

셀룰러 시스템의 효율성 증대를 위한 셀간 협력 빔형성 (cooperative beamforming) 기술

김진우, 강충구
고려대학교

요약

셀룰러 시스템에서 언제 어디서나 높은 품질의 서비스를 제공하기에 가장 큰 걸림돌로 지적되는 문제점 중의 하나가 바로 셀간 간섭으로 인한 성능 저하이다. 따라서, 간섭으로 인해 셀 경계에서 발생하는 성능 저하를 해결하는 것은 차세대 통신시스템 설계에서 핵심적 요소 중 하나이며, 셀의 소형화를 통해 대역 효율성을 높이고자 하는 시도와 맞물려 더욱 중요한 이슈로 부각되고 있다. 본고는 간섭을 제어하는 수단으로 다중안테나를 이용한 셀간 협력 방식인 협력 빔형성 (cooperative beamforming) 방식을 살펴보고, 최근의 연구와 LTE-Advanced 표준에서의 협력 기술인 CoMP (coordinated multipoint transmission and reception)를 함께 소개한다.

I. 서론

스마트폰의 대중화로 촉발된 모바일 데이터 트래픽의 폭발적인 증가는 앞으로도 꾸준히 추세를 이어갈 전망이다 [1]. 구체적으로 [1]에 따르면 우리나라의 모바일 트래픽은 2012년 한 해 동안 약 80% 증가하였으며, 전 세계적으로는 70%가량 증가하였다. 또한, 2017년에는 2012년 대비 13배 증가하여 전 세계적으로 매달 발생하는 모바일 트래픽이 11.2 EB에 달할 것으로 전망하였다. 이러한 트래픽 폭증에 대응하기 위해 대역 효율성을 증대시키는 획기적이고 다양한 기술들이 논의되고 있다.

셀룰러 시스템에서 셀 경계에 위치한 사용자도 높은 전송률로 서비스 받고자 하지만 실제 셀룰러 환경에서 이를 달성하기는 어렵다. 인접한 셀의 기지국 전송한 신호가 사용자에게 간섭으로 작용하여 서비스 품질을 떨어뜨리기 때문이다. 셀 경계 사용자의 서비스 품질 저하는 셀룰러 시스템의 전체 대역 효율성이 크게 증가할 수 없도록 만든다. 셀 경계 사용자의 문제 때문에 단순히 최대 전송속도를 높이고자 하는 기술은 시스템 전체의 효율을 높이는데 한계가 따른다.

더불어, 단위 면적당 발생하는 트래픽의 증가를 수용하기 위해 셀을 분할하여 주파수 재사용 효율성을 증대시키는 방향으로 셀룰러 네트워크의 용량이 증대되어 왔다는 것을 상기할 필요가 있다. 지난 반 세기 동안 무선용량의 증가에 기여한 다양한 기술적 방안 중, 각 기술이 기여한 바를 정량적으로 살펴보면, 대역폭 확대를 통해서는 25배의 용량을 증가시켰고 셀의 크기를 작게 함으로써 1600배의 용량 증가를 이루었다 [2]. 사용자가 밀집된 상황에서 고속의 데이터 서비스를 제공하기 위해 셀의 소형화 추세는 계속해서 이어지고 있으며, 최근에는 기존 셀 내에 펌토셀(femto cell)이나 피코셀(pico cell), RRH (radio remote head) 등을 통해 작은 영역에서 추가적으로 주파수를 재사용할 수 있도록 네트워크 구축이 이루어지고 있다. 셀이 소형화 된다는 것은 송수신단 사이의 거리가 가까워져 단말의 수신전력이 증가함을 의미한다. 하지만, 셀이 작아질수록 인접 셀과도 거리가 가까워지기 때문에, 인접한 셀들은 서로 협력을 통해 소형화된 셀과 셀 사이의 간섭을 제어해야만 용량 증대를 꾀할 수 있다.

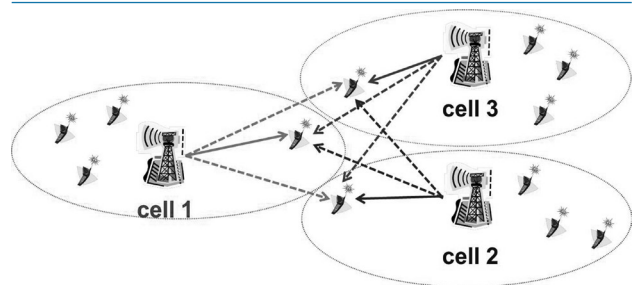


그림 1. 셀룰러 시스템의 셀 경계 간섭

셀간 간섭제어를 통해 셀 경계 부근의 성능을 향상시키고자 하는 다양한 기술 방식 중, 본고에서는 다중 안테나를 사용하여 여러 셀이 협력적으로 빔을 형성하는 협력 빔형성(cooperative beamforming: CB) 방식을 살펴보고자 한다. 협력 빔형성은 3GPP LTE-Advanced에서는 CoMP (coordinated multipoint transmission and reception)라는 이름으로, IEEE 802.16m에서는 Multi-BS MIMO라는 이름으로 각각 표준화가 진행되었다. CoMP나 Multi-BS MIMO 이전의 기존 다중안테나 기

법은 다수의 스트림을 공간적으로 다중화하여 전송률을 높이거나, 페이딩(fading) 채널에서 다이버시티 효과를 확보하는데 주력하였다. 하지만 셀 경계 주변에 위치한 단말의 경우, 성능 저하의 가장 주요한 원인이 바로 인접 셀로부터 받는 간섭이기 때문에, 다수의 안테나를 셀간 간섭을 제어하는 목적으로도 사용하게 되었다.

다중 안테나를 활용해 간섭을 제어하는 방안 이전에, 인접한 셀들이 시간 혹은 주파수 자원을 서로 직교(orthogonal)하도록 함으로써 간섭을 회피해보려는 시도가 먼저 있었다 [3][4]. 하지만, 인접 셀에 미치는 간섭을 회피해주기 위해 서로 자원할당이 직교하도록 하는 것은 일부 자원을 사용하지 못하는 것을 의미한다. 이는 많은 경우에 셀 경계의 성능향상과 네트워크 전체 용량 사이의 득실관계(trade-off)를 야기한다. 협력 빔형성의 경우에는 이러한 자원 사용의 비효율성이 없기 때문에 네트워크 전체 효율성을 높이면서 동시에 셀간 간섭 문제를 해결할 수 있다.

본고는 협력 빔형성 방식을 분류하고, 간섭 채널에서 빔형성 시스템이 어떻게 구성되는지 알아본 후에 최근의 관련 연구에 대해서 살펴본다. 마지막으로, LTE-Advanced 규격에서의 협력 방식인 CoMP의 운용 시나리오와 협력 방식을 소개한다.

II. 협력 빔형성 방식의 분류

협력 빔형성의 방식의 분류는 관점에 따라 다양할 수 있으나, 협력에 참여하는 여러 주체가 공유하는 정보를 기준으로 나누는 것이 일반적이다. 기존의 다중 안테나 시스템에서 채널 정보의 유무에 따라 전송방식을 폐루프(closed-loop)과 개루프(open-loop)로 구분하였던 것과 마찬가지로, 협력 빔형성 시스템도 전송단의 채널 정보 획득 여부를 기준으로 협력 방식을 분류할 수 있다. 협력 빔형성이 기본적으로 추구하는 목표가 셀간 간섭을 제어하려는 것이므로, 협력 빔형성을 위해 필요한 채널 정보는 바로 기지국과 인접한 셀의 단말 사이의 간섭채널이다. 역시 기존 다중안테나 시스템과 마찬가지로 간섭채널 정보를 기지국이 정확히 알 때 협력의 성과를 최대화할 수 있지만, 이를 위해서는 제어채널이나 시스템 설계의 많은 오버헤드가 발생하게 되며, 또한 상황에 따라서는 정확한 채널정보를 기지국이 획득한다는 것이 현실적으로 불가능할 수도 있다.

즉, 기지국의 간섭채널 정보 획득에 필요한 오버헤드와 간섭 제어를 통해 달성한 성능은 서로 득실관계에 놓인다. 따라서 정확한 간섭채널 정보를 기지국이 알고 있다는 가정 하에서 이론적으로 연구를 수행한 후, 코드북[5][6]이나 통계적 정보[7]를

통해 오버헤드를 감소시키면서 가능한 간섭제어의 이득을 유지하는 방향으로 접근할 수 있다. FDD가 아닌 TDD 시스템을 가정할 경우, 상하향링크 채널의 상호 동질적 특성(reciprocity)에 근거하여 채널정보를 기지국이 획득하는 방안을 고려해볼 수도 있다.

기지국의 간섭채널 정보의 획득 유무보다 더 일반적인 협력 방식의 구분은 단말에 전송할 데이터의 공유 여부에 의해 이루어진다. 인접한 셀의 단말에게 전송할 데이터는 공유되지 않는 것이 일반적이며, 이 경우 협력방식은 간섭채널의 정보만을 이용해 상호간에 미치는 간섭을 제거하는데 초점이 맞춰진다. 이와 반대로, 인접한 셀의 단말로 전송할 데이터를 획득한 경우에는 간섭채널을 통해 데이터를 함께 전송함으로써 단순히 간섭을 제거하는 것을 뛰어넘어 매크로 다이버시티(macro-diversity) 효과를 얻을 수 있다. CDMA 시스템에서 셀과 셀 사이의 이동 시에 사용하던 핸드오버(handover)나 방송시스템에 활용되는 SFN(single frequency network)와 유사한 접근으로 해석할 수 있다. 일반적으로 단말에 전송할 데이터는 공유하지 않고 간섭의 제거에 초점을 맞추는 방식을 CB(coordinated beamforming)라 지칭하며, 반대로 간섭채널 정보뿐만 아니라 전송할 데이터까지 공유하여 매크로 다이버시티 이득을 노리는 방식을 JP(joint processing)라 부른다.

JP 방식에서는 인접한 기지국들이 동일한 데이터를 공유하고 있기 때문에 각 기지국의 안테나를 마치 동일한 위치에 있는 다수의 안테나로 가상화하여 협력전송을 수행한다. 이때 정확한 간섭채널 정보를 획득하는 것도 쉽지 않은 문제이지만, 단말에 전송할 데이터를 인접 기지국들이 공유하는 것은 더욱 어려운 문제이다. 가장 먼저 대두되는 것은 기지국간에 데이터 정보를 공유하기 위한 백홀(backhaul)의 문제이다. 간섭채널 정보는 정보량이 많지 않지만, 사용자 데이터는(특히, 멀티미디어 데이터의 경우) 백홀의 용량에 의해 공유에 제약이 발생할 수 있다 [8]. 백홀의 용량이 낮은 경우, CB로 협력하여 얻은 간섭제어의 이득 이상을 JP가 가져오지 못할 수도 있다 [9][10].

시간지연에 민감한 멀티미디어 데이터의 경우에는 데이터 공유에 따르는 지연 시간으로 인해 JP의 동작에 문제가 발생한다. 또한, CB가 간섭채널 정보의 공유 이후에는 각 셀이 분산적으로 동작할 수 있는데 반해, JP는 스케줄링이나 빔형성 벡터의 결정 등을 분산적으로 수행하기 어렵다. 또한 단말이 수행해야 할 동기화나 채널 추정 등에도 오버헤드가 발생하여, 실제 환경을 고려했을 때는 JP를 통한 이득이 기대하기 어려울 수도 있다 [11]. 따라서, 본고는 CB를 중심으로 협력 빔형성 방식을 기술하고자 한다.

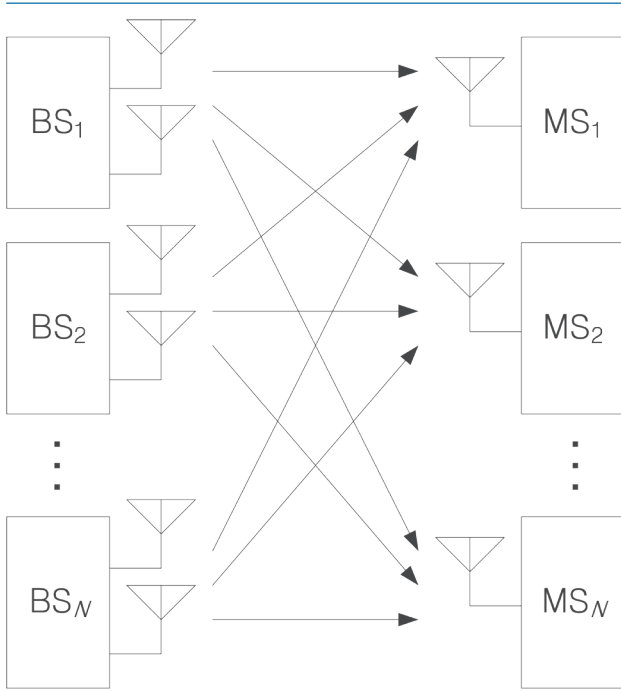


그림 2. 시스템 모델: 간섭채널환경

신단에서 별도의 간섭제어가 이루어지지 않기 때문에, 다른 셀에서 오는 간섭은 잡음과 동일하게 취급된다. CB를 위해 N 개의 셀이 협력전송에 참여한다고 할 때, 간섭채널 모델에서 n 번째 단말의 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_n = \underbrace{\mathbf{h}_{n,n}\mathbf{w}_n s_n}_{\text{desired signal}} + \underbrace{\sum_{m=1, m \neq n}^N \mathbf{h}_{m,n}\mathbf{w}_m s_m}_{\text{Inter-cell interference}} + z_n \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{h}_{m,n}$ 는 m 번째 기지국과 n 번째 단말 사이의 채널 벡터이고, s_n 와 z_n 는 각각 n 번째 단말에 전송되는 신호심볼과 평균 0과 분산 N_0 인 복소 정규분포를 갖는 가산성 열잡음(AWGN)을 나타낸다. 또한, \mathbf{w}_n 는 기지국 n 에서 사용한 빔형성 벡터이다. 각 기지국의 전송전력 P_T 는 최대전송전력 P_T^{\max} 로 제한되기 때문에 $P_T = \|\mathbf{w}_n\|^2 \leq P_T^{\max}, \forall n$ 와 같다. 따라서, N 개의 기지국에서 사용되는 빔형성 벡터 집합 $\mathcal{W} = \{\mathbf{w}_l\}_{l=1}^N$ 이 각 단말의 성능을 결정하게 된다. 식 (1)로부터, 수신된 신호대 간섭 및 잡음의 비율 (SINR)을 다음과 같이 \mathcal{W} 의 함수로 표현할 수 있다.

$$\gamma_n(\mathcal{W}) = \frac{|\mathbf{h}_{n,n}\mathbf{w}_n|^2}{N_0 + \sum_{m=1, m \neq n}^N |\mathbf{h}_{m,n}\mathbf{w}_m|^2} \quad (2)$$

이를 Shannon의 용량식에 적용하면 단말 n 의 전송률은 다음과 같이 표현된다.

$$R_n(\mathcal{W}) = \log_2 \{1 + \gamma_n(\mathcal{W})\} \quad (3)$$

따라서, 어떤 \mathcal{W} 에 의해서 결정된 $R_1(\mathcal{W}), R_2(\mathcal{W}), \dots, R_N(\mathcal{W})$ 을 하나의 전송률 묶음(Rate tuple)으로 볼 때, 달성 가능한 전송률 묶음의 집합 \mathcal{R} 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathcal{R} \triangleq \bigcup_{\mathcal{W}} \{R_1(\mathcal{W}), \dots, R_N(\mathcal{W})\} \quad (4)$$

식 (4)에서 정의된 집합은 \mathcal{R} 은 전송률 묶음이 형성하는 영역(Rate region)으로 해석할 수 있으며, $N=2$ 인 경우에 <그림 3>과 같이 시각화시킬 수 있다. <그림 3>과 같이 R_1 과 R_2 이 달성 가능한 전송률 묶음을 영역으로 표현하였을 때, 영역의 경계를 파레토 경계(Pareto boundary)라 부른다. 파레토 경계 혹은 파레토 최적(Pareto optimality)의 개념은 경제학적 배경에서 탄생되었으며, 누군가의 손실 없이는 어느 누구도 이득이 되는 변화를 만들어낼 수 없는 상태를 의미한다 [12][13]. 따라서, 파레토 경계는 파레토 최적 상태인 점들의 집합으로서, 그 점들에서는 한 사용자의 전송률을 희생하지 않고서는 다른 사용자의

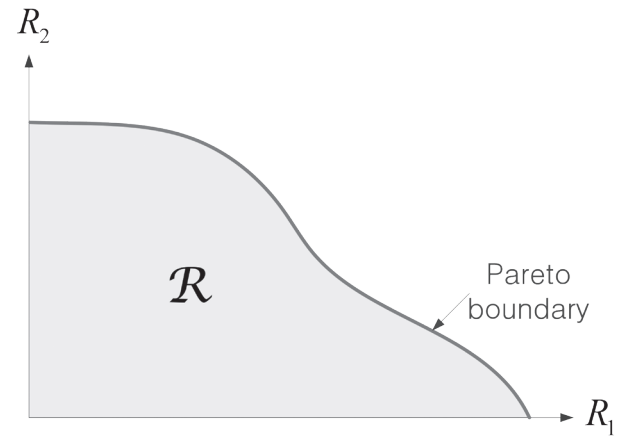


그림 3. 전송률 영역과 파레토 경계

III. 시스템 모델

본 절에서는 N_T 개의 기지국 송신 안테나와 하나의 단말 수신 안테나를 가정한 MISO(multi-input single-output) 시스템의 구조를 살펴본다. N 개의 기지국이 각각 하나의 단말과 통신하는 MISO 구조는 <그림 2>와 같이 간섭채널로 모델링 된다. 수신 단말도 다수의 안테나를 활용해 간섭을 제거하는데 참여할 수 있으나, 일반적으로 CB에서 간섭 제어는 전송단인 기지국이 담당한다. 또한 단말의 전력 소모나 크기를 고려할 때, 하나의 수신 안테나를 가정하는 것이 보다 현실적이다. 다만, 수

전송률을 증가시킬 수 없다.

협력 빔형성 문제에서, 어떤 전송률 묶음에 파레토 우위(Pareto superior)인 다른 전송률 묶음이 존재하지 않는다면, 그 묶음은 파레토 최적이며 파레토 경계에 위치한다. 여기서 파레토 우위란 어떤 전송률 묶음의 모든 전송률이 다른 전송률 묶음의 대응하는 전송률보다 모두 크거나 같은 경우를 말한다. 파레토 최적을 만족한 경우, 전송률 묶음 내의 모든 사용자 전송률을 증가시키는 것은 불가능하다. 파레토 경계가 중요한 이유는 모든 전송률의 합을 최대화시키는 설계와 같이, \mathcal{W} 의 설계를 통해 달성하고자 하는 최적의 지점이 많은 경우 바로 파레토 경계에 존재하기 때문이다.

한편, [14]의 연구결과에서 협력 빔형성의 설계를 위해 중요한 결론을 얻을 수 있다. 전송전력을 최대로 한 상태로 $\|\mathbf{w}_n\|^2 = P_T^{\max}$ 앞서 설명한 파레토 경계 위에 있는 모든 지점들을 달성할 수 있다는 점이다. 이는 협력 빔형성 설계에서 최적의 전력할당을 고려하지 않더라도 파레토 최적인 상태를 달성할 수 있음을 의미한다. 하지만 [14]에서는 파레토 경계에 있는 지점을 달성하는 협력 빔형성 방식을 구하는 방안을 제시하고 있지 않으며, 이는 이후의 연구 주제로 남겨졌다.

IV. 관련 연구

1. 최적 빔형성 기술

본 절에서 살펴볼 관련 연구들은 하향링크 MISO CB를 모두 고려하고 있지만, 일부 시스템 모델이나 가정 등은 본고에서 기술한 시스템 모델과 다소 다를 수 있다. 하지만, 기본적으로 큰 틀에서 동일한 CB문제를 다루고 있기 때문에 협력 빔형성 설계를 위해 어떤 접근을 취하고 있는지 간략히 살펴보고자 한다. 가장 기본적으로 살펴볼 수 있는 관련 연구는 목적함수에 따라 최적의 협력 빔형성 벡터를 구하는 문제이다. [15]에서 저자들은 WSR (weighted sum rate)을 최대화 하고자 하였으며, 이때의 최적화 목적함수인 WSR 유틸리티 함수는 다음과 같다.

$$U(\{R_n\}) = \sum_{n=1}^N \mu_n R_n \quad (5)$$

여기서 $\{\mu_n\}_{n=1}^N$ 는 각 사용자의 가중치 계수로, 각 사용자의 채널 상태가 필요로 하는 서비스의 품질 등에 따라 설정되는 파라미터이다. [16]과 [17]에선 WSR을 최대화하는 빔형성 벡터를 각 셀에서 분산적으로 구할 수 있도록 접근하였다. 기지국과 기지국 사이의 빈번한 정보 교환은 백홀 네트워크에 오버헤드

를 야기시키므로, 분산적으로 빔형성 벡터를 결정하는 접근은 협력 빔형성의 구현 관점에서 상당히 실용적인 접근이다. 한편, 기지국이 채널을 획득하는 방법으로 TDD 시스템의 상향링크 채널 동질성(reciprocity)을 활용한 연구가 [18]에서 수행되었으며, 마찬가지로 WSR을 유틸리티 함수로 사용하였다. 앞서 언급한 바와 같이 TDD 시스템은 과거 페루프 다중안테나 방식에서 채널정보 피드백에 유용한 구조를 제공했던 것과 마찬가지로, 간섭채널 정보를 인접 기지국에 전달하는 데도 활용이 가능하다. 식 (5)의 유틸리티 함수에서 가중치 계수를 모두 1로 설정하여, 각 사용자의 전송률 합을 최대화하고자 하는 연구가 [19]에서 수행되었다.

[20]에서도 WSR를 최대화하고자 최적화가 시도되었으며, MSE (mean square error)를 최소화함을 통해 최적화 문제에 접근하였다. 다만, [20]에서 고려하는 시스템 모델은 수신단에 다수의 안테나를 가정하고 있으며, 기지국이 다수 사용자를 동시에 서비스하여 셀 내 간섭 (Intra-cell interference)도 함께 반영되었다는 특징이 있다. 반면, [21]의 연구는 MSE 합을 그 자체로 목적함수로 하여 MSE가 최소화되도록 설계를 수행하였다.

[22]에서는 일반화된 형태의 유틸리티 함수를 목적함수로 하여 최적화의 복잡도 문제를 주로 다루었으며, 다음과 같은 조화평균(harmonic mean)을 유틸리티 함수가 목적함수로 사용될 시에 최적화 문제가 NP-hard임을 보였다.

$$U(\{R_n\}) = \left(\sum_{n=1}^N R_n^{-1} \right)^{-1} \quad (6)$$

최소 품질을 보장하기 위한 형태의 제약조건을 부과하여 빔형성 벡터를 설계하는 방안이 제시되기도 하였다. 각 사용자의 전송률이 일정 값이 이하로 떨어져 불능(outage) 상태에 빠질 확률을 정의한 후, 불능률이 일정 수준 이하로 유지되도록 제약을 가한 연구가 [23]에서 수행되었다. [24]에서는 최소 SINR 제약조건을 부과하여 전체 전송전력을 최소화하는 문제를 다루었다. 즉, 보장하고자 하는 최소 품질에 해당하는 SINR의 임계값 γ_n^{th} 를 설정한 후, 다음과 같은 제약 조건을 최적화 문제에 부과한다.

$$\gamma_n \geq \gamma_n^{\text{th}}, \forall n \quad (7)$$

[25]에서는 게임이론을 통해 동일한 문제에 접근하였다. [26]의 연구도 마찬가지로 최소 SINR 값이 일정 수준 이상이 되어야 한다는 조건 하에 전송전력을 최소화하고 있으나, 채널 추정 오류를 반영하여 보다 강인한 빔형성 설계를 시도하였다.

최소 품질을 보장하는 것과는 다소 다른 개념으로, 공평성

(fairness)을 유틸리티 함수에 도입하기도 하였다. [27]과 [28]는 최소 SINR을 최대화하는 문제를 설정하였으며, 여기서 유틸리티 함수는 다음과 같이 표현된다.

$$U(\{\gamma_n\}) = \min_n \frac{\gamma_n}{\mu_n} \quad (8)$$

여기서 μ_n 는 가중치 계수로 각 사용자의 평균 SINR의 편차를 보정해주는 역할을 수행할 수 있다.

2. 빔형성을 위한 사용자 선택 방식

협력을 위한 빔형성 벡터를 어떻게 설계할 것인가와 별도로 협력 전송을 통해 성능을 개선시킬 사용자를 선택하는 스케줄링 방법에 대한 연구가 이루어져 왔다. 앞서 시스템 모델과 관련 연구들을 다룰 때는 각 기지국이 한 단말을 서비스하고 있는 것으로 가정하였다. 협력적 스케줄링은 기지국의 서비스 영역 내에 존재하는 다수의 단말 가운데 어떤 단말을 선택하여 간섭을 제어할 것인가 결정한다. [29]에서는 협력에 참여하는 각 기지국이 MRT (maximum ratio transmission) 빔형성 벡터의 사용함을 가정한다. 이는 간섭 제거를 위한 별도의 고려 없이 전달되는 신호의 세기를 최대화하겠다는 접근이다. 즉, 기지국 m 이 사용하는 빔형성 벡터는 다음과 같이 간단히 구해진다.

$$\mathbf{w}_{k_n}^{\text{MRT}} = \frac{\mathbf{h}_{n,k_n}^H}{\|\mathbf{h}_{n,k_n}\|} \quad (9)$$

여기서 \mathbf{h}_{m,k_n} 는 기지국 n 의 서비스 영역에 위치한 단말 k_n 와 기지국 m 사이의 채널 벡터이다($k_n = 1, 2, \dots, K_n$). 빔형성 벡터로 MRT를 사용하는 대신, 간섭 제어는 채널 벡터가 서로 직교하는 사용자 묶음을 선택함으로써 달성한다. [29]에서 예로 들고 있는 $N = 3$ 인 경우, 우선 ρ_1, ρ_2, ρ_3 를 다음과 같이 정의하며, 이는 각 기지국이 다른 셀의 단말과 형성하는 직교성을 나타낸다.

$$\rho_1 = \frac{|\mathbf{h}_{1,k_1}^H \mathbf{h}_{1,k_2}|}{\|\mathbf{h}_{1,k_1}\| \|\mathbf{h}_{1,k_2}\|} + \frac{|\mathbf{h}_{1,k_1}^H \mathbf{h}_{1,k_3}|}{\|\mathbf{h}_{1,k_1}\| \|\mathbf{h}_{1,k_3}\|},$$

$$\rho_2 = \frac{|\mathbf{h}_{2,k_2}^H \mathbf{h}_{2,k_3}|}{\|\mathbf{h}_{2,k_2}\| \|\mathbf{h}_{2,k_3}\|} + \frac{|\mathbf{h}_{2,k_2}^H \mathbf{h}_{2,k_1}|}{\|\mathbf{h}_{2,k_2}\| \|\mathbf{h}_{2,k_1}\|},$$

$$\rho_3 = \frac{|\mathbf{h}_{3,k_3}^H \mathbf{h}_{3,k_1}|}{\|\mathbf{h}_{3,k_3}\| \|\mathbf{h}_{3,k_1}\|} + \frac{|\mathbf{h}_{3,k_3}^H \mathbf{h}_{3,k_2}|}{\|\mathbf{h}_{3,k_3}\| \|\mathbf{h}_{3,k_2}\|}$$

위 정의를 이용하여 스케줄링 문제는 다음과 같이 정식화된다.

$$\arg \min_{k_1, k_2, k_3} \rho_1 + \rho_2 + \rho_3 \quad (10)$$

[29]의 저자들은 유사한 접근을 [30]에서도 시도하였으며, 주요한 차이점은 식 (9)의 MRT 빔형성 벡터가 아닌 ZF (zero forcing) 빔형성 벡터를 사용하였다는 점이다. ZF 빔형성은 인접 셀에 간섭을 제거하는 조건을 만족함과 동시에 신호 세기를 최대화하는 접근이다. 역시 $N = 3$ 인 경우를 가정할 경우, ZF 빔형성 벡터 $\mathbf{w}_{k_1}^{\text{ZF}}$ 는 다음 최적화 문제의 해이다.

$$\arg \max_{\mathbf{w} | \mathbf{h}_{1,k_2} \mathbf{w} = \mathbf{h}_{1,k_3} \mathbf{w} = 0} |\mathbf{h}_{1,k_1} \mathbf{w}| \quad (11)$$

마찬가지로 $\mathbf{w}_{k_2}^{\text{ZF}}$ 와 $\mathbf{w}_{k_3}^{\text{ZF}}$ 도 정의할 수 있다. 식 (11)의 해는 다음과 같이 주어진다[31].

$$\mathbf{w}_{k_1}^{\text{ZF}} = \frac{\mathbf{\Pi}_{\mathbf{H}_{23}}^\perp \mathbf{h}_{1,k_1}^H}{\|\mathbf{\Pi}_{\mathbf{H}_{23}}^\perp \mathbf{h}_{1,k_1}^H\|} \quad (12)$$

여기서, \mathbf{H}_{23} 와 $\mathbf{\Pi}_{\mathbf{H}_{23}}^\perp$ 은 다음과 같이 주어지며, 각각 간섭채널 벡터를 연결하여 얻은 간섭채널 행렬과 \mathbf{H}_{23} 의 영공간(null space)으로 투사시키는 정사영(projection) 행렬을 나타낸다.

$$\mathbf{H}_{23} = \begin{bmatrix} \mathbf{h}_{1,k_2}^H & \mathbf{h}_{1,k_3}^H \end{bmatrix}^H$$

$$\mathbf{\Pi}_{\mathbf{H}_{23}}^\perp = \mathbf{I} - \mathbf{H}_{23}^H (\mathbf{H}_{23} \mathbf{H}_{23}^H)^{-1} \mathbf{H}_{23}$$

단순히 가장 채널 벡터가 직교하는 사용자 묶음을 선택함으로써 간섭을 제어했던 [29]의 접근과는 달리, [30]에서는 빔형성 벡터를 통해 간섭을 제거하였으므로 스케줄링 목적함수도 다르게 변형하였다. 순시적 채널 이득이 상대적으로 큰 사용자에게 자원을 할당함으로써 다중사용자 다이버시티 이득(multi-user diversity)을 획득할 수 있도록 다음과 같이 스케줄링 문제를 정식화하였다.

$$\arg \min_{k_1, k_2, k_3} \frac{F(\|\mathbf{h}_{1,k_1}\|) + F(\|\mathbf{h}_{2,k_2}\|) + F(\|\mathbf{h}_{3,k_3}\|)}{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3} \quad (13)$$

여기서 $F(\cdot)$ 는 채널 이득의 norm이 갖는 분포의 누적분포함수(CDF)다. 또한 ρ_1, ρ_2, ρ_3 는 식 (10)에서 정의한 것과 동일하다.

한편, 모든 기지국이 MRT와 ZF 빔형성 방식 중 하나만을 동일하게 적용하지 않고 선택적으로 사용하는 접근이 [32]와 [33]에서 각각 중앙통제적 방식과 분산적 방식으로 시도되었다. 또한, [34]에서는 복잡도가 높은 협력 스케줄링 문제의 해법으로 유전자 알고리즘(genetic algorithm)이 사용되기도 하였으며, [35]에서는 VoIP와 같은 서비스의 트래픽을 고려한 협력 스케줄링도 연구가 수행되었다.

V. LTE-Advanced 규격의 CoMP 기술

1. CoMP 시나리오

앞서 살펴본 협력 빔형성의 경우, 다수의 기지국이 협력하여 서로 미치는 간섭을 제어하는 상황을 가정하고 기술하였다. 하지만 LTE-Advanced에서 구성하고 있는 시나리오는 기지국(eNB)만으로 구성된 네트워크 형태에 국한되지 않는다. 기지국의 섹터간 협력, 그리고 기지국과 유선으로 연결된 RRH (radio remote head)를 고려하여 총 4가지의 시나리오를 LTE-Advanced는 고려하고 있다. LTE-Advanced의 규격화 작업은 이 4가지의 시나리오를 구현할 수 있도록 목표를 설정하여 진행되었다. 이들 시나리오는 <그림 4>의 예시를 참조할 수 있다.

시나리오1과 시나리오2는 모든 전송주체가 동일한 전송전력을 사용하는 동종 네트워크 (homogeneous network)을 가정한다. 이중에서, 시나리오 1은 한 기지국의 섹터간 협력에 관한 경우이다. 협력해야 할 각 섹터들이 모두 물리적으로 동일한 기지국에 위치해 있으므로, 채널상태나 데이터 정보 교환 측면에서 제약이 없는 경우이다. 기지국과 기지국 사이의 유선 네트워크를 통해 정보를 공유해야 할 필요가 없으므로, 시나리오 1은 4가지 시나리오 중 가장 쉽게 구현될 수 있다. 시나리오 2는 시나리오 1과 마찬가지로 동종 네트워크에서 서로 다른 곳에 위치한 기지국과 기지국(혹은 고전력 RRH)이 협력하는 경우이다. 즉, 시나리오 1에 비해 시나리오 2는 협력의 범위가 더 넓다. 시나리오 2에서 기지국과 기지국 사이는 광케이블과 같은 유선으로 연결되어 있다. 시나리오 2에서 협력이 이루어질 수 있는 범위가 상대적으로 넓기 때문에, 셀 경계의 성능 개선효과는 시나리오 2가 시나리오 1보다 클 것으로 예상된다.

시나리오 3과 4에는 기지국과 다른 전송전력을 갖는 RRH를 등장시켜 이종 네트워크 (heterogeneous network)를 가정한다. 시나리오 3은 높은 전송전력의 기지국이 형성하는 셀 영역 내에 낮은 전송전력의 RRH가 독립적인 작은 셀을 형성하는 경우이다. RRH가 독립적인 셀을 구성하기 때문에, 시나리오 3은 RRH가 형성하는 셀이 기지국과 다른 별도의 셀 아이디를 갖는다. 반대로 시나리오 4는 낮은 전송전력의 RRH가 별도의 셀 아이디를 갖지 않으며, 기지국의 분산 배치된 안테나의 역할을 수행하며 DAS (Distributed antenna system)를 구성한다. 따라서 시나리오 3과 시나리오 4는 동일한 네트워크 구조를 갖지만, 시나리오 4에서는 RRH 사이의 핸드오버 절차와 같은 제어 채널의 개입이 필요 없다. 다만, 시나리오 4에서는 RRH와 기지국 사이의 시간 지연이 짧아야 하고, 백홀 네트워크에 충분한 용량이 확보되어야 한다.

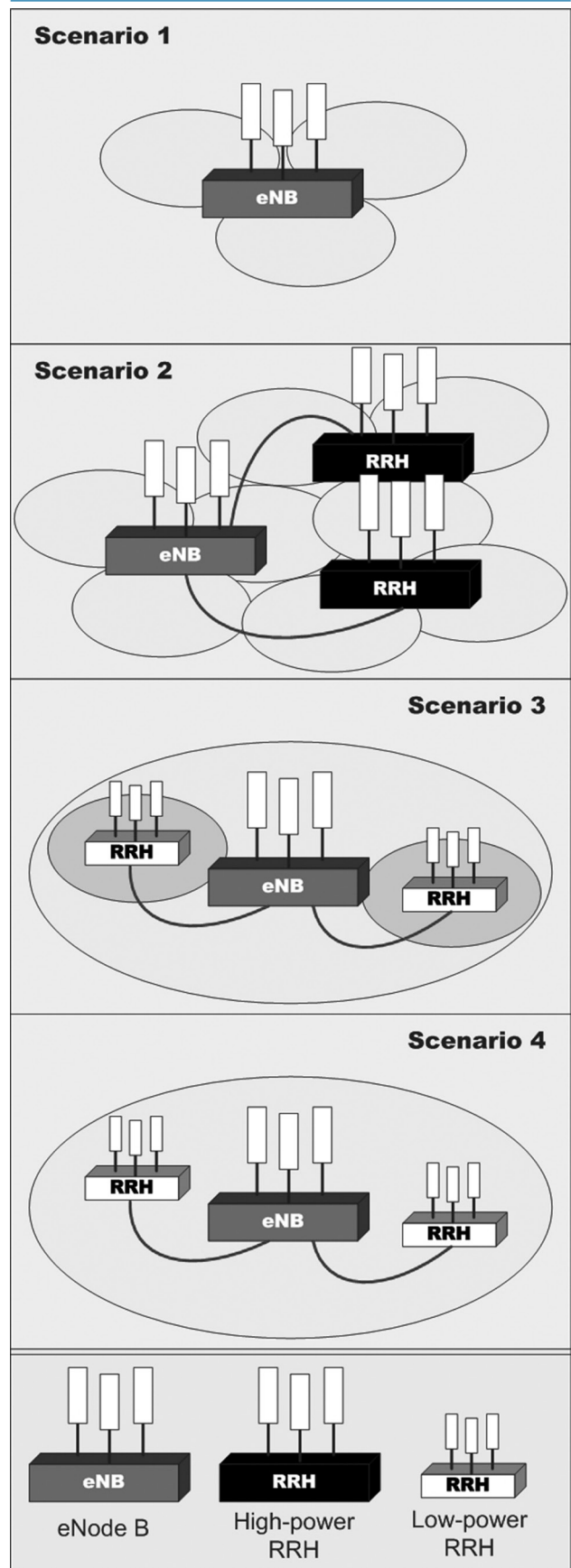


그림 4. LTE-A CoMP 시나리오 [36]

2. CoMP 협력 방식

LTE-Advanced 규격의 하향링크 CoMP는 기지국 (eNB)과 고/저전력 RRH를 통칭하여 전송점(TP: transmission point)라 부른다. 따라서, CoMP는 전송점간의 협력으로 이해될 수 있으며, 이후의 설명에서 기지국과 RRH를 구분하지 않고 전송점으로 통칭한다.

CoMP에서 고려하는 협력 방식은 4가지로, 앞서 설명한 JP (joint processing), CS/CB (coordinated scheduling/beamforming)에 DPS (dynamic point selection)과 DPB (dynamic point blanking)이 포함된다. 이 중 DPS와 DPB는 간섭 제어를 위해 다중안테나를 활용하는 방식은 아니다.

DPS는 과거 점대점 MIMO 시스템에서 안테나 선택(antenna selection)을 통해 얻었던 다이버시티 이득을 전송점 선택에서도 동일하게 추구하겠다는 접근이다. 다시 말해, 채널의 페이딩을 반영하여 가장 링크 품질이 좋은 전송점을 적응적으로 선택하겠다는 접근이다. 반면 DPB는 심각한 간섭을 야기하는 전송점의 전송을 중지시킴으로써, 간섭제거의 목적을 달성한다. 따라서, DPS는 DPB와 결합적으로 사용할 수 있다. 즉, DPS에서 선택 받지 못한 전송점은 간섭을 발생시키지 않도록 전송을 중단하는 방안이다. 이렇게 함으로써, 다이버시티 이득과 간섭 제거 이득을 동시에 얻을 수도 있다. DPS/DPB는 전송점을 빠르게 적응적으로 선택하고 제어해야 하므로, 시나리오 3/4에 적용되어 RRH를 제어하는 협력 방식으로 활용될 수 있다.

VI. 결론

본고는 셀룰러 통신시스템에서 대역 효율성을 극대화하기 위한 셀간 간섭 제어의 해결책으로서, 다중안테나를 사용한 협력 빔형성 방식을 살펴보았다. 최근의 연구결과들은 빔형성을 통한 협력을 셀간 간섭을 해소하고 셀 경계의 성능을 향상시키기 위해 다양한 접근들을 모색하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, LTE-Advanced의 협력 방식인 CoMP 기술에서 고려하고 있는 시나리오와 그에 따른 협력의 구조 및 방식에 간략히 대해서 살펴보았다. 셀 경계의 성능 향상이 앞으로도 계속 고려되어야 할 주요한 이슈인 만큼, 협력을 통한 해법 찾기에 다양한 연구와 규격화가 지속적으로 이루어질 것으로 예상된다.

참고 문헌

- [1] Cisco, "Cisco visual networking index: Global data traffic forecast update, 2012-2017," Feb. 2013.
- [2] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews and A. Gatherer, "Femtocell Networks: A Survey," IEEE Communications Magazine, vol. 46, no. 9, pp. 59-67, Sep. 2008.
- [3] M. C. Necker, "Interference Coordination in Cellular OFDMA Networks," IEEE Network, vol. 22, no. 6, pp. 12-19, Nov. 2008.
- [4] G. Boudreau, J. Panicker, N. Guo, R. Chang, N. Wang, and S. Vrzic, "Interference Coordination and Cancellation for 4G Networks," IEEE Communications Magazine, vol. 47, no. 4, pp. 74-81, April 2009.
- [5] X. Hou and C. Yang, "Codebook Design and Selection for Multi-cell Cooperative Transmission Limited Feedback Systems," in Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2011 spring), May 2011.
- [6] H. D. Han, C. Zhu, Y. Xu, Y. Wang and Z. Ding, "Joint Transmission Using Global Codeword and Codebook Design for Coordinated Multipoint Processing (CoMP)," in Proceedings of IEEE GLOBECOM Workshops (GLOBECOM 2012), Dec. 2012.
- [7] M. Ding and Q. T. Zhang, "Stochastic Precoding for MISO Interference Channels with Channel Mean Feedback," IEEE Transactions on Communications, vol. 60, no. 4, pp. 1082-1090, April 2012.
- [8] D. Samardzija and H. Huang, "Determining backhaul bandwidth requirements for network MIMO," in Proceedings of European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2009), Aug. 2009.
- [9] J. Zhang and J. Andrews, "Adaptive spatial intercell interference cancellation in multicell wireless networks," IEEE Journal on Selected Areas Communications, vol. 28, no. 9, pp. 1455-1468, Dec. 2010.
- [10] N. Seifi, M. Viberg, J. Robert, W. Heath, J. Zhang, and M. Coldrey, "Coordinated single-cell vs multi-cell transmission with limited-capacity backhaul," in Proceedings of IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR 2010), Nov.

- 2010.
- [11] G. Caire, A. Ramprasad, and C. Papadopoulos, "Rethinking network MIMO: Cost of CSIT, performance analysis and architecture comparison," in Proceedings of IEEE Information Theory and Application Workshop (ITA 2010), Jan. 2010.
- [12] R. Frisch, *Maxima and Minima: Theory and Economic Applications*. Chicago, IL: McNally, 1966.
- [13] M. D. Intriligator, *Mathematical Optimization and Economic Theory*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1971.
- [14] E. Jorswieck, E. Larsson, and D. Danev, "Complete characterization of the Pareto boundary for the MISO interference channel," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 10, pp. 5292–5296, Oct. 2008.
- [15] L. Liu, R. Zhang and K. C. Chua, "Achieving Global Optimality for Weighted Sum-Rate Maximization in the K-User Gaussian Interference Channel with Multiple Antennas," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vo. 11, no. 5, pp. 1933–1945, May 2012.
- [16] H. J. Choi, S. H. Park, S. R. Lee and I. Lee, "Distributed Beamforming Techniques for Weighted Sum-Rate Maximization in MISO Interfering Broadcast Channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vo. 11, no. 4, pp. 1314–1320, April 2012.
- [17] S. H. Park, H. Park, H. Kong and I. Lee, "New Beamforming Techniques Based on Virtual SINR Maximization for Coordinated Multi-Cell Transmission," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 1034–1044, March 2012.
- [18] P. Komulainen, A. Tolli and M. Juntti, "Effective CSI Signaling and Decentralized Beam Coordination in TDD Multi-Cell MIMO Systems," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Accepted for Publication.
- [19] M. Á. Vázquez, A. Pérez-Neira and M. Á. Lagunas, "Generalized Eigenvector for Decentralized Transmit Beamforming in the MISO Interference Channel," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 4, pp. 878–882, Feb. 2013.
- [20] Q. Shi, M. Razaviyayn, Z. Q. Luo and C. He, "An Iteratively Weighted MMSE Approach to Distributed Sum-Utility Maximization for a MIMO Interfering Broadcast Channel," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 9, pp. 4331–4340, Sep. 2011.
- [21] T. M. Kim, F. Sun and A. J. Paulraj, "Low-Complexity MMSE Precoding for Coordinated Multipoint With Per-Antenna Power Constraint," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 20, no. 4, pp. 395–398, April 2013.
- [22] Y. F. Liu, Y. H. Dai, Z. Q. Luo, "Coordinated Beamforming for MISO Interference Channel: Complexity Analysis and Efficient Algorithms," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 3, pp. 1142–1157, March 2011.
- [23] W. C. Li, T. H. Chang, C. Lin and C. Y. Chi, "Coordinated Beamforming for Multiuser MISO Interference Channel Under Rate Outage Constraints," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 5, pp. 1087–1103, March 2013.
- [24] H. Dahrouj and W. Yu, "Coordinated Beamforming for the Multicell Multi-Antenna Wireless System," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vo. 9, no. 5, pp. 1748–1759, May 2010.
- [25] D. H. N. Nguyen and T. Le-Ngoc, "Multiuser Downlink Beamforming in Multicell Wireless Systems: A Game Theoretical Approach," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 7, pp. 3326–3338, July 2011.
- [26] C. Shen, T. H. Chang, K. Y. Wang, Zhengding Qiu and Chong-Yung Chi, "Distributed Robust Multicell Coordinated Beamforming with Imperfect CSI: An ADMM Approach," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 60, no. 6, pp. 2988–3003, June 2012.
- [27] Y. Huang, G. Zheng, M. Bengtsson, K. K. Wong, L. Yang and B. Ottersten, "Distributed Multicell Beamforming Design Approaching Pareto Boundary with Max-Min Fairness," *IEEE Transactions on*

Wireless Communications, vo. 11, no. 8, pp. 2921–2933, Aug. 2012.

[28] D. W. H. Cai, T. Q. S. Quek, C. W. Tan and S. H. Low, "Max–Min SINR Coordinated Multipoint Downlink Transmission—Duality and Algorithms," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 60, no. 10, pp. 5384–5395, Oct. 2012.

[29] H. Wang, Z. Li, N. Liu, Z. Pan and X. You, "A Novel Opportunistic Scheduling Algorithm in Coordinated Multi–Point Transmission Scenario," in Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC 2012 fall), Sep. 2012.

[30] H. Wang, N. Liu, Z. Li, Z. Pan and X. You, "Joint MUD Exploitation and ICI Mitigation Based Scheduling with Limited Base Station Cooperation," in Proceedings of IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2012), Sep. 2012.

[31] E. G. Larsson and E. Jorswieck, "Competition versus cooperation on the MISO interference channel," IEEE Journal on Selected Areas on Communications, vol. 26, no. 7, pp. 1059–1069, Sep. 2008.

[32] S. H. Moon, C. Lee, S. R. Lee and I. Lee, "Joint User Scheduling and Adaptive Intercell Interference Cancellation for MISO Downlink Cellular Systems," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 62, no. 1, pp. 172–181, Jan. 2013.

[33] J. Kim, In S. Hwang, and C. G. Kang, "Inter–Cell Coordinated Beamforming with Opportunistic Scheduling," to be presented in IEEE International Conference on Communications (ICC 2013), June 2013.

[34] D. Wang, X. Xu, X. Chen and X. Tao, "Joint Scheduling and Resource Allocation Based on Genetic Algorithm for Coordinated Multi–Point Transmission Using Adaptive Modulation," in Proceedings of IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2012), Sep. 2012.

[35] B. Huang, J. Li, and T. Svensson, "Joint Scheduling for Multi–Service in Coordinated Multi–Point OFDMA Networks," in Proceedings of IEEE Vehicular

Technology Conference (VTC 2012 spring), May 2012.

[36] J. Lee, Y. Kim, H. Lee, B. L. Ng, D. Mazzaresse, J. Liu, W. Xiao, and Y. Zhou, "Coordinated Multipoint Transmission and Reception in LTE–Advanced Systems," IEEE Communications Magazine, vol. 50, no. 11, pp. 44–50, Nov. 2012.

약 력



김진우

2005년 고려대학교 공학사
 2012년 고려대학교 공학박사
 2012년~현재 고려대학교 정보통신기술연구소 연구교수
 관심분야: 협력통신, 다중안테나시스템, Cross-Layer Design



강충구

1987년 Univ. of California (San Diego), 전자공학과 학사
 1993년 Univ. of California (Irvine), 전자 및 컴퓨터 공학과 석사/박사
 1992년~1993년 (미) Aerospace Corp. 연구원
 1993년~1994년 (미) Rockwell International 연구원
 1994년~현재 고려대학교 전기전자공학부 교수
 2000년~2001년 (미) Center for Wireless Communication, UCSD 방문 교수
 2005년~2005년 한국통신학회 이동통신연구회 위원장
 2008년~현재 TTA PG702 IMT–WiBro 프로젝트 그룹 의장
 2006년~현재 한국통신학회 상임/집행이사
 관심분야: 무선 전송 기술 및 매체접근제어 프로토콜 설계/구현, 무선 네트워크(Wireless PAN/LAN/MAN) 제어 프로토콜 설계 및 성능 분석, 이동통신 시스템 및 무선 서비스 공학