 근간 시스템으로 운용하면서, 셀 경계 부근의 사용자의 성능 향상을 위해, 기지국들이 동시에 같은 데이터를 송신 또는 안테나 빔의 제어를 통해 간섭을 약화시키는 일종의 제한적인 기지국 간 협력 통신 방법이다[2].

CoMP는 크게 joint transmission, dynamic cell selection, coordinated beamforming의 세 가지 유형의 기술로 3GPP의 LTE-Advanced에서 논의되고 있다[2]. Joint transmission이라 함은 인접 셀과 같은 데이터를 동시에 셀 경계 사용자에게 보내주는 방법이고, dynamic cell selection은 셀 경계 사용자가 두 셀의 신호 중 좋은 쪽을 빠르게 선택하는 방법이며, coordinated beamforming은 인접 셀에서는 간섭의 영향을 고려하여 빔을 형성하여 간섭의 양을 줄이는 방법이다.

참고문헌 [15]에 2×2와 4×4 MIMO를 이용하여 CoMP의 joint transmission과 coordinated beamforming의 성능을 분석하였다. 2×2와 4×4 모두의 경우에서 joint transmission인 경우 셀 경계 사용자의 성능이 가장 높았고, coordinated beamforming의 경우도 SCP에 비해서는 높았다. 참고문헌 [16]에는 CoMP를 채택했을 때의 수신기의 구현 예를 보여준다. Transmit beamforming과 유사하게 수신단에서 간섭신호를 억제 또는 최소한으로 하기 위한 MMSE나 ZF의 IRC하는 방법과, 간섭을 유발하지 않게 단말의 송신을 제한하여 수신단에서 MRC하는 방법을 소개한다. 최근 발표된 참고문헌 [16]에는 CoMP의 필드 테스트 성능도 소개되었다.

## 2. MCP의 연구 방향

Joint transmission과 coordinated scheduling/beam-forming의 SCP 기반의 CoMP와는 다르게, MCP는 새로운 협력 통신 패러다임이다. 가장 이상적인 형태의 MCP는 모든 기지국이 완전히 협력하여 하나의 셀과 같이 동작하는 경우이다. 이 경우는 하나의 broadcast channel 또는 multiple access channel로 간주하여, interference channel에 비해 무선 자원을 효율적으로 사용할 수 있다. 하지만, 기지국 간의 완전 협력을 위해서는 백홀이 무한대의 커패시티를 요구하므로 현실적으로는 실현되기 어렵다. 앞서 설명한 이상적인 경우와 백홀 커패시티에 제한이 가해질 때, MCP를 어떤 방법으로 수행해야 하는지, 성능이 얼마나 이상적인 경우와 또 SCP와 얼마나 다른지 등등에 대한 연구가 앞으로의 큰 연구 주제들이 될 것이다.

MCP 연구는 이론적으로 뿐만 아니라 구현 관점에서도 많은 어려움이 있다. 먼저, 이론적으로는 다중 셀 MIMO에 대한 전체적인 이론적인 해석이 없다는 것이다. 모델 자체가 복잡하고 기존의 SCP에서 수행되었던 많은 연구들이 재모델되고 재해석되어야 하는 어려움이 있다.

구현 관점으로는 다중 셀 처리를 위한 복잡도(complexity)가 큰 문제이다. 다중 셀 처리를 수행하는 상황에서, 셀이 하나 증가하면 셀들 간의 연결(connection)의 개수가 지수적으로 증가한다. 즉, 다중 셀 처리를 위한 복잡도는 협력하는 기지국 개수에 지수적으로 비례하기 때문에 현실적으로 구현상 문제가 될 수 있다.

셀 간 협력을 수행하기 위한 백홀에 대해서도, 커패시티(backhaul capacity)와 지연(backhaul latency)이 문제이다. 즉, 협력을 위해 공유되는 정보의 양이 제한이 있을 때 어떤 정보를 공유하여야 하는가와, 공유된 정보가 실시간(instantaneous) 업데이트가 되지 않을 때 어떤 식으로 극복해야 되는지도 앞으로의 연구 방향성이다.

아직은 MCP에 대한 연구 초창기이므로, 이 밖에도

가시화되지 않은 많은 도전 과제가 있을 수 있다. LTE-Advanced를 통해 CoMP가 상용화되고, 많은 MCP 연구들이 활발히 진행되고 있는 현시점에서, 계속적으로 새로운 도전적인 문제들이 제기되고 있다.

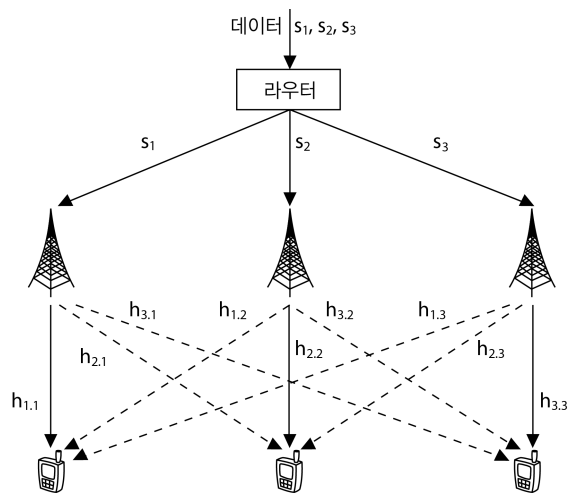
## III. MCP 방법론

MCP는 협력되어 셀 간 공유되는 정보의 양에 따른 분류와 협력하는 방법에 따른 분류로 크게 나눌 수 있다. 본 장에서는 이들 각각에 대해 알아본다. 다만, 아직은 MCP가 전 세계적으로 연구 초창기인만큼 이들의 분류 말고도 다양한 전개에 따른 분류도 가능하리라 본다.

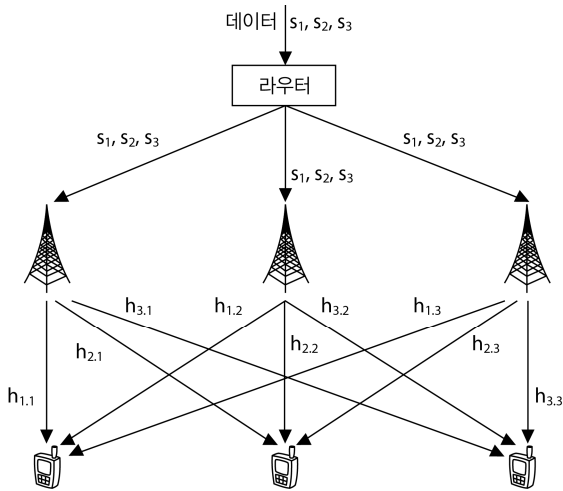
### 1. 공유되는 정보에 따른 분류

데이터와 채널 정보의 공유되는 레벨에 따라 분류할 수 있다. 일반적으로는 데이터의 양이 채널 정보의 양보다 훨씬 많기 때문에, 채널 정보만 공유되는 경우와 채널 정보와 데이터 모두가 공유되는 경우로 나뉘게 된다.

(그림 1)은 셀 간 채널 정보만 공유되고 데이터는 공



(그림 1) 셀 간 채널 정보만 공유되는 상황[17]



(그림 2) 셀 간 채널 정보와 데이터 모두 공유되는 상황[17]

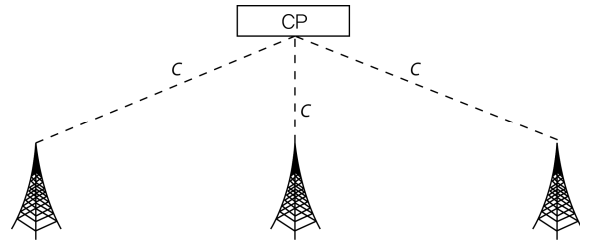
유되지 않는 상황을 나타내고, interference coordination이라 부른다[17]. 그림에서 보듯이, 데이터 라우터에서 각 사용자로 전송될 데이터  $s_1, s_2, s_3, \dots$  가 각각의 기지국에 나누어 보내어 진다. 각 기지국은 다른 기지국과 채널 정보  $h_{1,1}, h_{2,1}, h_{3,1}, \dots, h_{1,2}, h_{2,2}, h_{3,2}, \dots, h_{1,3}, h_{2,3}, h_{3,3}, \dots$  를 공유하게 되어, 스케줄링, 전력제어 또는 beamforming을 통해 간섭에 대한 영향을 제어하게 된다.

(그림 2)는 채널 정보뿐만 아니라, 데이터까지 셀 간 공유하는 상황을 보여준다. 즉, 모든 기지국이 모두의 데이터  $s_1, s_2, s_3$  를 가지고 있다. 이때는 완전한 협력이 가능하기 때문에, 기지국 전체가 하나의 기지국처럼 동작할 수 있어, multi-cell MIMO라 부른다[17].

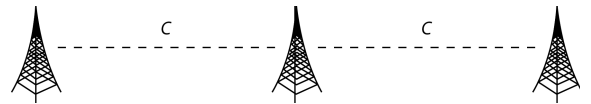
## 2. 협력되는 방법에 따른 분류

셀 간 협력을 위해서는 협력하는 통로, 즉 백홀을 어떤 식으로 구성해야 하는가에 따라 MCP의 방법으로 나눌 수 있다. 크게 CP의 유무에 따라 나눈다.

(그림 3)은 CP가 있고, 기지국과 CP 사이의 백홀이 커패시티  $C$  로 연결된 상태를 보여준다. 즉, 백홀 커패시티  $C$  의 값에 따라 CP로 전송할 수 있는 정보량이 제한 된다. 만약  $C \rightarrow \infty$  인 상태이면, 셀 간 완전한 협



(그림 3) MCP의 CP가 있는 백홀 모델[17]



(그림 4) MCP의 CP가 없는 분산 백홀 모델[17]

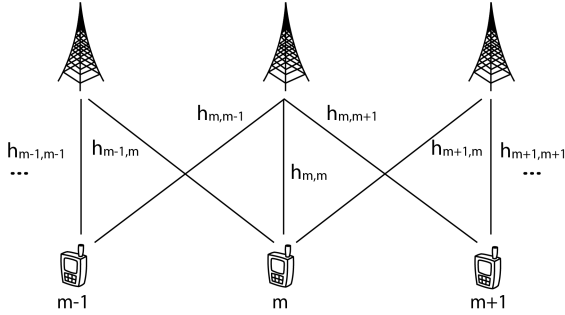
력을 이루는 상태로 수렴한다.

(그림 4)는 CP 없이 기지국이 인접 기지국과 바로 연결된 상황을 보여준다. 이때도 기지국 간 연결되는 백홀의 커패시티는  $C$  로 제한된다. CP가 없기 때문에 각 기지국이 독립적으로 송수신을 수행하는데, 백홀을 통한 인접 셀의 정보를 활용하게 된다. 여기서,  $C \rightarrow \infty$  가 되면, (그림 3)과 (그림 4)의 성능상 차이가 없다[17].

## IV. MCP의 이론적 모델

다중 셀의 성능분석을 위해 일반적으로 사용되는 Wyner model에 대해 간략히 알아본다. 실제의 지형에 따른 셀 위치를 고려한 해석이 이론적으로 어렵기 때문에, Wyner model은 다중 셀의 환경을 1차원의 선형 배열 또는 2차원의 원형이나 육각 배열을 단순화한 모델이다.

(그림 5)는 셀들이 직선상에 대칭적으로 배열되어 있는 linear Wyner model을 묘사한다. 여기에서 interference span이라는 파라미터  $L_l$  과  $L_r$  이 있는데,  $L_l$  은 왼쪽 인접 셀로부터 영향을 주는 (혹은 받는) 셀의 개수를 나타내고,  $L_r$  은 오른쪽의 인접 셀로부터 영향을 받는 셀의 개수를 나타낸다. 초창기 Wyner model에서는 path loss만을 고려하여 채널을  $h_{m,k}(t) = \alpha l$  와



(그림 5) Linear Wyner Model

같이 모델하였는데, 참고문헌 [18]에서 페이딩을 포함하여  $\mathbf{h}(t) = \alpha \tilde{\mathbf{h}}(t)$  와 같이 모델하였다. 여기서  $\alpha$  는 상수의 gain으로 path loss를 모델하고 1 은 원소가 모두 1인 벡터,  $\tilde{\mathbf{h}}(t)$  는 정규화(normalized)된 페이딩 모델(예를 들면, Rayleigh 페이딩)을 나타낸다. 이성과 같이 interference span하고 채널의 모델 상태에 따라, <표 1>과 같이 4가지의 특별한 경우가 분석하기 상대적으로 쉬워, 이들에 연구가 많이 진행되어 왔다.

아울러, 셀들을 직선상에 배치하지 않고 육각형의 배열로 배치하거나[6], 원형의 배열로 배치하여[19] 활발히 연구를 진행 중이다.

<표 1> Wyner Model의 Special Example

|                              | 채널 모델                | Interference span  |
|------------------------------|----------------------|--------------------|
| Gaussian Wyner model         | Path loss만 고려        | $L_l = L_r = L$    |
| Gaussian soft-handover model | Path loss만 고려        | $L_l = L, L_r = 0$ |
| Fading Wyner model           | Path loss와 페이딩 모두 고려 | $L_l = L_r = L$    |
| Fading soft-handover model   | Path loss와 페이딩 모두 고려 | $L_l = L, L_r = 0$ |

## V. MCP의 기술 이슈

본 장에서는 MCP에서 최근에 많은 이슈가 되고 있는 백홀, 스케줄링, 전력제어, beamforming, 프리코딩, 그

리고 interference decoding에 대해 살펴본다.

### 1. Limited Backhaul/Clustering

Network MIMO의 무제한 백홀과 다르게, 제한된 백홀 용량의 양을 고려하여, 기지국 간 협력을 통해 얻을 수 있는 용량에 대한 연구가 참고문헌 [20]을 필두로 활발히 진행 중이다. 백홀의 용량이 제한되어 있기 때문에 주변의 모든 인접 셀하고 연결하는 것이 현실적이지 않다. 또한, 제한된 백홀 용량으로 인해, 많은 셀을 연결하고 적은 정보를 공유할지, 적은 셀을 그룹 단위로 연결하고 보다 많은 정보를 공유할지는 상반 관계(trade off)가 된다. 여기에서 협력을 하는 기지국의 그룹 단위를 클러스터(cluster)라 한다. 전체의 정보이론적인 수학적 해석은 어려워 단순화된 모델을 이용하여 해석하는 방법들이 최근에 제안되었다.

다중 셀 환경을 수학적으로 해석하기란 상당히 어렵는데, 의외로 무한의 영역, 즉 안테나의 개수가 무한대 개가 되는 상황에서는 근사화를 통해 간단히 수행할 수 있다. 여기서 주의해야 할 사항은 channel hardening effect[21]인데, 이는 송신 쪽의 안테나만 무한대 개가 되면 채널의 mutual information의 변동이 없어져 multi-user diversity gain을 잃게 된다(수신 쪽의 안테나만 많아도 같은 현상이 발생한다). 이를 극복하기 위해, 송신 쪽과 수신 쪽의 안테나를 일정한 비율로 유지한 상태에서 시스템을 해석하는 것을 large system analysis라 한다. Large system analysis를 통해 클러스터를 형성하여 협력해야 되는 기지국의 수, 각 기지국의 안테나 수, 셀당 단말의 수 등에 대한 해석이 가능하다.

예를 들어, 참고문헌 [22]에서는 기지국이 완전한 채널 정보를 가지고 있을 때의 large system analysis를 수행하였고, 참고문헌 [23]에서는 기지국의 채널 정보가 완벽하지 않을 때, 채널 정보 획득을 위한 파일럿, 채널 추정 등의 오버헤드 등을 고려한 large system

analysis를 수행하였다. 참고문헌 [23]의 연구에 따르면, 한 클러스터를 3개 정도의 기지국으로 묶어 처리하는 것이 성능이 좋았다. 또한, 단말의 안테나의 개수가 하나씩 있을 때 기지국의 안테나 개수에 따른 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 보여준다. 특히, 기지국의 안테나 개수가 많으면 오버헤드 때문에 오히려 좋지 않은 성능을 보여준다. 또한, 클러스터를 확일적으로 나누지 않고, 사용자 단말의 위치 등을 고려하여 때에 따라 다이나믹하게 클러스터를 구성하고, 이에 더하여 인접 클러스터와 overlap되게 하여 클러스터 경계에 있는 사용자를 고려하는 연구가 참고문헌 [13]에서 수행되었다.

## 2. 스케줄링/전력제어

참고문헌 [24]에서는 인접 셀 간의 스케줄링과 power allocation을 통해 CP가 사용되지 않는 distributed intercell coordination으로 시스템 throughput을 향상시킨다. 서로 인접하고 있는 active cell에서는 무선 자원의 스케줄링 시점 또는 직교의 무선 자원을 사용하여 간섭에 대한 영향을 줄일 수 있다.

전체 셀의 개수가 두 개일 때, 두 셀 모두 full power로 운영을 하던지 아니면 두 셀 중 한 셀은 운영하고 다른 셀은 운영하지 않든가를 고르는 binary operation이 최적이라 참고문헌 [25]에서 보였다. 간섭에 대한 영향으로 다중 셀의 스케줄링 문제는 convex optimization으로 나타낼 수 없어 suboptimal하게 참고문헌 [26]에서 스케줄링과 power allocation 문제를 다루었다. 또한, 참고문헌 [27]에서는 게임이론을 이용하여 접근하기도 했다.

## 3. Beamforming/Precoding

기지국에서 안테나의 beamforming을 하여 성능을 향상시키는 것은 1998년 참고문헌 [28]에 처음 소개되었고, single cell에서는 optimal이라 증명되었다. 또한,

참고문헌 [29]에서는 convex optimization을 이용하여 알고리즘 측면에서 효율적인 방법을 제시하였다.

Network MIMO라는 다중 셀 간 협력 통신은 상당한 백홀 커패시티를 요구하게 되는데, 각 기지국에서 빔의 방향만 서로 coordination시켜 간섭의 영향을 줄이는 기술이 참고문헌 [30]과 [31]에서 연구되었다. 특히 참고문헌 [30]에서는 기지국의 beamforming과 전력제어를 TDD의 형태로 기지국 간 나누어 분산 형태로 운용하는 시스템을 제안하기도 했다.

참고문헌 [32]에서는 SCP와 full MCP, 그리고 limited cooperation이 있는 상황의 beamforming을 large system analysis를 이용하여 비교하였으며, 어느 정도의 cooperation만 되어도 시분할 방식(인접 셀과 time division의 orthogonal 자원 할당)보다 훨씬 좋은 성능을 보여준다. 최근에 발표된 참고문헌 [33]에서는 인접 셀로의 leakage 양을 조절하여, 각 셀 단위로 처리하는 분산 프리코딩에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 참고문헌 [34]에서는 각 셀의 기지국이 인접 셀의 채널 정보는 알지 못하고, 자기의 채널 정보만 실시간으로 주어지는 경우와 그렇지 않고 통계적인 특성만 주어질 때의 프리코딩을 사용했을 때의 성능을 분석하였다. 제한이 있지만, 데이터의 공유가 인접 셀 간에 있을 때 성능이 나아짐을 보였다.

## 4. Coding

아직까지는 간섭신호가 미약하여 잡음으로 간주해 왔지만, 셀 사이즈가 적어지면 셀 간 간섭신호도 상대적으로 크게 된다. 간섭신호에 특정한 패턴을 부여함으로 인접 기지국에서도 디코딩하여 간섭 관리를 하는 방법에 대한 연구도 최근에 활발히 진행 중이다. 참고문헌 [35]에서는 간섭제거에 대한 많은 연구가 수행되어 왔음에도 불구하고, 실제 시스템에서 간섭이 잡음으로 간주(treat as noise)되어야 하는지에 대한 이유들이 요약되어 있다.

간섭채널의 연구에서 현재까지 나온 방법 중에 이론적으로 가장 효율적인 방법이 common message와 private message를 나누어 코딩하는 Han-Kobayashi scheme이다[36]. 최근에 발표된 참고문헌 [37]에서는 Gaussian interference channel의 capacity region으로부터 1bit 차이 나는 scheme을 보였다. 하지만 사용자의 수가 2명이고 셀이 2개일 때로 한정되어, 일반적으로 적용하기는 어렵다. 참고문헌 [38]에서는 다중 셀 환경에서는 인접 셀들과 페이딩과 beamforming을 수행하여 참고문헌 [37]의 한계를 극복하려는 노력을 보이기도 했다.

다른 한편으로는, 송신단에서 beamforming을 적절히 수행하여 간섭신호들을 특정 subspace로 정렬시키는 간섭 정렬(interference alignment)이라는 아이디어가 참고문헌 [39]에 소개 되었다.

간섭신호가 큰 영역에서는 간섭신호를 디코딩하는 것이 최적이라는 것이 참고문헌 [40]과 [41]에 증명되어, 최근에는 간섭신호를 디코딩하는 방법들에 대한 연구도 활발히 진행 중이다[42],[43].

모든 셀이 무한대의 커패시티의 백홀로 연결되어 있다면, 전체를 하나의 broadcast channel로 간주할 수 있으므로 dirty paper coding으로 capacity region에 도달할 수 있다[44]. 그러나 dirty paper coding은 복잡도 때문에 구현상 어려움이 있어 lattice를 이용하거나 Tomlinson-Harashima coding의 사용이 시도되었다 [45],[46].

## VI. 결론

이상에서와 같이 MCP에 대한 전반적인 이해와 연구 동향에 대해 살펴보았다. 요즘과 같이 스마트폰의 대량 보급으로 폭발적인 데이터 서비스 증가에 따라, 셀들 간의 간섭 영향으로 일반 서비스 사용자의 체감 품질은 현격히 저하되고 있다. MCP는 이러한 셀들 간의

간섭에 대한 영향을 줄여, 획기적으로 성능을 향상시킬 수 있는 기술임에는 틀림 없다. 이미 3GPP의 LTE-Advanced에서는 CoMP라는 기술명으로 MCP에 대한 표준화를 논의하고 있다. 앞으로 beyond 4G 및 차세대 5G의 이동통신 시스템에서도 MCP는 계속 중요한 기술임에 틀림 없다.

### 용어해설

**LTE-Advanced** 3GPP의 표준화 단체에서 LTE(Long Term Evolution)를 향상시켜 ITU-T의 4G 기준에 충족시키도록 만든 차세대 이동통신 표준 기술

**MIMO(Multiple Input Multiple Output)** 송수신단에 다중안테나를 사용하는 기술

**커패시티(Capacity)** 통신 채널상에 신뢰(reliable)하고 보낼 수 있는 최대의 전송률

### 약어 정리

|         |  |
|---------|--|
| 3GPP    | 3rd Generation Partnership Project     |
| CB      | Coordinated Beamforming                |
| CDMA    | Code Division Multiple Access          |
| CoMP    | Coordinated Multipoint Transmission    |
| CP      | central processor                      |
| CS      | Coordinated Scheduling                 |
| IRC     | interference rejection combining       |
| JP      | Joint Processing                       |
| LTE     | Long Term Evolution                    |
| MCP     | Multi-Cell Processing                  |
| MIMO    | Multi Input Multi Output               |
| MMSE    | Minimum Mean Squared Error             |
| MRC     | maximal ratio combining                |
| MU-MIMO | Multi-user MIMO                        |
| (O)FDMA | (Orthogonal) Frequency Division Access |
| SCP     | Single Cell Processing                 |
| SNR     | Signal to Noise Ratio                  |
| TDD     | time division duplex                   |
| TDMA    | Time Division Multiple Access          |
| ZF      | Zero Forcing                           |

### 참고문헌

[1] T. Cover and J. Thomas, Elements of Information



Theory, 2nd ed, 2006.

- [2] 3GPP TR 36,819, "Coordinated Multi-point Operation for LTE Physical Layer Aspects," 3rd Generation Partnership Project, Sept. 2011.
- [3] A.J. Viterbi et al., "Soft Handoff Extends CDMA Cell Coverage and Increases Reverse Link Capacity," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 12, no. 8, 1994, pp. 1281–1288.
- [4] S. Hanly, "Capacity and Power Control in Spread Spectrum Macrodiversity Radio Networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, no. 2, 1996, pp. 247–256.
- [5] S. Hanly and P. Whiting, "Information-theoretic capacity of Multi-receiver Networks," *Telecommunications Syst.*, vol. 1, no. 1, 1993, pp. 1–42.
- [6] A. Wyner, "Shannon-theoretic Approach to a Gaussian Channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 40, no. 6, 1994, pp. 1713–1727.
- [7] I. Telatar, "Capacity of Multi-antenna Gaussian Channels," Bell Lab Tech Memo, 1995.
- [8] G. Foschini and M. Gans, "On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment When Using Multiple Antennas," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 6, 1998, pp. 311–335.
- [9] S. Shamai and B. Zaidel, "Enhancing the Cellular Downlink Capacity via Co-processing at the Transmitting End," *IEEE VTC Spring*, 2001.
- [10] D. Gesbert et al., "Shifting the MIMO Paradigm," *IEEE Signal Process. Mag.*, 2007, pp. 36–46.
- [11] D. Gesbert et al., "Adaptation, Coordination, and Distributed Resource Allocation in Interference-Limited Wireless Networks," *Proc. IEEE*, vol. 95, no. 5, 2007, pp. 2393–2409.
- [12] S. Ramprasad, G. Caire, and H. Papadopoulos, "Cellular and Network MIMO Architectures: MU-MIMO Spectral Efficiency and Costs of Channel State Information," *Silomar Conf.*, 2009.
- [13] S. Ramprasad, G. Caire, and H. Papadopoulos, "A Joint Scheduling and Cell Clustering Scheme for MU-MIMO Downlink with Limited Coordination," *IEEE ICC*, 2010.
- [14] P. Marsch and G.P. Fettweis, *Coordinated Multi-Point in Mobile Communications*, Cambridge, 2011.
- [15] M. Sawahashi et al., "Coordinated Multipoint Transmission/Reception Techniques for LTE-Advanced," *IEEE Wireless Commun.*, 2010, pp. 26–34.
- [16] R. Irmer et al., "Coordinated Multipoint: Concepts, Performance, and Field Trial Results," *IEEE Commun. Mag.*, 2011, pp. 102–111.
- [17] D. Gesbert et al., "Multi-cell MIMO Cooperative Networks: A New Look at Interference," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 28, no. 9, 2010, pp. 1380–1408.
- [18] O. Somekh and S. Shamai, "Shannon-theoretic Approach to a Gaussian Cellular Multiple Access Channel with Fading," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 4, 2000, pp. 1401–1425.
- [19] O. Somekh, B.M. Zaidel, and S. Shamai, "Sum rate Characterization of Joint Multiple Cell Site Processing," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, no. 12, 2007, pp. 4473–4497.
- [20] P. Marsch and G. Fettweis, "On Base Station Cooperation Schemes for Downlink Network MIMO under a Constrained Backhaul," *Proc. IEEE Globecom Conf.*, 2008.
- [21] B.M. Hochwald, T.L. Marzetta, and V. Tarokh, "Multiple-antenna Channel Hardening and Its Implications for Rate Feedback and Scheduling," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 9, Sept. 2004, pp. 1893–1909.
- [22] H. Huh et al., "Multi-cell MIMO Downlink with Cell Cooperation and Fair Scheduling: A Large-System Limit Analysis," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 27, no. 12, 2011, pp. 7771–7786.
- [23] H. Huh, A.M. Tulino, and G. Caire, "Network MIMO with Linear Zero-forcing Beamforming: Large System Analysis, Impact of Channel Estimation and Reduced Complexity Scheduling," *IEEE Trans. Inf. Theory*, to be published.
- [24] S.G. Kiani and D. Gesbert, "Optimal and Distributed Scheduling for Multicell Capacity Maximization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 1, 2008, pp. 288–297.
- [25] A. Gjendemsjo et al., "Binary Power Control for Sum Rate Maximization over Multiple Interfering Links," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 8, 2008, pp. 3164–3173.
- [26] L. Venturino, N. Prasad, and X. Wang, "Coordinated Scheduling and Power Allocation in Downlink Multicell OFDMA Networks," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 58, no. 6, 2009, pp. 2835–2848.
- [27] J. Yuan and W. Yu, "Distributed Cross-layer Optimization of Wireless Sensor Networks: A Game Theoretic Approach," *IEEE Globecom Conf.*, 2006.
- [28] F. Rashid-Farrokh, K.J.R. Liu, and L. Tassiulas,

- “Transmit Beamforming and Power Control for Cellular Wireless Systems,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, Oct. 1998, pp. 1437–1450.
- [29] A. Wiesel, Y.C. Eldar, and S. Shamai, “Linear Precoding via Conic Optimization for Fixed MIMO Receivers,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 54, no. 1, 2006, pp. 161–176.
- [30] H. Dahrouj and W. Yu, “Coordinated Beamforming for the Multicell Multi-antenna Wireless System,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 5, 2010, pp. 1748–1759.
- [31] R. Zakhour, Z.K.M. Ho, and D. Gesbert, “Distributed Beamforming Coordination in Multicell MIMO Channels,” *IEEE VTC*, 2009.
- [32] R. Zakhour, S.V. Hanly, “Base Station Cooperation on the Downlink: Large System Analysis,” ArXiv, 2011.
- [33] W.W. Ho et al., “Decentralized Precoding for Multicell MIMO Downlink,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 6, 2011, pp. 1798–1809.
- [34] E. Bjornson et al., “Distributed Multicell and Multiantenna Precoding: Characterization and Performance evaluation,” *IEEE Globecom Conf.*, 2009.
- [35] J.G. Andrews, “Interference Cancellation for Cellular Systems: A Contemporary Overview,” *IEEE Wireless Commun.*, 2005, pp. 19–29.
- [36] T.S. Han and K. Kobayashi, “A new Achievable Rate Region for the Interference Channel,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 27, no. 1, 1981.
- [37] R.H. Etkin, D.N.C. Tse, and H. Wang, “Gaussian Interference Channel Capacity to within One Bit,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, no. 12, 2008.
- [38] H. Dahrouj and W. Yu, “Interference Mitigation with Joint Beamforming and Common Message Decoding in Multicell Systems,” *IEEE ISIT*, 2010.
- [39] V.R. Cadambe and S.A. Jafar, “Interference Alignment and Degrees of Freedom of the K-user Interference Channel,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, no. 8, 2008, pp. 3425–3441.
- [40] H. Sato, “The Capacity of the Gaussian Interference Channel under Strong Interference,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. IT-27, no. 6, 1981, pp. 786–788.
- [41] M.H.M. Costa and A.E. Gamal, “The Capacity Region of the Discrete Memoryless Interference Channel with Strong Interference,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. IT-33, no. 5, 1987, pp. 710–711.
- [42] A.S. Motahari and A.K. Khandani, “To Decode the Interference or to Consider it as Noise,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, no. 3, 2011, pp. 1274–1283.
- [43] B. Bandemer and A.E. Gamal, “Interference Decoding for Deterministic Channels,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, no. 5, 2011, pp. 2966–2975.
- [44] H. Weingarten, Y. Steinberg, and S. Shamai, “The Capacity Region of the Gaussian Multiple-input Multiple-output Broadcast Channel,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 9, 2006, pp. 3936–3964.
- [45] U. Erez, S. Shamai, and R. Zamir, “Capacity and Lattice Strategies for Canceling Known Interference,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 11, 2005, pp. 3820–3833.
- [46] W. Yu, D.P. Varodayan, and J.M. Cioffi, “Trellis and Convolutional Precoding for Transmitter-based Interference Presubtraction,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 7, 2005, pp. 1220–1230.