

이종 셀룰러 망에서 계층 간 간섭완화를 위한 인지 빔형성 기법

서주열*, 박승영^o

A Cognitive Beamforming Scheme for Cross-Tier Interference Mitigation in Heterogeneous Cellular Networks

Ju-yeol Seo*, Seungyoung Park^o

요약

기존의 이종 셀룰러 망 환경에 허가된 사용자만이 기지국에 접속되는 closed access 정책이 적용되면, 매크로셀 사용자는 주변의 접속이 허용되지 않는 소형셀 기지국으로 인한 cross-tier 간섭 문제를 겪게 된다. 이 문제를 완화하기 위해 해당 소형셀 기지국이 매크로셀 사용자의 채널에 직교하는 빔형성 벡터를 사용하여 자신에게 속한 사용자에게 데이터를 전송하는 기법이 제안되었다. 이 기법을 적용하기 위해서는 매크로셀 기지국, 매크로셀 사용자, 소형셀 기지국 간의 상호 정보교환이 필요하므로 이로 인해 시스템의 복잡도가 증가하게 된다. 본 논문에서는 상호 정보교환 없이 소형셀 기지국이 스스로 환경을 인지하여 co-tier 간섭전력뿐만 아니라 cross-tier 간섭전력을 동시에 줄일 수 있는 인지 빔형성 기법을 제안한다. 구체적으로 소형셀 기지국이 cross-tier 간섭문제를 겪는 사용자를 파악한 후, 해당 사용자의 채널과 주변 소형셀 사용자 채널에 동시에 직교하는 빔형성 벡터를 생성하여 데이터 전송에 사용하여 cross-tier 간섭과 co-tier 간섭을 동시에 줄인다. 제안 기법의 유효성을 검증하기 위해 시스템 레벨 시뮬레이션을 수행하였고, 해당 결과를 통해 제안된 기법이 cross-tier 간섭을 효과적으로 줄일 수 있음을 확인하였다.

Key Words : cognitive beamforming, cross-tier interference, co-tier interference, interference mitigation, dual-stripe apartment model, heterogeneous cellular networks

ABSTRACT

When a closed access policy in which only an authorized user is allowed to access to a given base station (BS) has been employed in heterogeneous cellular networks, a macro-cell user is used to experience strong cross-tier interference from its adjacent small-cell BSs to which the user is not allowed to access. To mitigate this problem, it has been proposed that a small-cell BS employs a beamforming vector which is orthogonal to the channel of the victim user. However, this technique requires considerable mutual exchange of information among the macro-cell BS, the macro-cell user, and the small-cell BS. In this paper, we propose a cognitive beamforming scheme, in which a small-cell BS employs the beamforming orthogonal to the victim users' channel

* First Author : Division of Electrical and Electronic Engineering, College of Information Technology, Kangwon National University, tjwdu2@kangwon.ac.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : Division of Electrical and Electronic Engineering, College of Information Technology, Kangwon National University, s.young.park@kangwon.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2016-07-142, Received July 8, 2016; Revised August 30, 2016; Accepted August 31, 2016

without any explicit mutual information exchange. Particularly, the small-cell BS finds small- and macro-cell users experiencing the co-tier and cross-tier interferences from it, respectively. Then, it employs a beamforming which is orthogonal to the victim users' channels to mitigate the co-tier and cross-tier interferences. Using the system-level simulation, we demonstrate that the proposed scheme effectively mitigates the cross-tier interference problem.

I. 서 론

모바일 기기에서 요구되는 데이터 전송량은 최근 1년간 74% 증가하였으며, 향후 5년 이내에 8배 가까이 증가할 것으로 예상된다^[1]. 이러한 무선 데이터 전송량의 폭발적인 증가를 지원하기 위해서는 단위 면적당 전송률을 높여야 한다. 이를 위해 기존의 매크로셀 위에 소형셀 (예: 마이크로셀 / 피코셀 / 펠토셀)을 설치하여 기지국과 사용자 사이의 경로 감쇄를 줄임으로써 결과적으로 용량을 증가시킬 수 있는 이중 셀룰러 망 개념이 등장하였다^[2]. 이러한 소형셀들은 매크로셀보다 설치비용이 훨씬 적고 저전력으로 동작할 수 있어 운용 비용도 적다는 장점이 있어 큰 관심을 받고 있다.

이중 셀룰러 망에서 소형셀 기지국은 통상적으로 주택이나 아파트 실내의 커버리지를 확장하는 데 사용한다. 이때, 일반적인 기지국처럼 사업자 서비스에 가입한 모든 가입자를 접속하도록 허용하지 않고 특정 사용자 그룹만을 접속할 수 있도록 제어할 수 있는 데 이를 closed access 정책이라고 한다. 그에 반해 모든 사용자가 제한 없이 소형셀 기지국에 접속할 수 있는 정책은 open access 정책이라 한다. 현실적인 문제로 인해 closed access 정책이 적용되는 경우, 매크로셀과 소형셀 간의 간섭, 즉, cross-tier 간섭이 심각해진다. 예를 들어 매크로셀에 소속된 사용자가 소형셀 기지국으로 접근하게 되는 경우를 고려해보자. open access 정책의 경우, 매크로셀에 소속된 사용자에게 소형셀 기지국으로 인한 cross-tier 간섭전력이 커지게 되면 해당 매크로셀에 소속된 사용자는 해당 소형셀 기지국으로 핸드오프 수행하여 소속 기지국을 옮기면 cross-tier 간섭 문제를 간단하게 해결할 수 있다. 그러나, closed access 정책의 경우, 해당 소형셀 기지국으로의 접속이 금지되어 있으면 cross-tier 간섭을 해결할 수 없게 된다.

이러한 cross-tier 간섭문제를 해결하기 위해, 주파수 할당을 통해서 계층 간의 간섭을 피하는 기법이 제안되었다^[3,4]. 그러나 이 기법을 사용하기 위해서는 주파수 분할 사용으로 인해 자원 사용의 효율이 떨어지

기 때문에 전체적인 전송 효율이 떨어지게 된다. 또한, 소형셀이 중앙의 제어기에서 매크로셀과 소형셀의 기지국과 사용자가 최적의 성능을 얻을 수 있도록 스케줄링을 통해 전력 조절을 활용하여 간섭을 제어하는 기법이 제안되었다^[5,6]. 그러나, 이 기법을 적용하기 위해서는 중앙 제어기에 모든 계층의 정보를 보내야 하므로 오버헤드가 존재하며, 제어기에서 각 기지국과 사용자별 최적의 전력할당을 하기 위해 큰 복잡도의 계산량을 가지는 단점이 존재한다. 또한, 소형셀이 매크로셀로부터 오는 신호의 세기에 기반을 두어 전송 전력을 선택하는 방법과 할당할 부반송파를 동적으로 관리하는 기법이 제안되었다^[7]. 그러나 이 기법은 소형셀의 밀도가 높을 때 소형셀 간의 간섭을 효율적으로 제어하기 어렵다. 이 외에도, 소형셀이 스스로 네트워크 사용자의 위치를 파악하고 서버 채널의 신호 간섭 정도에 따라 사용자에게 적절한 서버 채널을 할당하는 인지 소형셀 기법이 제안되었으나^[8], 이 기법은 소형셀들이 밀집한 환경에 있을 때 인접 소형셀들로 인한 채널 간섭 때문에 효율성이 감소하는 단점이 있다.

최근에는 공동 채널 감지 및 자원 할당을 통하여 소형셀 네트워크에서의 간섭을 완화하는 기법이 제안되었다^[9]. 이 기법은 채널 검출과 동시에 자원 할당을 수행하는 정상 소형셀 모듈에 감지 모듈을 추가로 구성하여 공동 사용하는 기법으로서 간섭 변환 함수를 바탕으로 자원 할당 알고리즘을 제시하고 변형된 채널 이득에 간섭 정보를 통합함으로써 우선순위가 높은 매크로셀 사용자는 간섭을 거의 받지 않는다. 또한, 외부 영역을 포함하는 여섯 개의 지향성 안테나를 사용하여 성능을 분석하고 매크로셀 네트워크에 대한 효율적인 부분 주파수 재사용 방식을 제공하는 기법이 제안되었다^[10]. 이 기법은 소형셀 네트워크가 매크로셀 네트워크로부터 수신된 간섭을 분석하고 간섭의 정도에 기초하여 소형셀에 매크로셀이 할당하지 않은 자원을 할당하여 cross-tier 간섭을 완화한다. 또한, 매크로셀 사용자가 소형셀 네트워크에서의 간섭 관리를 위한 적응적 자원 할당 기법이 제안되었다^[11]. 이 기법은 소형셀이 인접한 환경에서 실용적이며 최적화된

채널 할당과 간섭 관리 알고리즘으로 구성된 부분 주파수 재사용 기법이다.

주파수 분할 사용으로 인한 효율성 감소나, 중앙 제어가 모든 정보를 관리하고 제어해야 하는 등의 문제점들을 보완하기 위하여, 소형셀 기지국으로부터 큰 cross-tier 간섭전력을 수신하는 매크로셀 사용자의 채널에 직교하는 빔형성 벡터를 사용하는 기법이 제안되었다^[12]. 이 기법을 적용하기 위해서는 i) 해당 소형셀 기지국과 사용자 간의 채널 상태 정보를 소형셀 기지국에서 완벽하게 파악하고 있어야 하며, ii) 소형셀 기지국이 어떤 매크로셀 사용자에게 이러한 빔형성 벡터를 적용해야 하는지 알고 있어야 하고, iii) 해당 매크로셀 사용자가 하향링크 데이터를 수신하는 시점을 알고 있어야 한다. 따라서 매크로셀 기지국, 매크로셀 사용자, 소형셀 기지국 간의 상호 정보 교환이 필요하며, 이로 인해 시스템의 복잡도가 증가하게 된다.

먼저, 해당 매크로셀 사용자와 소형셀 기지국 간의 채널 상태 정보는 time division duplex (TDD) 환경에서 채널의 상호관계 (channel reciprocity) 성질에 의해 매크로 사용자가 전송하는 파일럿 신호를 소형셀 기지국이 수신하여 해당 채널을 추정할 수 있다. 또한, 소형셀 기지국이 매크로셀 기지국의 제어채널을 수신하여 해당 사용자가 어느 시점에서 데이터를 수신받는지 파악하여 해당 시점에 직교 빔형성을 적용할 수 있으므로 구현 복잡도를 상당히 완화할 수 있다^[13]. 하지만, 이 기법은 여전히 어떤 소형셀 기지국이 어떤 매크로셀 사용자에게 cross-tier 간섭을 줄이는 직교 빔형성을 적용해야 하는지 결정하는 것은 각 기지국 및 사용자의 위치에 대한 정보를 상호 교환하여 결정해야 한다.

또한, 이 기법은 매크로셀이 하향링크로 동작할 때, 소형셀이 상향링크로 동작하는 reverse TDD를 적용하여 cross-tier 간섭을 완화하였다. 구체적으로, 소형셀의 상향링크에서, 소형셀 사용자는 모든 매크로셀 사용자들에게 수신되는 간섭전력의 최댓값이 특정 값 이하가 되도록 전송전력을 조정하여 데이터를 전송한다. 다중 안테나를 가진 소형셀 기지국은 인접 매크로셀 기지국과 인접 소형셀 사용자들의 간섭 신호를 완화하는 minimum mean squared error (MMSE) 수신을 이용하여 신호를 수신한다. 소형셀의 하향링크에서는, 상향링크 신호를 수신하기 위해 사용된 MMSE 수신기의 weight 벡터를 정규화한 벡터를 사용하여 신호를 전송한다. 해당 weight 벡터는 인접 매크로셀 기지국과 인접 소형셀 사용자들의 간섭 신호를 완화

하는 벡터이므로, TDD 채널의 상호관계에 의해 인접 매크로셀 기지국과 인접 소형셀 사용자들에게 수신되는 간섭전력을 줄이는 신호를 송신할 수 있게 된다.

요약하면, 이 기법은 매크로셀 사용자에게 수신되는 소형셀 사용자의 cross-tier 간섭전력을 완화하기 위해 전송 전력을 감소시키는 방식을 사용하며, 매크로셀 기지국에 수신되는 소형셀 기지국의 cross-tier 간섭전력을 줄이기 위해 빔형성을 사용한다. 따라서, 이 기법은 소형셀 기지국이 매크로셀 기지국 근처에 설치되어도 매크로셀 기지국의 상향링크 신호 수신 시 함께 수신되는 간섭전력을 줄일 수 있는 특징이 있다^[13].

그러나, 소형셀 기지국이 주로 매크로셀의 커버리지 미치지 못하는 영역에 설치되는 운영환경에서는, 소형셀 기지국의 신호가 매크로셀 기지국의 상향링크 신호 수신에 큰 방해가 되지 않을 가능성이 높다. 그에 반해, 매크로셀 사용자 근처에 소형셀 사용자 혹은 기지국이 있는 경우, 소속 매크로셀 기지국으로부터 하향링크 신호를 받는데 큰 어려움을 겪을 것이다^[12]. 따라서, 본 논문에서는 매크로셀과 소형셀의 상향/하향링크가 일치하는 TDD환경에서 소형셀 기지국에 송신 빔형성 기법을 적용하여 이러한 cross-tier 간섭을 완화하는 경우를 고려한다. 또한, 상향링크 신호 수신 시, 매크로셀 기지국과 소형셀 기지국은 다중 안테나의 설치가 용이하므로, 수신 빔형성 기법을 적용하여 상향링크 신호 수신 시 cross-tier 간섭을 완화할 수 있을 것이다^[14].

본 논문에서는 TDD가 적용된 시스템에서 매크로셀 기지국과 소형셀 기지국이 다중 안테나를 사용하고, 매크로셀 사용자와 소형셀 사용자는 단일 안테나를 사용하는 환경을 고려한다. 이러한 환경에서, 매크로셀 하향링크의 cross-tier 간섭전력을 줄이기 위해 소형셀 기지국이 스스로 환경을 인지하여 임의의 매크로셀 사용자가 데이터를 수신하는 시점에 해당 사용자의 채널에 직교하는 빔형성을 사용하여 자신에게 속한 소형셀 사용자에게 데이터를 전송함으로써 cross-tier 간섭을 줄이는 기법을 제안한다.

구체적으로, 소형셀 기지국은 외부의 도움 없이 자신이 파악할 수 있는 정보만으로 임의의 사용자에게 대한 cross-tier 간섭을 줄이는 빔형성 적용 여부를 스스로 결정하고, 매크로셀 기지국의 제어 채널을 수신하여 해당 사용자에게 하향링크 데이터 전송 시점을 파악하여 해당 시점에 빔형성을 적용한다. 즉, 제안 기법은 매크로셀 기지국, 매크로셀 사용자, 소형셀 기지국 간의 상호 정보교환이 필요 없이 소형셀이 스스

로 동작하여 소형셀로 인한 cross-tier 간섭을 줄인다. 따라서, 매크로셀 시스템의 복잡도를 증가시키지 않으면서도 하향링크 cross-tier 간섭의 완화가 가능하다. 또한, 빔형성을 매크로셀 사용자 채널뿐만 아니라, 인접한 소형셀 사용자 채널과 직교하도록 형성하여 소형셀 사용자가 겪는 co-tier 간섭도 함께 줄일 수 있게 하였다. 이 경우에도 소형셀 기지국 간의 명시적인 정보교환 없이 어떤 소형셀 사용자를 선택할 것인지 소형셀 기지국 스스로 결정한다. 또한, 매크로셀과 소형셀의 상향링크의 경우 다중 안테나를 이용하여 수신 빔형성을 적용하면 cross-tier 간섭을 완화할 수 있을 것임으로^[14], 본 논문에서는 하향링크 성능을 중점적으로 다룬다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모델과 하향링크 수신 신호 모델에 대하여 설명하고 III장에서는 cross-tier 간섭문제를 해결하기 위한 인지 빔형성 기법에 관하여 서술한다. IV장에서는 시스템 레벨 시뮬레이션 결과를 이용하여 성능을 검증하고 V장에서는 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

2.1 시스템 서술

그림 1은 본 논문에서 고려하는 이종 셀룰러 망 구조를 보여준다. 매크로셀 커버리지 영역 내에 소형셀이 존재하며, 매크로셀 기지국과 소형셀 기지국은 같은 무선자원을 사용한다고 가정한다. 또한, closed access 정책을 가정한다. 즉, 매크로셀 사용자는 매크로셀 기지국 중 평균수신 신호가 가장 강한 매크로셀에만 소속되며, 소형셀 기지국에 소속되지 않는다. 각 매크로셀 기지국은 M_m 개의 안테나를 사용하여 자신에게 소속된 N 명의 매크로셀 사용자에게 데이터를 동시에 송신하고, 각 소형셀 기지국은 M_s 개의 안테나를 사용하여 자신에게 소속된 단일 소형셀 사용자에게 데이터를 송신한다.

본 논문에서는 time division multiple access (TDMA) - TDD 시스템을 가정한다. 또한, 채널은 프레임마다 주파수 평탄 페이딩 (frequency flat fading)을 겪는다고 가정하고, 채널의 상호관계에 의해 상향링크와 하향링크의 채널이 같으며 프레임마다 통계적으로 독립적이라 가정한다. 그림 2는 본 논문에서 고려하는 프레임 구조를 보여준다. 프레임은 하향링크 부프레임과 상향링크 부프레임으로 구성되어 있다. 각 부프레임은 복수의 슬롯으로 구성되며, 각 슬롯을 임의의 사용자에게 할당한다.

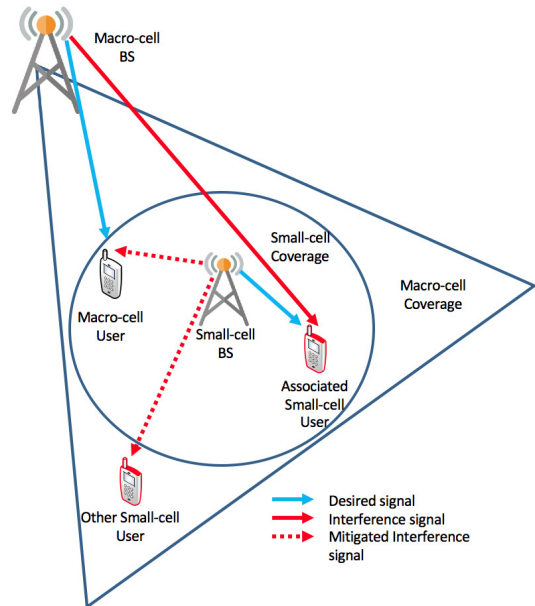


그림 1. 이종 셀룰러 망 구조
Fig. 1. Illustration of heterogeneous cellular network structure.

	Downlink		Uplink	
Macro-cell BS	Transmits control signal	Transmits data signal using ZF precoding	Estimates macro-cell users' channels	Receives data signal from macro-cell users
Small-cell BS	Listens to macro-cell's control signal	Transmits data signal using cognitive BF	Estimates macro- and small-cell users' channels	Receives data signal from small-cell users
Macro-cell user	Receives control data signal from macro-cell BS		Transmits pilot signal	Transmits data signal
Small-cell user		Receives data signal from small-cell BS	Transmits pilot signal	Transmits data signal

그림 2. 프레임 구조
Fig. 2. Illustration of frame structure.

구체적으로, 매크로셀 기지국은 하향링크의 제어 채널을 통해 해당 프레임의 상향링크 자원을 할당받는 사용자 정보, 다음 프레임의 하향링크에서 자원을 할당받는 소속 사용자 정보, 그리고 해당 사용자들이 사용할 파일럿 신호에 대한 정보를 전송한다. 해당 사용자는 상향링크 부프레임을 통해 자신에게 할당된 파일럿 신호와 상향링크 데이터를 전송한다. 매크로셀 기지국은 파일럿 신호를 이용하여 채널을 추정하고, 추정된 채널을 바탕으로 수신 빔형성을 통해 상향링크 데이터를 수신한다. 또한, 추정된 채널 정보를 이용하여 zero-forcing 프리코딩을 생성하고 자신에게 소속된 N 명의 사용자에게 다음 프레임의 하향링크

부프레임에서 신호를 전송한다^[15].

소형셀 기지국은 매크로셀 하향링크 제어 채널 수신을 통해 자신이 인지 빔형성을 적용할 특정 사용자 η 명이 다음 프레임의 하향링크에서 자원을 할당받는다. 이는 사실을 파악하고^[13], 그들에게 할당된 파일럿 신호를 이용하여 해당 채널을 추정한다. 또한, 인접 소형셀 기지국 간 명시적인 정보교환 없이 자신으로 인해 강한 co-tier 간섭전력이 수신되는 인접 소형셀 사용자 ($M_s \eta - 1$)명을 선택하고 해당 채널을 추정하고, 이를 바탕으로 총 ($M_s - 1$)명의 사용자 채널에 모두 직교하는 빔형성 벡터를 이용하여 다음 하향링크 부프레임을 통해 자신에게 속한 사용자에게 데이터를 전송한다.

명시적인 정보교환 없이 인접 소형셀 사용자들의 채널을 추정하는 과정은 다음과 같다. 특정 파일럿 신호들은 소형셀들 간에만 공유되며, 매 프레임마다 미리 약속된 순서대로 자신에게 속한 사용자에게 할당한다. 이 순서는 소형셀 기지국과 사용자의 조합에 따라 미리 결정되어 있으며, 모든 소형셀 기지국들이 알고 있다고 가정한다. 소형셀 기지국에 속한 사용자의 수는 매우 적을 것이므로, 인접 기지국에 속한 소형셀 사용자가 동시에 자신에게 속한 사용자와 같은 파일럿 신호를 할당받는 확률은 매우 낮을 것이다. 소형셀 사용자는 상향링크 자원이 할당될 경우, 미리 약속된 순서대로 할당된 파일럿 신호와 상향링크 데이터를 전송한다. 만약 현재 프레임에서 해당 사용자에게 자원을 할당하지 않고 다음 프레임에서 할당한다면, 현재 순서의 파일럿 신호는 할당되지 않으며 다음 프레임에서 다음 순서의 파일럿 신호를 할당한다. 즉, 특정 사용자의 파일럿 할당 순서가 3-2-4-1-5이고 첫 번째 프레임과 4번째 프레임에서 자원을 할당받는다면 3-X-X-1-X의 순서로 파일럿 신호를 전송한다. 여기서, X는 파일럿 신호를 전송하지 않는다는 의미이다.

실제 상향링크 자원이 할당될 때에만 미리 약속된 파일럿 신호를 전송하므로, 소형셀 기지국은 인접 소형셀 사용자의 자원할당 여부를 해당 파일럿 신호의 전송 여부로 파악할 수 있고 자원이 할당되는 시점에 해당 채널을 추정할 수 있으며, 이 과정이 반복되면 평균 간섭전력도 추정할 수 있다. 이 과정에서 필요한 정보는 특정 사용자의 해당 기지국 소속 여부인데, 사용자가 자주 소속 기지국을 변경하지 않는다고 가정하며 이 정보는 주기적으로 주변 소형셀 기지국에게 통보된다고 가정한다. 또한, 자신과 인접한 소형셀 기지국이 많지 않다면 인접한 소형셀 사용자 수도 많지 않을 것이므로 매 프레임마다 이들의 자원할당 여부

를 파악하는데 드는 부담은 크지 않을 것이다.

2.2 하향링크 수신 신호 모델

변수 Z_n, Y_j, X_i, Q_k 는 각각 매크로셀 사용자 n , 매크로셀 기지국 j , 소형셀 기지국 i , 소형셀 사용자 k 의 위치를 나타낸다고 하자. 하향링크 부프레임의 임의의 슬롯에서, 각 매크로셀 기지국은 자신에게 소속된 임의의 N 명의 사용자들에게 M_m 개의 전송 안테나를 사용하여 N 개의 신호 스트림을 전송하고, 소형셀 기지국은 M_s 개의 전송 안테나를 사용하여 빔형성된 단일 신호 스트림을 자신에게 소속된 임의의 사용자 한명에게 전송한다고 가정한다.

하향링크 부프레임의 임의의 슬롯에서 단일 수신안테나를 사용하는 매크로셀 사용자 n 이 수신하는 이산 복소 기저 대역 신호는

$$y_n = \sum_j \sqrt{P_m L_m(Y_j, Z_n)} \mathbf{h}_{j,n}^T \mathbf{U}_j \mathbf{x}_j + \sum_i \sqrt{P_s L_s(X_i, Z_n)} \mathbf{g}_{i,n}^T \mathbf{f}_i s_i + w_n \quad (1)$$

이다. 여기서, P_m 과 P_s 는 각각 매크로셀 기지국과 소형셀 기지국의 전송전력이며, $L_m(Y_j, Z_n)$ 과 $L_s(X_i, Z_n)$ 는 각각 매크로셀 기지국 j 와 매크로셀 사용자 n , 소형셀 기지국 i 와 매크로셀 사용자 n 사이의 웨도잉을 포함한 경로 감쇄를 나타낸다.

$\mathbf{h}_{j,n} = [h_{j,n,0} \cdots h_{j,n,(M_m-1)}]^T$ 는 매크로셀 기지국 j 와 매크로셀 사용자 n 사이의 페이딩 채널 벡터이며, 각 원소는 서로 독립이며 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 분포를 가진다.

전송신호 벡터 $\mathbf{U}_j \mathbf{x}_j$ 는 매크로셀 기지국 j 의 전송신호 벡터이며, $\mathbf{U}_j = [\mathbf{u}_{j,0} \cdots \mathbf{u}_{j,N-1}]$ 는 zero-forcing 프리코딩 행렬이며^[15] $\|\mathbf{u}_{j,v}\| = \frac{1}{\sqrt{N}}$ 를 만족하고, $\mathbf{x}_j = [x_{j,0} \cdots x_{j,N-1}]^T$ 는 전송신호 벡터이며, $\mathbb{E}[x_{j,v}] = 0$ 과 $\mathbb{E}[x_{j,v} x_{j',v'}^*] = \delta(j-j')\delta(v-v')$ 을 만족한다. $\mathbf{g}_{i,n} = [g_{i,n,0} \cdots g_{i,n,(M_s-1)}]^T$ 는 소형셀 기지국 i 와 매크로셀 사용자 n 사이의 페이딩 채널 벡터이며, 각 원소는 서로 독립이며 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 분포를 가진다. $\mathbf{f}_i = [f_{i,0} \cdots f_{i,(M_s-1)}]^T$ 는 소형셀 기지국 i 가 사용하는 빔형성 벡터이며, $\|\mathbf{f}_i\| = 1$ 을 만족한다. s_i 는 $\mathbb{E}[s_i] = 0$ 과 $\mathbb{E}[s_i s_i^*] = \delta(i-i')$ 를 만족하는 소형셀 기지국 i 의 전송신호를 나타내며, w_n 은 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 복소 가산성 백색 가우시안 잡음이다. 모

든 페이딩 채널은 한 프레임 구간 동안 변화하지 않으며, 프레임마다 통계적으로 독립이라 가정한다.

소형셀 사용자와 매크로셀 기지국 사이와 소형셀 사용자와 소형셀 기지국 사이의 경로감쇄 모델이 매크로셀 사용자의 경로감쇄 모델과 일치한다고 가정한다. 이때, 하향링크의 임의의 슬롯에서 단일 수신안테나를 사용하는 소형셀 사용자 k 가 수신하는 이산 복소 기저 대역 신호는

$$\tilde{y}_k = \sum_j \sqrt{P_m L_m(Y_j, Q_k)} \tilde{\mathbf{h}}_{j,k}^\top \mathbf{U}_j \mathbf{x}_j + \sum_i \sqrt{P_s L_s(X_i, Q_k)} \tilde{\mathbf{g}}_{i,k}^\top \mathbf{f}_i s_i + \tilde{w}_k \quad (2)$$

이다. 여기서, $\tilde{\mathbf{h}}_{j,k} = [\tilde{h}_{j,k,0} \cdots \tilde{h}_{j,k,(M_m-1)}]^\top$ 는 매크로셀 기지국 j 와 소형셀 사용자 k 사이의 페이딩 채널 벡터이며, 각 원소는 서로 독립이며 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 분포를 가진다. $\tilde{\mathbf{g}}_{i,k} = [\tilde{g}_{i,k,0} \cdots \tilde{g}_{i,k,(M_s-1)}]^\top$ 는 소형셀 기지국 i 와 소형셀 사용자 k 사이의 페이딩 채널 벡터이며, 각 원소는 서로 독립이며 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 분포를 가진다. \tilde{w}_k 은 평균이 0이고, 분산이 σ^2 인 복소 가산성 백색 가우시안 잡음이다.

III. 인지 빔형성 기법

3.1 인지 빔형성 적용 여부 결정

임의의 매크로셀 사용자 n 에 대하여 강한 간섭 신호를 발생시킬 수 있는 임의의 소형셀 기지국 i 는 자신과 매크로셀 사용자 n 사이의 채널 벡터에 직교하는 빔형성 벡터 \mathbf{f}_i 를 사용하여 자신에게 소속된 소형셀 사용자에게 신호를 전송한다고 가정한다. 강한 간섭 신호의 판단 기준은 여러 가지가 있을 수 있으나, 본 논문에서는 매크로셀 사용자 n 에 수신되는 소형셀 기지국 i 로부터 수신되는 평균 간섭전력이 모든 매크로셀 기지국의 평균 간섭전력의 합에 간섭전력 비교 계수 μ 를 곱한 값보다 크면 해당 소형셀 기지국으로부터 강한 간섭 신호를 수신한다고 판정한다. 즉,

$$\mu \sum_{j \neq j_n} P_m L_m(Y_j, Z_n) < P_s L_s(X_i, Z_n) \quad (3)$$

을 만족하는 경우, 소형셀 기지국 i 는 매크로셀 사용자 n 의 채널에 직교인 빔형성 벡터를 사용한다. 여기서, j_n 은 매크로셀 사용자 n 이 소속된 매크로셀 기지

국을 나타낸다. 그러나, 이러한 동작이 가능하기 위해서는 매크로셀 사용자 n 이 자신에게 수신되는 매크로셀의 평균 간섭전력을 소형셀 기지국들에 알려 주어야 하며, 이를 위한 별도의 제어채널이 필요하므로 시스템 구성이 복잡해질 것이다.

이러한 문제를 해결하기 위해 우선 다음과 같은 사실을 고려하자. 매크로셀 사용자 n 에 강한 간섭 신호를 발생시키는 소형셀 기지국 i 는 대부분 해당 매크로셀 사용자 n 의 근처에 존재할 것이다. 또한, 매크로셀 사용자와 소형셀 기지국의 안테나 높이는 비슷할 것으로 예상되며 주변 환경 또한 비슷할 것이므로, 매크로셀 기지국과 매크로셀 사용자 사이의 채널환경과 매크로셀 기지국과 소형셀 기지국 사이의 채널환경은 동일하다고 가정한다. 따라서, 소형셀이 균등하게 분포해 있다고 가정하면, 매크로셀 사용자 n 이 매크로셀로부터 수신하는 간섭의 합은 해당 사용자 근처에 존재하는 소형셀 기지국들이 매크로셀로부터 수신하는 간섭의 합과 유사할 것이다. 즉, $L_m(Y_j, Z_n) = L_m(Y_j, X_i)$ 일 것이다. 따라서, 소형셀 기지국 i 는 다음과 같은 조건

$$\mu \sum_{j \neq j_n} P_m L_m(Y_j, X_i) < P_s L_s(X_i, Z_n) \quad (4)$$

을 만족하는 경우, 매크로셀 사용자 n 과의 채널 벡터에 직교하는 빔형성 벡터 사용한다고 판정한다. 여기서, 소형셀 기지국 i 에 수신되는 평균 간섭 신호 전력 $\sum_{j \neq j_n} P_m L_m(Y_j, X_i)$ 는 매크로셀 기지국 j_n 의 하향링크 부프레임을 수신할 때 구할 수 있으며, $L_s(X_i, Z_n)$ 는 매크로셀 사용자 n 과의 채널 벡터를 추정하는 과정에서 구할 수 있다. 따라서, 소형셀 기지국 i 는 별도의 제어정보가 없어도 스스로 매크로셀 사용자 n 을 위한 빔형성 적용 여부를 결정할 수 있게 된다.

소형셀 기지국 i 가 수식 (4)를 만족하는 사용자들을 결정하면, 해당 사용자가 자원을 할당 받는 시점에 해당 사용자 채널에 직교인 빔형성 벡터를 형성하여 전송에 사용한다. 임의의 프레임에서 인지 빔형성을 적용해야 할 매크로셀 사용자의 수가 η ($< M_s - 1$) 이면, 인접 소형셀 사용자 중 평균 간섭전력이 가장 큰 $(M_s - \eta - 1)$ 명의 사용자들을 추가로 선정하여 이들의 채널들과 직교하는 빔형성 벡터를 형성하여 전송에 사용한다. 즉, 소형셀 사용자 $\pi_0, \dots, \pi_{(M_s - \eta - 2)}$ 를 선택한다. 여기서, π 는 소형셀 기지국 i 에 속하지 않는 모든 소형셀 사용자들에 대하여

$$L_s(X_i, Q_{\pi_0}) \geq L_s(X_i, Q_{\pi_1}) \geq \dots$$

을 만족하는 순열이다. 만약 $\eta \geq M_s$ 인 경우, 평균 간섭전력이 큰 순서로 $(M_s - 1)$ 명의 매크로셀 사용자들에게만 빔형성을 적용한다고 가정한다. 즉, 매크로셀 사용자 $\omega_0, \dots, \omega_{(M_s-2)}$ 를 선택한다. 여기서, ω 는 모든 매크로셀 사용자들에 대하여

$$L_s(X_i, Z_{\omega_0}) \geq L_s(X_i, Z_{\omega_1}) \geq \dots$$

을 만족하는 순열이다. 또한, $\eta = 0$ 인 경우, 평균 간섭전력이 가장 큰 (M_s-1) 명의 소형셀 사용자들의 채널에 직교하는 빔형성 벡터를 사용한다.

3.2 채널 추정

매크로셀 기지국 j_n 은 매크로셀 사용자 n 에 대하여 zero-forcing 프리코딩 행렬을 이용하여 데이터를 전송한다고 가정하자. 이를 위해서는 매크로셀 기지국 j_n 이 해당 사용자의 채널 벡터를 추정해야 한다. 이를 위해, 상향링크 부프레임은 B 개의 심볼로 구성된 파일럿 신호를 전송한다. 이러한 파일럿 신호는 B 개가 존재하여 서로 직교한다고 가정한다. 파일럿 신호는 전체 시스템에서 공유되며, 이들 중 B_m 개는 매크로셀 사용자들 사이에서 공유하며, $B_s (= B - B_m)$ 개는 소형셀 사용자들 사이에서 공유한다. (즉, 매크로셀 사용자들은 소형셀 사용자들은 서로 다른 파일럿 신호를 사용한다.)

2.1절에서 설명한 대로, 하향링크 자원을 할당받는 해당 사용자는 이전 프레임의 상향링크 부프레임을 통해 자신에게 할당된 파일럿 신호를 전송한다. 이때, 매크로셀 기지국 j_n 이 M_m 개의 안테나를 통해 수신하는 $(M_m \times B)$ 이산 복소 기저 대역 신호 행렬은

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{j_n} = & \sqrt{P_p L_m(Y_{j_n}, Z_n)} \mathbf{h}_{j_n, n} \mathbf{t}_n^\top \\ & + \sum_{\substack{n' \in \Phi_{l_n} \\ n' \neq n}} \sqrt{P_p L_m(Y_{j_n}, Z_{n'})} \mathbf{h}_{j_n, n'} \mathbf{t}_{l_n'}^\top \\ & + \sum_{\substack{l \in \Omega_m \\ l \neq l_n}} \sum_{n' \in \Phi_l} \sqrt{P_p L_m(Y_{j_n}, Z_{n'})} \mathbf{h}_{j_n, n'} \mathbf{t}_l^\top \\ & + \sum_{l \in \Omega_s} \sum_{k' \in \Phi_l} \sqrt{P_p L_m(Y_{j_n}, Q_{k'})} \mathbf{g}_{j_n, k'} \mathbf{t}_l^\top + \mathbf{W}_{j_n} \end{aligned} \quad (5)$$

이다. 여기서, P_p 는 파일럿 신호전력, $\mathbf{t}_l = [t_{l,0} \dots t_{l,B-1}]^\top$ 은 사용자에게 할당되는 l 번째

파일럿 심볼 벡터이며, $\mathbf{t}_l^H \mathbf{t}_{l'} = \delta(l - l')$ 를 만족한다 (즉, 파일럿 신호는 서로 직교한다). Φ_l 은 매크로셀 사용자에게 할당되는 파일럿 신호 \mathbf{t}_l 을 선택한 매크로셀 사용자 집합, \mathbf{t}_{l_n} 은 매크로셀 사용자 n 에게 할당된 파일럿 신호, Ω_m 은 매크로셀 사용자에게 할당되는 파일럿 신호 집합이다. Φ_{l_n} 은 소형셀 사용자에게 할당되는 파일럿 신호 \mathbf{t}_l 을 선택한 소형셀 사용자 집합이며, Ω_s 는 소형셀 사용자에게 할당되는 파일럿 신호 집합이다. \mathbf{W}_{j_n} 는 잡음 행렬로서, 이를 구성하는 각 원소는 평균이 0이고, 분산이 σ^2 인 복소 가산성 백색 가우시안 잡음이다.

파일럿 신호는 서로 직교하므로 매크로셀 기지국 j_n 은 자신과 매크로셀 사용자 n 사이의 채널 벡터를

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{P_p}} \mathbf{R}_{j_n} \mathbf{t}_n^* &= \sqrt{L_m(Y_{j_n}, Z_n)} \hat{\mathbf{h}}_{j_n, n} \\ &= \sqrt{L_m(Y_{j_n}, Z_n)} \mathbf{h}_{j_n, n} + \sum_{\substack{n' \in \Phi_{l_n} \\ n' \neq n}} \sqrt{L_m(Y_{j_n}, Z_{n'})} \mathbf{h}_{j_n, n'} \\ &+ \frac{1}{\sqrt{P_p}} \mathbf{W}_{j_n} \mathbf{t}_n^* \end{aligned} \quad (6)$$

와 같이 추정한다. 이 수식으로부터, 매크로셀 사용자 n 이 사용하는 파일럿 신호 \mathbf{t}_{l_n} 과 같은 파일럿 신호를 사용하는 매크로셀 사용자들에 의해 채널 추정 에러가 발생함을 알 수 있다^[6]. 채널 추정이 완료된 후, 매크로셀 기지국 j_n 이 매크로셀 사용자 n 에게 v_n 번째 프리코딩 벡터 \mathbf{u}_{j_n, v_n} 을 이용하여 신호를 전송한다면, 매크로셀 기지국 j_n 은 매크로셀 사용자 n 에게 하향링크 자원을 할당받는 시점에서 $v \neq v_n$ 일 때

$$\hat{\mathbf{h}}_{j_n, n}^\top \mathbf{u}_{j_n, v} = 0 \quad (7)$$

을 만족하는 벡터들로 구성된 프리코딩 행렬 \mathbf{U}_{j_n} 을 사용하여 자신에게 속한 사용자 중 매크로셀 사용자 n 을 포함한 N 명에게 신호를 전송한다^[15].

임의의 소형셀 기지국 i 는 매크로셀 사용자 n 에 대하여 간섭완화를 위한 빔형성을 사용한다. 구체적으로 소형셀 기지국 i 는 매크로셀 사용자 n 이 하향링크 신호를 수신하는 슬롯에서 채널 벡터 $\mathbf{g}_{i, n}$ 과 직교하는 빔형성 벡터 \mathbf{f}_i 를 사용하여 자신에게 속한 소형셀 사용자에게 신호를 전송한다. 또한, 매크로셀 사용자 n 은 상향링크 부프레임에서 자신이 소속된 매크로셀 기지국으로부터 할당받은 파일럿 신호를 전송하고, 소형셀 기지국 i 는 이를 이용하여 $\mathbf{g}_{i, n}$ 를 추정한다. 이 과정은 구체적으로 다음과 같이 동작한다.

상향링크 부프레임에서 소형셀 기지국 i 가 M_s 개의 안테나를 통해 수신하는 ($M_s \times B$) 이산 복소 기저 대역 신호 행렬은

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{R}}_i &= \sqrt{P_p L_s(X_i, Z_n)} \mathbf{g}_{i,n} \mathbf{t}_{i,n}^\top \\ &+ \sum_{\substack{n' \in \Phi_{i,n} \\ n' \neq n}} \sqrt{P_p L_s(X_i, Z_{n'})} \mathbf{g}_{i,n'} \mathbf{t}_{i,n'}^\top \\ &+ \sum_{\substack{l \in \Omega_m \\ l \neq i_n}} \sum_{n' \in \Phi_l} \sqrt{P_p L_s(X_i, Z_{n'})} \mathbf{g}_{i,n'} \mathbf{t}_{i,n'}^\top \\ &+ \sum_{l' \in \Omega_s} \sum_{k' \in \Phi_{l'}} \sqrt{P_p L_s(X_i, Q_{k'})} \tilde{\mathbf{g}}_{i,k'} \mathbf{t}_{i,n'}^\top + \tilde{\mathbf{W}}_i \end{aligned} \quad (8)$$

이다. 여기서, $\tilde{\mathbf{W}}_i$ 는 잡음 행렬로서, 이를 구성하는 각 원소는 평균이 0이고, 분산이 σ^2 인 복소 가산성 백색 가우시안 잡음이다.

파일럿 신호는 서로 직교하므로 소형셀 기지국 i 는 자신과 매크로셀 사용자 n 사이의 채널 벡터를

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{P_p}} \tilde{\mathbf{R}}_i \mathbf{t}_{i,n}^* &= \sqrt{L_s(X_i, Z_n)} \hat{\mathbf{g}}_{i,n} \\ &= \sqrt{L_s(X_i, Z_n)} \mathbf{g}_{i,n} + \sum_{\substack{n' \in \Phi_{i,n} \\ n' \neq n}} \sqrt{L_s(X_i, Z_{n'})} \mathbf{g}_{i,n'} \\ &+ \frac{1}{\sqrt{P_p}} \tilde{\mathbf{W}}_i \mathbf{t}_{i,n}^* \end{aligned} \quad (9)$$

와 같이 추정한다. 이 수식으로부터, 매크로셀 사용자 n 이 사용하는 파일럿 신호 $\mathbf{t}_{i,n}$ 과 같은 파일럿 신호를 사용하는 매크로셀 사용자들에 의해 채널 추정 에러가 발생함을 알 수 있다^[6]. 또한, 소형셀 기지국 i 는 소형셀 사용자 k 사이의 채널 벡터를

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{P_p}} \tilde{\mathbf{R}}_i \mathbf{t}_{i,k}^* &= \sqrt{L_s(X_i, Q_k)} \hat{\mathbf{g}}_{i,k} \\ &= \sqrt{L_s(X_i, Q_k)} \tilde{\mathbf{g}}_{i,k} + \sum_{\substack{k' \in \Phi_{i,k} \\ k' \neq k}} \sqrt{L_s(X_i, Z_{n'})} \tilde{\mathbf{g}}_{i,k'} \\ &+ \frac{1}{\sqrt{P_p}} \tilde{\mathbf{W}}_i \mathbf{t}_{i,k}^* \end{aligned} \quad (10)$$

와 같이 추정한다. 여기서, $\mathbf{t}_{i,k}$ 는 소형셀 사용자 k 에게 할당된 파일럿 신호이다.

채널 추정이 완료되면, 소형셀 기지국 i 는 자신이 인지 빔형성을 적용해야 할 $\eta (< M_s - 1)$ 명의 매크로셀 사용자들과 인접 소형셀 사용자 중 평균 간섭전력이 가장 큰 ($M_s - \eta - 1$)명의 사용자들의 추정 채널에

직교하는 빔형성 벡터 \mathbf{f}_i 를 사용하여 자신에게 속한 사용자에게 신호를 전송한다. 즉, zero-forcing 빔형성 벡터 \mathbf{f}_i 는

$$\hat{\mathbf{g}}_{i,n}^\top \mathbf{f}_i = 0 \quad (11)$$

과

$$\hat{\mathbf{g}}_{i,k}^\top \mathbf{f}_i = 0 \quad (12)$$

을 만족한다^[17].

3.3 수신 신호의 SINR

매크로셀 기지국 j_n 이 매크로셀 사용자 n 에게 v_n 번째 프리코딩 벡터 \mathbf{u}_{j_n, v_n} 을 이용하여 신호를 전송한다면, 매크로셀 사용자 n 이 수신하는 신호에 대한 signal-to-interference plus noise power ratio (SINR)은

$$\gamma_n = \frac{P_m L_m(Y_{j_n}, Z_n) |\mathbf{h}_{j_n, n}^\top \mathbf{u}_{j_n, v_n}|^2}{\sigma^2 + I_{m,n}^{(0)} + I_{m,n}^{(1)} + I_{s,n}^{(0)} + I_{s,n}^{(1)}} \quad (13)$$

이다. 이 수식을 구성하는 항들에 대한 설명은 다음과 같다.

$I_{m,n}^{(0)}$ 은 매크로셀 j_n 의 v_n 번째 프리코딩 벡터를 제외한 나머지 프리코딩 벡터에 의해 발생하는 간섭신호인 $\sum_{v \neq v_n} \sqrt{P_m L_m(Y_{j_n}, Z_n)} \mathbf{h}_{j_n, n}^\top \mathbf{u}_{j_n, v}$ 의 분산으로서

$$I_{m,n}^{(0)} = P_m \sum_{\substack{v \neq v_n \\ n' \in \Phi_{i,n} \\ n' \neq n}} \sum_{n'} L_m(Y_{j_n}, Z_{n'}) |\mathbf{h}_{j_n, n'}^\top \mathbf{u}_{j_n, v}|^2 + \frac{P_m (N-1)}{P_p} \sigma^2 \quad (14)$$

이다. 이 항은 수식 (6)과 (7)로부터

$$\begin{aligned} \sqrt{L_m(Y_{j_n}, Z_n)} \mathbf{h}_{j_n, n}^\top \mathbf{u}_{j_n, v} &= - \sum_{\substack{n' \in \Phi_{i,n} \\ n' \neq n}} \sqrt{L_m(Y_{j_n}, Z_{n'})} \mathbf{h}_{j_n, n'}^\top \mathbf{u}_{j_n, v} \\ &- \frac{1}{\sqrt{P_p}} (\mathbf{W}_{j_n} \mathbf{t}_{i,n}^*)^\top \mathbf{u}_{j_n, v} \end{aligned} \quad (15)$$

이라는 사실을 이용하여 구할 수 있다. $I_{m,n}^{(1)}$ 은 매크로셀 기지국들로 인한 간섭신호인 $\sum_{j \neq j_n} \sqrt{P_m L_m(Y_j, Z_n)} \mathbf{h}_{j, n}^\top \mathbf{u}_j \mathbf{x}_j$ 의 분산으로서

$$I_{m,n}^{(1)} = P_m \sum_{j \neq j_n} L_m(Y_j, Z_n) \mathbf{h}_{j,n}^\top \mathbf{U}_j \mathbf{U}_j^H \mathbf{h}_{j,n}^* \quad (16)$$

이며, $I_{s,n}^{(0)}$ 은 매크로셀 사용자 n 을 위한 인지 빔형성을 사용한 소형셀 기지국들로 인해 발생하는 간섭 신호인 $\sum_{i \in \Psi_n} \sqrt{P_s L_s(X_i, Z_n)} \mathbf{g}_{i,n}^\top \mathbf{f}_i s_i$ 의 분산으로서

$$I_{s,n}^{(0)} = P_s \sum_{i \in \Psi_n} \left| \sum_{\substack{n' \in \Phi_{i,n} \\ n' \neq n}} \sqrt{L_s(X_i, Z_{n'})} \mathbf{g}_{i,n'}^\top \mathbf{f}_i \right|^2 + \text{Card}(\Psi_n) \frac{P_s}{P_p} \sigma^2 \quad (17)$$

이다. 여기서, Ψ_n 는 3.1절에서 설명한 바와 같이 매크로셀 사용자 n 을 위해 인지 빔형성을 사용하는 소형셀 기지국 집합이며, $\text{Card}(\Psi_n)$ 는 해당 집합의 원소 개수이다. 이 항은 수식 (9)와 (11)로부터

$$\begin{aligned} \sqrt{L_s(X_i, Z_n)} \mathbf{g}_{i,n}^\top \mathbf{f}_i &= - \sum_{\substack{n' \in \Phi_{i,n} \\ n' \neq n}} \sqrt{L_s(X_i, Z_{n'})} \mathbf{g}_{i,n'}^\top \mathbf{f}_i \\ &\quad - \frac{1}{\sqrt{P_p}} (\mathbf{W}_i \mathbf{t}_{i,n}^*)^\top \mathbf{f}_i \end{aligned} \quad (18)$$

이라는 사실을 이용하여 구할 수 있다. $I_{s,n}^{(1)}$ 은 매크로셀 사용자 n 을 위해 인지 빔형성을 사용하지 않는 소형셀 기지국들로 인해 발생하는 간섭 신호인 $\sum_{i \notin \Psi_n} \sqrt{P_s L_s(X_i, Z_n)} \mathbf{g}_{i,n}^\top \mathbf{f}_i s_i$ 의 분산으로서

$$I_{s,n}^{(1)} = P_s \sum_{i \notin \Psi_n} L_s(X_i, Z_n) |\mathbf{g}_{i,n}^\top \mathbf{f}_i|^2 \quad (19)$$

이다.

소형셀 기지국 i_k 가 자신에게 속한 소형셀 사용자 k 에게 빔형성 벡터 \mathbf{f}_{i_k} 를 이용하여 신호를 전송한다면, 소형셀 사용자 k 가 수신하는 신호에 대한 SINR은

$$\tilde{\gamma}_k = \frac{P_s L_s(X_{i_k}, Q_k) |\tilde{\mathbf{g}}_{i_k, k}^\top \mathbf{f}_{i_k}|^2}{\sigma^2 + \tilde{I}_{m,k} + \tilde{I}_{s,k}^{(0)} + \tilde{I}_{s,k}^{(1)}} \quad (20)$$

이다. 이 수식을 구성하는 항들에 대한 설명은 다음과 같다.

$\tilde{I}_{m,k}$ 는 매크로셀 기지국들로 인한 간섭신호인 $\sum_j \sqrt{P_m L_m(Y_j, Q_k)} \mathbf{h}_{j,k}^\top \mathbf{U}_j \mathbf{x}_j$ 의 분산으로서

$$\tilde{I}_{m,k} = P_m \sum_j L_m(Y_j, Q_k) \mathbf{h}_{j,k}^\top \mathbf{U}_j \mathbf{U}_j^H \mathbf{h}_{j,k}^* \quad (21)$$

이며, $\tilde{I}_{s,k}^{(0)}$ 은 소형셀 사용자 k 의 채널에 직교인 빔형성을 사용한 소형셀 기지국들로 인해 발생하는 간섭 신호인 $\sum_{\substack{i \in \tilde{\Psi}_k \\ i \neq i_k}} \sqrt{P_s L_s(X_i, Q_k)} \tilde{\mathbf{g}}_{i,k}^\top \mathbf{f}_i s_i$ 의 분산으로서

$$\tilde{I}_{s,k}^{(0)} = P_s \sum_{\substack{i \in \tilde{\Psi}_k \\ i \neq i_k}} \left| \sum_{\substack{k' \in \tilde{\Phi}_{i,k} \\ k' \neq k}} \sqrt{L_s(X_i, Q_{k'})} \tilde{\mathbf{g}}_{i,k'}^\top \mathbf{f}_i \right|^2 + \text{Card}(\tilde{\Psi}_k) \frac{P_s}{P_p} \sigma^2 \quad (22)$$

이다. 여기서, $\tilde{\Psi}_k$ 는 3.1절에서 설명한 바와 같이 소형셀 사용자 k 을 위해 빔형성을 사용하는 소형셀 기지국 집합이다. 이 항은 수식 (10)과 (12)로부터

$$\begin{aligned} \sqrt{L_s(X_i, Q_k)} \tilde{\mathbf{g}}_{i,k}^\top \mathbf{f}_i &= - \sum_{\substack{k' \in \tilde{\Phi}_{i,k} \\ k' \neq k}} \sqrt{L_s(X_i, Q_{k'})} \tilde{\mathbf{g}}_{i,k'}^\top \mathbf{f}_i \\ &\quad - \frac{1}{\sqrt{P_p}} (\tilde{\mathbf{W}}_i \mathbf{t}_{i,k}^*)^\top \mathbf{f}_i \end{aligned} \quad (23)$$

이라는 사실을 이용하여 구할 수 있다. $\tilde{I}_{s,k}^{(1)}$ 은 소형셀 기지국들로 인한 간섭신호인 $\sum_{\substack{i \notin \tilde{\Psi}_k \\ i \neq i_k}} \sqrt{P_s L_s(X_i, Q_k)} \tilde{\mathbf{g}}_{i,k}^\top \mathbf{f}_i s_i$ 의 분산으로서

$$\tilde{I}_{s,k}^{(1)} = P_s \sum_{\substack{i \notin \tilde{\Psi}_k \\ i \neq i_k}} L_s(X_i, Q_k) |\tilde{\mathbf{g}}_{i,k}^\top \mathbf{f}_i|^2 \quad (24)$$

이다.

IV. 시스템 레벨 시뮬레이션 결과

4.1 시뮬레이션 환경

본 논문에서는 3GPP에서 이중 셀룰러 망에 적용할 기술들의 성능을 평가하기 위한 목적으로 도입한 dual-strip 모델을 참고하여 시스템 모델을 구성하였다^[18]. 구체적으로 전체 시스템은 19개의 육각 매크로셀로 구성되며, 각 육각 매크로셀은 3개의 매크로셀 섹터 (총 57개의 매크로셀)로 구성되어 있다. 또한, 랩어라운드 (wrap-around) 구조를 적용하여 기지국이 분포된 평면의 가장자리에 존재하는 기지국의 주변에도 충분한 수의 기지국들이 분포될 수 있도록 한다^[19]. 이 구조에서 매크로셀 당 최소 거리는 500m이고, 각 매

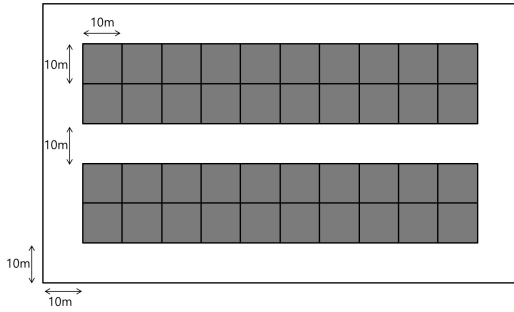


그림 3. Dual-strip 건물 모델
Fig. 3. Illustration of dual-strip apartment model.

크로셀은 가로 70°, 세로 10°인 3dB의 빔 폭을 가지며, 아래 방향으로 15°, 높이는 32m인 16dBi 안테나 이득을 가진 지향성 안테나를 사용한다.

각각의 매크로셀 영역 안에는 그림 3과 같은 dual-strip 구조를 가진 건물이 하나씩 존재하며^[18], 그 안에 소형셀 기지국이 배치된다. 각 섹터에 존재하는 건물의 층수는 1~10층 사이에 균일하게 분포된다^[20]. 별다른 언급이 없다면 소형셀 기지국은 방마다 10%의 확률로 존재하고, 동일한 방에 해당 기지국에 소속된 하나의 소형셀 사용자가 존재한다^[18]. 각 소형셀 기지국들은 5dBi의 안테나 이득을 갖는 전방향성 안테나를 사용한다. 매크로셀 영역당 매크로셀 사용자 수는 60명이며, 각 사용자는 80%의 확률로 건물 내부에 존재하고 20%의 확률로 건물 외부에 존재한다. 각 매크로셀 사용자는 높이가 1.5m인 0dBi의 이득을 갖는 전방향성 안테나를 사용한다. 매크로셀 기지국과 소형셀 기지국 간의 최소거리는 75m, 매크로셀 기지국과 매크로셀 사용자 간의 최소거리는 35m, 소형셀 기지국과 매크로셀 사용자의 최소 거리는 3m이다^[18].

표 1은 본 논문에서 적용한 감쇄 모델을 나타낸다^[18]. 3.1절에서 언급한 바와 같이 매크로셀 사용자와 소형셀 기지국의 안테나 높이는 비슷하며 주변 환경 또한 비슷할 것으로 예상하므로, 매크로셀 기지국과 매크로셀 사용자 사이의 채널과 매크로셀 기지국과 소형셀 기지국 사이의 채널은 동일 경로 감쇄 모델을 사용한다. 또한, 실내에 존재하는 매크로셀 사용자와 소형셀 사용자는 동일한 채널 모델을 사용한다. 표 1에서 R 은 아파트 외부부를 포함한 기지국에서 사용자까지의 거리 (미터)이고, $d_{2D,indoor}$ 는 아파트 내부의 거리 (미터)이고, L_{ow} 는 건물의 바깥벽 통과 손실 값, $L_{ow,1}$ 과 $L_{ow,2}$ 는 각각 두 strip 간의 바깥벽 통과 손실 값을 나타내며 모두 20dB 이다. L_{iw} 는 분리된 아파트 벽의 통과 손실 값으로써 5dB 이며, n 은 사용자와 소

표 1. 경로 감쇄 모델.
Table 1. Path loss model.

Cases		Path Loss (dB)
User to macro-cell BS	User is outdoor	$PL_{LOS}(R) = 30.8 + 24.2 \log_{10} R$ $PL_{NLOS}(R) = 2.7 + 42.8 \log_{10} R$
	User is indoor	$PL_{LOS}(R) = 30.8 + 24.2 \log_{10} R + L_{ow}$ $PL_{NLOS}(R) = 2.7 + 42.8 \log_{10} R + L_{ow}$
User to small-cell BS	User is inside the same apt stripe as small-cell	$PL(R) = 38.4 + 20 \log_{10} R + 0.7d_{2D,indoor}$ $+ 18.3n^{(n+2)/(n+1)-0.46} + qL_{iw}$
	User is outside the apt stripe	$PL(R) = \max(2.7 + 42.8 \log_{10} R, 38.46 + 20 \log_{10} R)$ $+ 0.7d_{2D,indoor} + 18.3n^{(n+2)/(n+1)-0.46}$ $+ qL_{iw} + L_{ow}$
	User is inside a different apt stripe	$PL(R) = \max(2.7 + 42.8 \log_{10} R, 38.46 + 20 \log_{10} R)$ $+ 0.7d_{2D,indoor} + 18.3n^{(n+2)/(n+1)-0.46}$ $+ qL_{iw} + L_{ow,1} + L_{ow,2}$

형셀 기지국 사이에 존재하는 층의 개수이고, q 는 서로 다른 strip에 존재하는 사용자와 소형셀 기지국 사이의 벽의 개수이다^[18].

사용자와 매크로셀 기지국 간의 경로 감쇄 모델은 line-of-sight (LOS) 및 non-line-of-sight (NLOS) 모델이 사용된다. 구체적으로 LOS 모델은 $p_{LOS} = \min(18/R, 1)(1 - \exp(-R/63)) + \exp(-R/63)$ 의 확률로 선택되고, NLOS 모델은 $(1 - p_{LOS})$ 의 확률로 선택된다^[18]. 경로 음영손실은 log-normal 분포를 가지며, 소형셀 기지국과 사용자 사이의 링크에 대한 음영손실의 표준편차는 4dB로 적용하였다. 매크로셀 기지국과 사용자 간의 경로 감쇄가 LOS 모델이면 음영손실의 표준편차는 4dB, NLOS 모델이면 6dB를 적용하였다. 소형셀 기지국과 사용자가 같은 방에 존재하는 경우, 음영손실의 표준편차는 3dB, 그 외의 경우는 4dB를 적용하였다^[18]. 임의의 사용자와 모든 기지국 사이의 음영손실에는 0.5, 임의의 기지국에서 모든 사용자 사이의 음영손실에는 0의 상관계수를 적용하였다. 전송전력은 매크로셀 기지국이 46dBm, 소형셀 기지국이 20dBm이며, 매크로셀 사용자와 소형셀 사용자의 전송전력은 20dBm이며, 복소 가산성 백색 가우시안 잡음의 밀도는 -174dBm/Hz이고, noise figure는 7dB이다.

본 논문에서는 매크로셀 기지국은 $M_m = 8$ 개의 안테나를 사용하여 $N = 4$ 명의 매크로셀 사용자들에게 동시에 데이터를 전송한다고 가정하고, 소형셀 기지국은 $M_s = 4$ 개의 안테나를 사용한다고 가정한다. 또한, 600개의 부 반송파를 가지며 9MHz 대역폭을 사용하는 orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) 시스템을 고려한다. 구체적으로, 각

표 2. OFDMA 기반의 이중 셀룰러 망 시스템 시뮬레이션 환경 요약.

Table 2. Summary of system level simulations for OFDMA-based heterogeneous cellular network.

Parameter	Value
No. of macro-cell sites	19
Min. dist. btw. macro-cell sites	500m
No. of macro-cells per macro-cell site	3
No. of dual-strip apt. per macro-cell area	1
No. of floors per dual-strip apt.	1~10
Deployment ratio of small-cell BS	0.1
No. of users per macro-cell area	60
Tx. ant. at macro-cell	70° 3dB-beamwidth, 16dBi
Tx. ant. at small-cell	omnidirectional, 5dBi
Rx. ant. at user	omnidirectional, 0dBi
System bandwidth	9MHz
PRB bandwidth	180kHz
No. of PRBs	50
Thermal noise density	-174dBm/Hz
Noise figure at user	7dB
Tx. power at macro-cell BS	46dBm
Tx. power at small-cell BS	20dBm
Std. of shadowing	macro-cell: 4dB (LOS), 6dB (NLOS) small-cell: 3dB (LOS), 4dB (NLOS)

OFDMA 심볼은 50개의 physical resource block (PRB) 으로 구성되고 각 PRB는 12개의 부반송파로 구성되어 180kHz의 대역폭을 갖는다. 각 PRB를 구성하는 부반송파들은 같은 flat 페이딩을 겪으며, 각 PRB는 독립적으로 페이딩을 겪는다고 가정한다. 또한, PRB 단위로 각 사용자에게 자원이 할당된다고 가정한다 (즉, 각 PRB가 프레임을 구성하는 슬롯이 된다). 따라서, 제안하는 인지 빔형성 기법은 PRB 단위로 적용한다. 표 2는 OFDMA 기반의 이중 셀룰러 망 시스템 시뮬레이션 환경을 요약하였다.

4.2 인지 빔형성 적용 여부 결정 방식

소형셀 기지국이 임의의 사용자에게 인지 빔형성 기법의 적용 여부를 결정하기 위하여 수식 (3) (사용자 측정 기반 방식) 와 (4) (제안 기법: 소형셀 기지국 측정 기반 방식) 을 사용할 수 있다. 그림 4는 빔형

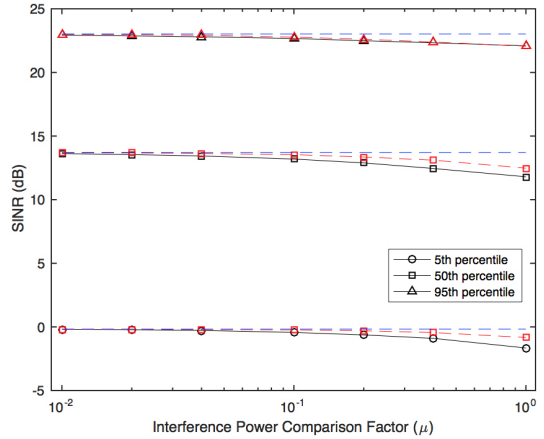


그림 4. 간섭전력 비교 계수 μ 값에 따른 매크로셀 사용자 SINR 성능 비교 (검정 실선: 제안 기법, 빨강 점선: 사용자 측정 기반 방식, 파랑 점선 (no marker): 소형셀 기지국 간섭이 없는 경우).

Fig. 4. Macro-cell user's SINR performance comparison with interference power comparison factor μ (black solid line: proposed scheme, red dashed line: user measurement based scheme, blue dashed line (no marker): without small-cell BS interference).

성 적용 결정 방식에 따른 매크로셀 사용자의 SINR 성능 비교를 위해 5번째, 50번째, 95번째 SINR 백분위 값을 보여준다. 여기서, 각 소형셀 기지국은 해당 사용자와의 채널을 정확하게 추정한다고 가정한다.

사용자 기반 측정 방식보다 기지국 기반 측정 방식의 SINR 성능이 낮음을 확인할 수 있는데 이는 간접적으로 소형셀 기지국 간섭을 예측하기 때문이다. 하지만, μ 가 감소할수록 두 방식 모두 SINR 성능은 이상적인 성능 (즉, 소형셀 기지국의 간섭이 전혀 없는 경우)에 근접하며 그 차이도 거의 없음을 확인할 수 있다. 그 이유는 수식 (3) 와 (4)로부터 간섭전력 비교 계수 μ 가 감소할수록 더 많은 소형셀 기지국들이 해당 사용자를 위해 빔형성을 적용하기 때문이다.

그림 5는 빔형성 적용 결정 방식에 따른 소형셀 사용자의 SINR 성능 비교를 위해 5번째, 50번째, 95번째 SINR 백분위 값을 보여준다. 여기서, 각 소형셀 기지국은 해당 사용자와의 채널을 정확하게 추정한다고 가정한다. 매크로셀 사용자 성능보다 매우 향상된 성능을 확인할 수 있는데 그 이유는 소형셀 기지국과 소속 사용자는 동일한 방에 존재한다고 가정하여 경로 감쇄가 거의 없기 때문이다^[18].

또한, 빔형성 기법 적용 여부 결정 방식에 따른 성능 차이가 거의 없음을 확인할 수 있는데 그 이유는 2.1절에서 언급한 바와 같이 소형셀 기지국은 언제나 (M_s-1)명의 사용자 채널에 직교하는 빔형성 벡터를 사

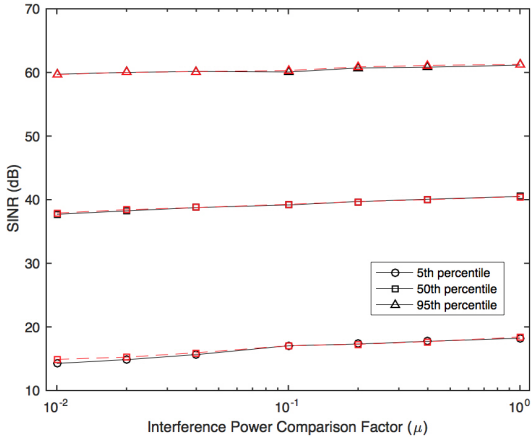


그림 5. 간섭전력 비교 계수 μ 값에 따른 소형셀 사용자 SINR 성능 비교 (검정 실선: 제안 기법, 빨강 점선: 사용자 측정 기반 방식).
Fig. 5. Small-cell user's SINR performance comparison with interference power comparison factor μ (black solid line: proposed scheme, red dashed line: user measurement based scheme).

용하기 때문에 소속 사용자가 얻을 수 있는 수신 신호의 다이버시티 차수는 1로 일정하기 때문이다^[14]. 마지막으로, 매크로셀 사용자와는 달리 μ 가 감소할수록 성능이 감소함을 확인할 수 있는데 그 이유는 다음과 같다. 3.1절에서 언급한 바와 같이 μ 가 감소할수록 소형셀 기지국은 더 많은 매크로셀 사용자들의 채널에 직교인 빔형성을 적용해야 한다. 따라서, 적은 수의 소형셀 사용자들의 채널에 직교인 빔형성을 사용하게 되며 이로 인해 인접 소형셀 사용자들이 수신하는 co-tier 간섭전력이 증가하기 때문이다.

4.3 파일럿 신호 개수

3.2절에서 언급한 대로 길이가 B 인 서로 직교하는 B 개의 파일럿 신호 중 $B_m = B/2$ 개의 파일럿 신호들이 매크로셀 사용자들 간에 공유되고 $B_s = B/2$ 개의 파일럿 신호들이 소형셀 사용자들 간에 공유된다고 가정하자. 이때, 각 매크로셀 사용자에게 랜덤하게 선택된 하나의 신호가 할당되어 인지 빔형성을 위한 채널 추정에 사용된다고 가정한다.

그림 6은 파일럿 신호 개수 B_m 의 변화에 따른 매크로셀 사용자의 SINR 성능 비교를 위해 $\mu = 0.1$ 일 때, 5번째, 50번째, 95번째 SINR의 백분위 값을 보여준다. B_m 이 증가할수록 SINR 성능이 향상됨을 확인할 수 있는데, 그 이유는 주변에 동일한 파일럿 신호를 사용하는 사용자의 수가 감소하여 수식 (9)에서 채널 추정 에러가 감소하기 때문이다.

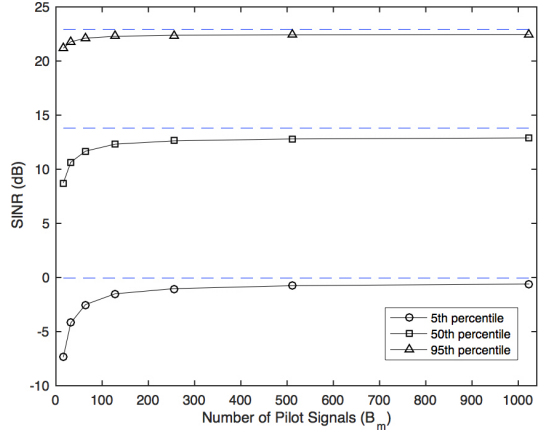


그림 6. 파일럿 신호 개수 B_m 에 따른 매크로셀 사용자 SINR 성능 비교 ($\mu = 0.1, B_m = B_s = B/2$, 검정 실선: 제안 기법, 파랑 점선 (no marker): 소형셀 간섭이 없는 경우).
Fig. 6. Macro-cell user's SINR performance comparison with number of pilot signals B_m ($\mu = 0.1, B_m = B_s = B/2$, black solid line: proposed scheme, blue dashed line (no marker): no small-cell BS interference).

4.4 대역 효율 성능

대역 효율 성능을 비교하기 위해, 먼저 매크로셀 사용자 n 과 소형셀 사용자 k 에 대한 대역 효율은 각각

$$R_n = \log_2(1 + \gamma_n) \text{ (bps/Hz)}$$

와

$$\tilde{R}_k = \log_2(1 + \tilde{\gamma}_k) \text{ (bps/Hz)}$$

로 정의한다. 이러한 대역 효율 정의하에, 그림 7은 $\mu = 0.1, B = 256, B_m = B_s = 128$ 을 적용한 제안 기법의 대역 효율 성능의 확률 누적 함수를 보여준다. 성능 비교를 위해, 소형셀 기지국에서 transmit maximum ratio combining (MRC) 를 적용한 경우 (즉, $\mathbf{f}_{i,k} = \hat{\mathbf{g}}_{i,k}^* / \|\hat{\mathbf{g}}_{i,k}\|$)^[14], 소형셀 기지국에서 MMSE 빔형성을 적용한 경우^[13], 소형셀 기지국 간섭이 없는 경우를 함께 비교하였다. transmit-MRC를 적용한 경우와 소형셀 기지국 간섭이 없는 경우에는 매크로셀 기지국과 소형셀 기지국에서 해당 사용자와의 채널을 정확하게 추정한다고 가정한다. 또한, MMSE 빔형성을 적용한 경우에는 MMSE 빔형성 벡터 계산에 필요한 해당 사용자와의 채널과 간섭 신호에 대한 공분산 행렬을 정확하게 추정한다고 가정한다^[13].

그림 7로부터 제안 기법의 매크로셀 사용자의 대역

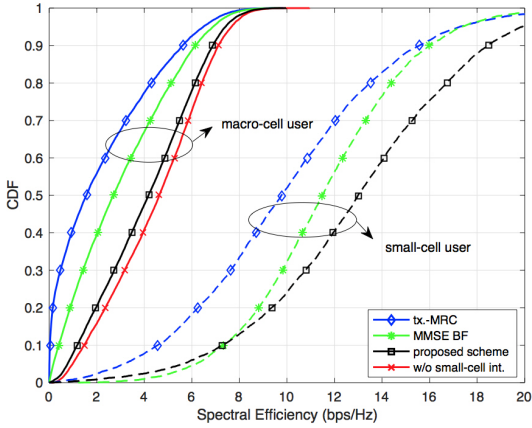


그림 7. 대역 효율 누적 분포 함수 비교 ($\mu = 0.1, B = 256, B_m = B_s = 128$).
 Fig. 7. Comparison of cumulative distribution function of spectral efficiency ($\mu = 0.1, B = 256, B_m = B_s = 128$).

효율 성능은 소형셀 간섭이 없는 이상적인 경우의 성능에 근접함을 확인할 수 있다. 그에 반해 MMSE 빔형성 기법의 경우, 소형셀 기지국이 인지 빔형성을 적용할 매크로셀 사용자들을 결정할 필요 없이 간섭 신호의 공분산 행렬만 추정하면 바로 MMSE 빔형성 기법을 적용할 수 있다는 장점이 있으나 제안 기법보다 성능이 감소함을 확인할 수 있는데 그 이유는 다음과 같다. 제안 기법의 경우 인지 빔형성의 지원을 받는 매크로셀 사용자들이 수신하는 해당 소형셀 기지국으로 인한 간섭 신호를 거의 없애주지만, MMSE 빔형성 기법은 소형셀 기지국이 수신에 사용한 MMSE 벡터를 그대로 정규화하여 빔형성에 적용하므로 인접한 매크로셀 사용자들에게 간섭 신호를 어느정도 전송하기 때문이다. 소형셀 사용자도, 제안기법이 MMSE 빔형성 기법보다 더 나은 성능을 보임을 확인할 수 있는데 그 이유는 제안기법이 빔형성을 통해 인접 매크로셀 사용자에게 수신되는 간섭전력도 줄이기 때문이다. 또한, 제안 기법은 소형셀 기지국에서 transmit-MRC만을 적용한 경우에 비하여 50번째 백분위 값 기준 약 2.75배 정도 대역 효율이 향상함을 확인할 수 있다. 이는 약 36% 자원만으로 동일한 전송률을 달성할 수 있다는 의미이다. 따라서, 만일 제안 기법이 소형셀 기지국이 매크로셀 사용자 채널을 추정하기 위한 별도의 파일럿 신호를 전송해야 한다면, 이에 필요한 자원을 전체자원의 약 64%까지 허용해도 50백분위 값 기준으로 소형셀 기지국에 transmit-MRC만을 적용하는 경우와 비슷한 전송효율을 얻을 수 있다.

그러나, 매크로셀 기지국은 zero-forcing 프리코딩 당 신호 전송을 위해서 해당 사용자들의 채널 추정이 필요하다. 이를 위해, 해당 매크로셀 사용자들이 전송하는 파일럿 신호를 이용하여 채널을 추정하게 되는데, 이를 이용하면 소형셀 기지국이 해당 매크로셀 사용자의 채널을 추정할 수 있다. 따라서, 매크로셀에서 zero-forcing 프리코딩과 같이 전송대상이 되는 사용자들의 채널을 파일럿 신호를 통해 추정해야 하는 전송기법을 사용하는 경우, 소형셀 기지국에서 해당 매크로셀 사용자의 채널 추정을 위한 추가적인 파일럿 신호가 필요하지 않다.

4.5 소형셀 기지국 분포율

표 3은 임의의 슬롯에서 동시에 인지 빔형성을 지원해야 하는 매크로셀 사용자 수에 따른 소형셀 기지국의 구성 비율을 보여준다. 예를 들어, $\mu = 0.1$, 소형셀 기지국 분포율이 0.1인 경우, 전체의 약 66%의 소형셀 기지국들은 인접 소형셀 사용자들이 수신하는 간섭전력을 줄이는 빔형성을 사용하며 (즉, $\eta = 0$), 나머지 약 34%의 소형셀 기지국들은 그와 함께 1명 이상의 인접 매크로셀 사용자들에게 수신되는 cross-tier 간섭전력을 줄이는 빔형성을 사용한다는 의미이다.

표 3으로부터 간섭전력 비교 계수 μ 값이 증가하면 $\eta = 0$ 인 소형셀 기지국의 비율이 높아지는 경향이 있음을 확인할 수 있다. 그 이유는 3.1절에서 설명한 바

표 3. 임의의 슬롯에서 동시에 지원하는 매크로셀 사용자 수에 따른 소형셀 기지국의 구성 비율.
 Table 3. The composition of small-cell BSs with number of simultaneously supporting macro-cell users for given slot.

μ	small-cell deployment ratio	The number of simultaneously supporting macro-cell users (η)			
		0	1	2	3
0.02	0.05	53.57%	32.32%	11.06%	3.05%
	0.1	55.17%	31.65%	10.32%	2.85%
	0.15	55.12%	31.65%	10.41%	2.82%
	0.2	55.42%	31.88%	10.07%	2.63%
0.04	0.05	58.22%	30.45%	9.14%	2.20%
	0.1	59.72%	29.69%	8.51%	2.08%
	0.15	59.66%	29.70%	8.59%	2.06%
	0.2	60.03%	29.79%	8.26%	1.92%
0.1	0.05	64.33%	27.42%	6.87%	1.38%
	0.1	65.62%	26.63%	6.41%	1.34%
	0.15	65.48%	26.73%	6.47%	1.32%
	0.2	65.94%	26.66%	6.17%	1.22%
0.2	0.05	68.66%	24.98%	5.40%	0.96%
	0.1	69.91%	24.12%	5.05%	0.92%
	0.15	69.70%	24.27%	5.11%	0.92%
	0.2	70.24%	24.08%	4.83%	0.85%
0.4	0.05	72.89%	22.34%	4.15%	0.63%
	0.1	74.05%	21.47%	3.87%	0.62%
	0.15	73.72%	21.72%	3.94%	0.62%
	0.2	74.29%	21.44%	3.71%	0.57%

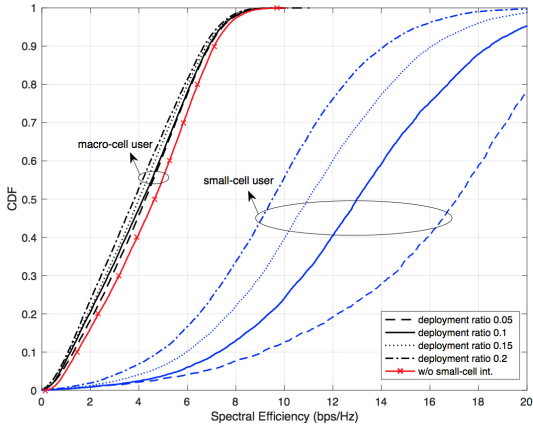


그림 8. 소형셀 분포율에 따른 대역 효율 누적 분포 함수 ($\mu = 0.1, B = 256, B_m = B_s = 128$).
 Fig. 8. Cumulative distribution function of spectral efficiency with small-cell deployment ratio ($\mu = 0.1, B = 256, B_m = B_s = 128$).

와 같이 μ 값이 증가하면 작은 수의 소형셀 기지국만이 매크로셀 사용자에게 수신되는 간섭전력을 줄여주는 빔형성을 사용하기 때문이다. 이에 반해, 소형셀 기지국의 분포율이 증가하여도 동시 지원하는 매크로셀 사용자 수에 따른 소형셀 기지국 구성 비율은 큰 차이가 없는데, 그 이유는 다음과 같다. 특정 매크로셀 사용자에게 대한 빔형성 적용 여부는 수식 (4)를 통해 알 수 있듯이 매크로셀 기지국으로부터 수신되는 간섭전력만을 고려하며, 인접한 소형셀 기지국들에 수신되는 매크로셀 기지국의 간섭전력은 비슷할 것이므로 빔형성 적용 여부에 대해 비슷한 결정을 내릴 것이기 때문이다.

그림 8은 소형셀 기지국 분포율에 따른 사용자의 대역 효율 성능 확률 누적함수를 보여준다. 그림 8에서 나타나는 바와 같이 매크로셀 사용자의 성능은 소형셀 간섭이 없는 이상적인 경우에 거의 근접하며, 분포율이 증가함에 따라 성능이 조금씩 감소하나 그 차이가 크지 않음을 확인할 수 있다. 이를 통해, 제안 기법이 소형셀 기지국 분포율과 관계없이 매크로셀 사용자에게 수신되는 cross-tier 간섭을 효과적으로 줄일 수 있음을 알 수 있다.

이에 반해, 소형셀 사용자의 성능은 소형셀 기지국 분포율이 증가할수록 감소하는데 그 이유는 분포율이 증가할수록 소형셀 사용자에게 수신되는 co-tier 간섭이 증가하지만, 표 3에서 확인한 바와 같이 빔형성을 통해 간섭전력이 줄어드는 인접 소형셀 사용자들의 수의 분포는 거의 일정하기 때문이다.

V. 결론

본 논문에서는 이중 셀룰러 망에서 소형셀 기지국이 스스로 환경을 인지하여 주변 매크로셀 사용자 채널에 직교하는 빔형성을 사용하여 cross-tier 간섭을 줄이는 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 매크로셀 기지국이나 매크로셀 사용자와의 상호 정보교환 없이 소형셀이 스스로 동작하여 cross-tier 간섭 문제가 발생한 매크로셀 사용자를 파악하고, 해당 사용자가 데이터를 수신하는 시점에 해당 사용자의 채널에 직교하는 빔형성을 사용하여 데이터를 전송하여 cross-tier 간섭을 줄인다. 또한, 제안기법은 매크로셀 사용자 채널뿐만 아니라, 인접한 소형셀 사용자의 채널과도 동시에 직교하도록 빔형성을 생성하면 소형셀 사용자가 겪는 co-tier 간섭도 함께 줄일 수 있다. 제안 기법의 유효성을 검증하기 위해 시스템 레벨 시뮬레이션을 수행하였고, 해당 결과를 통해 제안된 기법이 cross-tier 간섭을 효과적으로 줄일 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] Cisco, *Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2015-2020*, Cisco white paper, Feb. 2016.
- [2] A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe, and T. Thomas, "LTE-advanced: Next-generation wireless broadband technology," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 17, no. 3, pp. 10-22, Jun. 2010.
- [3] V. Chandrasekhar and J. G. Andrews, "Spectrum allocation in tiered cellular networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 10, pp. 3059-3068, Oct. 2009.
- [4] C. Mun and H. S. Jo, "Dynamic channel allocation in closed-access small cell networks," *J. KICS*, vol. 39, no. 1, pp. 50-61, Jan. 2014.
- [5] C. S. Lee, J. H. Kim, J. H. Kwak, E. K. Kim, and S. Chong, "Distributed BS transmit power control for utility maximization in small-cell networks," *J. KICS*, vol. 38, no. 12, pp. 1125-1134, Dec. 2013.
- [6] D. G. Jeong and Y. S. Kim, "Power control of femto base station for protecting macrocell users," *J. KICS*, vol. 38, no. 10, pp. 865-873,

Oct. 2013.

[7] S. T. Lee, C. S. Ahn, and J. T. Shin, "Dynamic downlink resource management of femtocells using power control in OFDMA networks," *J. KICS*, vol. 37, no. 5, pp. 339-347, May 2012.

[8] H. O. Kpojime, "Interference mitigation in cognitive femtocell networks," Ph.D. Thesis, Univ. of Bedfordshire, Sept. 2015.

[9] E. Yaacoub, "Interference mitigation in femtocell networks with joint channel sensing and resource allocation," *IEEE Wirel. Commun.*, pp. 783-788, Mar. 2015.

[10] H. Kalbkhani, V. Solouk, and M. G. Shayesteh, "Resource allocation in integrated femto-macrocell networks based on location awareness," *IEEE J. M. IET Commun.*, vol. 9, no. 7, pp. 917-932, Jul. 2015.

[11] A. R. Elsherif, W. P. Chen, A. Ito, and Z. Ding, "Adaptive resource allocation for interference management in small cell networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 6, pp. 2107-2125, Jun. 2015.

[12] M. Maso, L. S. Cardoso, M. Debbah, and L. Vangelista, "Cognitive orthogonal precoder for two-tiered networks deployment," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 31, no. 11, pp. 2338-2348, Nov. 2013.

[13] A. Adhikary, V. Ntranos, and G. Caire, "Cognitive femtocells: Breaking the spatial reuse barrier of cellular systems," in *Proc. IEEE Inf. Theory Workshop*, pp. 1-10, Paraty, Brazil, Oct. 2011.

[14] A. Paulraj, N. Rohit, and G. Dhananjay, *Introduction to space-time wireless communications*, Cambridge Univ. Press, 2003.

[15] D. B. Cheikh, J. M. Kelif, M. Coupechoux, and P. Godlewski, "Multicellular zero forcing precoding performance in Rayleigh and shadow fading," in *Proc. IEEE Veh. Tech. Conf.*, pp. 1-5, Budapest, Hungary, May 2011.

[16] T. L. Marzetta, "Noncooperative cellular wireless with unlimited numbers of base station antennas," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3590-3600, Nov. 2010.

[17] G. Strang, *Linear Algebra and Its Applications*, 3rd Ed., Harcourt Brace & Company, 1988.

[18] 3GPP TR 36.814 v9.0.0, *Further advancements for E-UTRA physical layer aspects* (Release 9), Technical Report 3GPP, Mar. 2010.

[19] J. Zander and S. Kim, *Radio resource management for wireless networks*, Artech House, 2001.

[20] 3GPP R4-092042, *Simulation assumption and parameters for FDD HeNB RF requirements*, 3GPP TSG RAN WG4 Meeting 51, May 2009.

서 주 열 (Ju-yeol Seo)



2010년 2월~현재 : 강원대학교
전기전자공학부 학부과정
<관심분야> 다중안테나/다중사
용자통신

박 승 영 (Seungyoung Park)



2002년 8월 : 고려대학교 전파
통신공학과 박사
2002년 11월~2003년 3월 : 고
려대학교 BK21 정보통신사
업단 박사후연구원
2003년 4월~2005년 12월 : 삼
성전자종합기술원 책임연구원
2006년 1월~2007년 2월 : 미국 퍼듀대학교 박사후연
구원
2012년 1월~2013년 1월 : 미국 퍼듀대학교 방문교수
2007년 3월~현재 : 강원대학교 전기전자공학부 교수
<관심분야> 다중안테나/다중사용자통신, 무선자원관
리, 차량애드혹망, 기계학습