

비동기식 TDD 기반의 이종 네트워크를 위한 전력 할당 방식 연구

민 경 식*, 김 태 형*, 박 상 준*, 최 수 용^o

Study on Power Allocation for Heterogeneous Networks Based on Asynchronous TDD

Kyungsik Min*, Taehyoung Kim*, Sangjoon Park*, Sooyong Choi^o

요 약

본 논문은 기지국 간 상호간섭의 할당 비율이 동일하지 않은 비동기식 시분할 듀플렉싱 모드 기반의 이종 네트워크 환경에서 총 전송률을 최대화 하는 전력 할당 방식을 연구한다. 본 논문에서는 매크로 셀 커버리지 안에 같은 자원을 공유하는 소형 셀이 존재하는 이종 네트워크를 고려한다. 각 셀 마다 주어진 Target 수신 신호 대 간섭 및 잡음 비 성능을 만족하면서 각 셀의 전송률의 합을 목적 함수로 가지는 최적화 문제를 정의한다. 이를 통해 최적 해가 존재하기 위한 가시적인 영역을 분석하고 총 전송률을 최대화 할 수 있는 전력 할당 방식을 도출한다. 실험 결과를 통하여 제안한 전력 할당 방식을 사용한 전송 방식이 모든 노드가 최대 허용 전력으로 전송하는 전송 방식보다 더 높은 전송률을 달성함을 확인할 수 있다.

Key Words : Small cell, HetNets, Asynchronous TDD, Power allocation, Convex optimization

ABSTRACT

This paper analyzes the power allocation scheme to maximize the sum-rate for heterogeneous networks based on asynchronous time division duplex. We consider heterogeneous networks where a small cell exists in the macro cell coverage and the small cell and the macro cell share the same time-frequency resources. We formulate the optimization problem which maximizes the sum-rate of the heterogeneous network subject to the target signal-to-interference-plus-noise ratio. We analyze the feasible region in order for the optimal solution to exist and the optimal power allocation scheme for maximizing the sum-rate. Simulation results show that the proposed power allocation schemes outperform the maximum power transmission scheme.

I. 서 론

소형 셀 (Small Cell) 기술은 기지국과 사용자의 거리를 가깝게 함으로써 사용자의 수신 신호 품질을 향

상시키고 더 높은 차수의 변조 방식 (Higher Order Modulation) 사용을 가능케 하여 더 빠른 데이터 전송 속도를 가능케 한다^{1,2)}.

소형 셀 운용 방식 중 하나인 이종 네트워크

* 본 연구는 서울특별시의 서울 벨 연구소 사업(서울시 산학연 협력사업(WR080951)) 및 2014년 교육인적자원부 BK21 플러스 사업의 일환인 연세대학교 BEST 정보기술 사업단의 지원을 받아 수행되었음.

• First Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, minkyungsik@yonsei.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, csyong@yonsei.ac.kr, 종신회원

* School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University

논문번호 : KICS2014-09-348, Received September 11, 2014; Revised September 27, 2014; Accepted October 8, 2014

(Heterogenous Networks)는 매크로 셀과 소형 셀이 공존하여 주파수 자원의 재사용 효율을 높일 수 있다^[3]. 이러한 이종 네트워크에서, 만약 매크로 셀과 소형 셀이 서로 다른 트래픽 비율로 운용된다면 같은 트래픽 비율로 운용되는 경우 대비 주파수 자원 재사용 효율을 높임과 동시에 셀 수율 (Cell Throughput)을 추가적으로 향상시킬 수 있다^[4-6]. 따라서 이종 네트워크에서 매크로 셀과 소형 셀이 서로 다른 트래픽으로 운용되는 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[5-8].

이종 네트워크에서 매크로 셀과 소형 셀이 하향링크와 상향링크를 다른 비율로 운용하게 되면 같은 비율로 운용하는 경우와 비교하여 다른 간섭 패턴이 나타나게 된다. 예를 들면 소형 셀이 하향 링크에 더 많은 시간 자원을 할당하게 되면 같은 시간에 매크로 셀 기지국은 상향 링크로 동작하게 된다. 이 때 소형 셀 기지국은 매크로 셀 기지국에, 매크로 셀 사용자는 소형 셀 사용자에게 간섭을 미치게 된다. 하지만 기존 이종 네트워크에서의 전력 할당에 관한 연구들에서는 상기와 같은 기지국 간 또는 단말 간 간섭 패턴을 고려하지 않았다^[9,10]. 따라서 기지국 간 또는 단말 간 간섭을 고려한 전력 할당 연구가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 매크로 셀 커버리지 안에 소형 셀이 공존하는 이종 네트워크가 비동기식 Time Division Duplex (TDD) 기반으로 운용될 때 총 전송률을 최대화하는 전력 할당 방식을 연구한다. 본 논문에서 고려하는 비동기식 TDD는 기지국간 트래픽 전송량의 불균형으로 인하여 각 기지국의 상하향링크 할당 시간이 다른 TDD 방식을 의미한다. 비동기식 TDD 전력 할당 방식의 도출을 위해, 본 논문에서는 매크로 셀과 소형 셀의 전송률의 합을 목적 함수 (Objective Function)로 가지는 최적화 문제를 정의한다. 정의된 최적화 문제에서 총 전송률을 최적화하는 전력 할당 비율의 최적 해가 존재하는 가시적인 범위 (feasible region)를 분석함으로써 최적 해가 존재하는지의 유무를 분석한다. 이러한 분석을 통해, 본 논문에서는 총 전송률을 최대화 하는 전력 할당 비율이 주어진 Target 성능을 만족시키기 위해서는 매크로 셀에서의 전송 노드와 소형 셀에서의 전송 노드 중 반드시 하나의 전송 노드가 최대 가용 전력으로 신호를 전송해야 함을 증명한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 고려하는 시스템 모델을 설명한다. 3장에서는 소형 셀이 하향 링크로 동작하고 매크로 셀이 상향링크로 동작하는 환경에서 총 전송률을 최대화하기 위한

전력 할당 방식을 분석한다. 4장에서는 매크로 셀이 하향 링크로 동작하고 소형 셀이 상향링크로 동작하는 환경에서 총 전송률을 최대화하기 위한 전력 할당 방식을 분석한다. 5장에서는 제한한 전력 할당 방식에 대한 성능을 실험 결과를 통해 보이며, 6장의 결론으로 끝을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 단일 셀 환경에서 하나의 매크로 셀 커버리지 안에 하나의 소형 셀이 공존하는 시스템을 고려한다. 매크로 기지국과 소형 기지국은 단일 송수신 안테나를 가지고 있으며 각 기지국에 연결되어 있는 단말 또한 단일 송수신 안테나를 가지고 있다. 이 때 매크로 셀과 소형 셀은 같은 시간-주파수 자원을 공유한다. 전송 노드 x 와 수신 노드 y 간의 채널 이득은 Rayleigh fading과 경로 손실을 고려하여 다음과 같이 표현된다^[11].

$$g_{xy} = |h_{xy}|^2 d_{xy}^{-\alpha} \tag{1}$$

식 (1)에서 x 는 신호를 전송하는 기지국 또는 사용자, y 는 신호를 수신하는 기지국 또는 사용자를 의미한다. h_{xy} 는 x 와 y 간의 Rayleigh 채널 상수, d_{xy} 는 x 와 y 간의 거리, $-\alpha$ 는 경로 손실 지수 (Path Loss Exponent)를 의미한다.

본 논문에서는 TDD 기반의 이종 네트워크를 고려한다. 이종 네트워크에서 매크로 셀과 소형 셀이 같은 양의 상하향링크 트래픽을 요구하는 경우 각 셀의 하향 링크 및 상향 링크는 그림 2와 같이 같은 시간에 동작하게 된다. 이러한 경우에 발생하는 간섭 패턴은 그림 3과 같이 하향 링크에서는 기지국이 인접 셀의

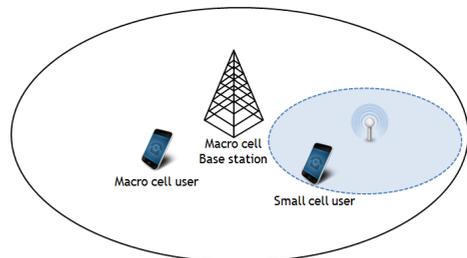


그림 1. 매크로 셀 커버리지 안에 매크로 기지국과 소형 기지국이 공존하는 이종 네트워크 시스템 모델.
Fig. 1. System model for heterogeneous networks where macro and small cell base station share the same time-frequency resources.

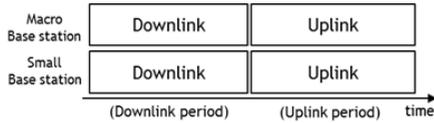


그림 2. 매크로 셀과 소형 셀이 모두 하향 링크 또는 상향 링크로 동작하는 시분할 듀플렉싱 모드.
Fig. 2. Duplexing mode when the macro and small cell operates in downlink and uplink.

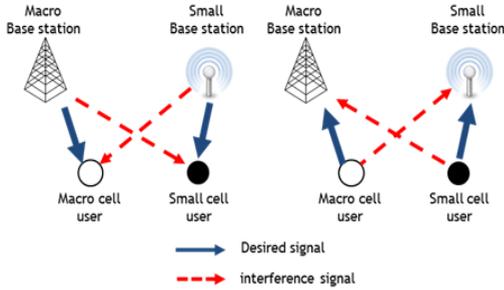


그림 3. 매크로 셀과 소형 셀이 모두 하향 링크 (왼쪽) 또는 상향 링크 (오른쪽)로 동작할 때의 간섭 상황.
Fig. 3. Interference patterns when the macro and small cell operates in downlink (left) and uplink (right).

단말로 미치는 간섭, 상향 링크에서는 단말이 인접 기지국으로 미치는 간섭으로 나타난다.

하지만 소형 셀 또는 매크로 셀 중 하나의 셀이 더 많은 하향링크 트래픽을 요구한다면 각 셀은 상하향 링크의 시간 동기가 맞지 않는 비동기식 TDD 모드로 동작한다. 그림 4는 비동기식 TDD 모드로 동작하는 환경에서 소형 셀이 하향 링크로 동작하고 매크로 셀이 상향 링크로 동작하는 경우의 간섭 상황을 나타낸다. 이 때 매크로 기지국은 소형 기지국으로부터 간섭을 받고 소형 셀 사용자는 매크로 셀 사용자로부터 간섭을 받는다. 그림 5는 매크로 셀이 하향 링크로 동작하고 소형 셀이 상향 링크로 동작하는 경우의 간섭 상황을 설명한다. 그림 4와 반대로 그림 5에선 매크로 기지국이 소형 기지국으로 간섭을 미치며 소형 셀 사용자는 매크로 셀 사용자에게 간섭을 미친다.

본 논문에서는 동기가 맞지 않는 시분할 듀플렉싱 시스템의 총 전송률 최대화를 위한 전력 할당 방식을 고려하기 위하여 소형 셀이 하향 링크로 동작할 때 매크로 셀이 상향 링크로 동작하는 경우, 그리고 매크로 셀이 하향 링크로 동작할 때 소형 셀이 하향 링크로 동작하는 경우를 각각 고려한다.

이후 수식에서 m_b 는 매크로 기지국, m_u 는 매크로 셀 사용자, s_b 는 소형 기지국, s_u 는 소형 셀 사용자를 의미한다.

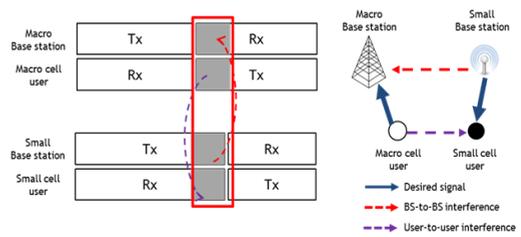


그림 4. 소형 셀이 하향 링크로 동작하고 매크로 셀이 상향 링크로 동작할 때의 간섭 상황.
Fig. 4. Interference pattern when the small cell operates in downlink mode and the macro cell operates in uplink mode.

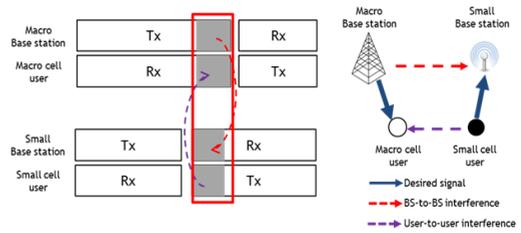


그림 5. 매크로 셀이 하향 링크로 동작하고 소형 셀이 상향 링크로 동작할 때의 간섭 상황.
Fig. 5. Interference pattern when the macro cell operates in downlink mode and the small cell operates in uplink mode.

III. 소형 셀이 하향링크로 동작하고 매크로 셀이 상향링크로 동작하는 환경에서의 전력 할당 방식

본 장에서는 소형 셀이 하향 링크로 동작하고 매크로 셀이 상향 링크로 동작하는 상황을 고려한다. 이 때 상향 링크로 동작하는 매크로 셀에서 기지국이 수신하는 상향 링크 신호의 신호 대 간섭 및 잡음비 (signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR)는 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_{m_u} = \frac{p_{m_u} g_{m_u m_b}}{p_{s_b} g_{s_b m_b} + N_0} \geq \gamma_{m_u}^t \quad (2)$$

식 (2)에서 p_{m_u} 와 p_{s_b} 는 매크로 셀 사용자와 소형 기지국의 송신 전력을 의미하고 N_0 는 잡음 분산을 의미한다. $\gamma_{m_u}^t$ 은 매크로 셀 상향 링크의 최소 성능을 만족시키는 Target SINR이다^[12,13].

하향 링크로 동작하는 소형 셀에서 소형 셀 사용자가 수신하는 하향 링크 신호의 수신 SINR은 아래와 같이 표현된다.

$$\gamma_{s,dl} = \frac{p_{s_b} g_{s_b s_u}}{p_{m_u} g_{m_u s_u} + N_0} \geq \gamma_{s,dl}^t \quad (3)$$

식 (3)에서 $\gamma_{s,dl}^t$ 은 소형 셀 하향 링크의 최소 성능을 만족시키는 Target SINR이다^[12,13].

식 (2)와 (3)을 이용하여 소형 셀이 하향 링크로 동작하고 매크로 셀이 상향 링크로 동작하는 상황에서 총 전송률은 다음과 같이 주어진다.

$$R_1(p_{m_u}, p_{s_b}) = \underbrace{W \log_2(1 + \gamma_{m,ul})}_{\text{uplink macro cell}} + \underbrace{W \log_2(1 + \gamma_{s,dl})}_{\text{downlink small cell}} \quad (4)$$

식 (4)에서 W 는 시스템 대역폭 (Bandwidth)을 나타낸다. 식 (2)–(4)를 이용하여 소형 셀이 하향 링크로 동작하고 매크로 셀이 상향 링크로 동작하는 환경에서 총 전송률을 최대화하는 소형 기지국 전력과 매크로 셀 사용자의 전력을 구하는 문제는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(p_{m_u}^*, p_{s_b}^*) = \underset{p_{m_u}, p_{s_b}}{\text{argmax}} R_1(p_{m_u}, p_{s_b}) \quad (5)$$

$$\text{s.t. } \gamma_{m,ul} \geq \gamma_{m,ul}^t, \gamma_{s,dl} \geq \gamma_{s,dl}^t \quad (6)$$

$$0 \leq p_{m_u} \leq \bar{p}_u, 0 \leq p_{s_b} \leq \bar{p}_{s_b} \quad (7)$$

식 (7)에서 \bar{p}_u 는 사용자의 최대 송신 허용 전력, \bar{p}_{s_b} 는 소형 기지국의 최대 송신 허용 전력을 의미한다.

다음으로, 식 (5)의 최적화 문제를 풀기 위해 가지적인 영역의 존재 및 최적 해가 존재할 조건에 대해 분석해 본다.

3.1 최적 해를 가지기 위한 조건

본 절에서는 식 (5)의 최적화 문제에 대한 가지적인 영역이 존재하는 지 분석한다. 이를 위해 하기의 식 (8) 및 (9)를 정의한다.

$$\frac{p_{m_u} g_{m_u m_b}}{p_{s_b} g_{s_b m_b} + N_0} = \gamma_{m,ul}^t \quad (8)$$

$$\frac{p_{s_b} g_{s_b s_u}}{p_{m_u} g_{m_u s_u} + N_0} = \gamma_{s,dl}^t \quad (9)$$

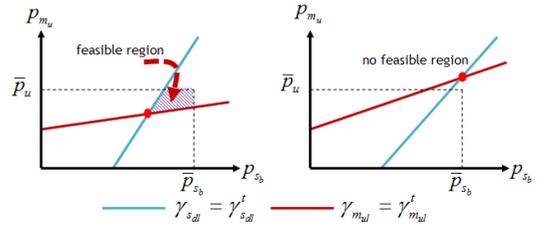


그림 6. 가지적 범위가 존재하는 경우(왼쪽)와 존재하지 않는 경우 (오른쪽).
Fig. 6. Feasible power allocation region when the feasible region exists.

식 (8)과 (9)는 조건식 (6)의 Marginal 제약 조건이다. 식 (8)과 (9)는 p_{m_u} 와 p_{s_b} 로 이루어진 이차 평면에서 직선으로 각각 표현될 수 있다. 조건식 (6)에 의하여 형성되는 평면이 조건식 (7)로 형성되는 평면 안에 존재하기 위해선 직선 (8)과 (9)를 동시에 만족하는 p_{m_u} 와 p_{s_b} 가 (7) 안에 존재해야 한다. 이를 만족하는 조건을 식 (10)과 (11)로 표현할 수 있다.

$$0 \leq \frac{\gamma_{m,ul}^t N_0}{g_{m_u m_b}} \left(\frac{1 + \frac{g_{s_b m_b}}{g_{s_b s_u}} \gamma_{m,ul}^t}{1 - \frac{g_{m_u s_u} g_{s_b m_b}}{g_{s_b s_u} g_{m_u m_b}} \gamma_{m,ul}^t \gamma_{s,dl}^t} \right) \leq \bar{p}_u \quad (10)$$

$$0 \leq \frac{\gamma_{s,dl}^t N_0}{g_{s_b s_u}} \left(\frac{1 + \frac{g_{m_u s_u}}{g_{m_u m_b}} \gamma_{s,dl}^t}{1 - \frac{g_{m_u s_u} g_{s_b m_b}}{g_{s_b s_u} g_{m_u m_b}} \gamma_{m,ul}^t \gamma_{s,dl}^t} \right) \leq \bar{p}_{s_b} \quad (11)$$

그림 6의 왼쪽 그림이 식 (10)과 (11)을 만족하는 경우를 나타낸다.

3.2 총 전송률을 최대화하는 전력 할당 방식

본 절에서는 소형 기지국이 하향 링크로 동작하고 매크로 기지국이 상향 링크로 동작하는 환경에서 총 전송률을 최대화하는 전력 할당 방식을 연구한다.

식 (5)에서 log 함수는 단조 증가 함수이므로 (5)의 목적 함수는 다음과 같은 형태로 다시 쓸 수 있다^[14].

$$(p_{m_u}^*, p_{s_b}^*) = \underset{p_{m_u}, p_{s_b}}{\text{argmax}} (1 + \gamma_{m,ul}) (1 + \gamma_{s,dl}) \quad (12)$$

기존 연구에 따르면 식 (12)의 최적화 문제에 대한

최적 해는 $\gamma_{m_d} = \gamma_{m_d}^t$ 와 $\gamma_{s_{dl}} = \gamma_{s_{dl}}^t$ 둘 중 하나의 조건을 만족한다^[15]. 본 논문에서는 $\gamma_{m_d} = \gamma_{m_d}^t$ 또는 $\gamma_{s_{dl}} = \gamma_{s_{dl}}^t$ 일 때의 총 전송률을 최대화 하는 전력 할당 방식을 분석한다. 먼저 $\gamma_{m_d} = \gamma_{m_d}^t$ 일 때의 전력 할당을 살펴보면, $\gamma_{m_d} = \gamma_{m_d}^t$ 일 때 p_{s_b} 는 다음과 같이 표현된다.

$$p_{s_b} = \frac{p_{m_u} g_{m_u m_b} - \gamma_{m_d}^t N_0}{\gamma_{m_d}^t g_{s_b m_b}} \quad (13)$$

식 (13)을 (12)에 대입하면 (12)는 다음과 같이 표현된다.

$$p_{m_u}^* = \underset{p_{m_u}}{\operatorname{argmax}} \left(1 + \gamma_{m_d}^t \right) \left(1 + \frac{g_{s_b m_b} (p_{m_u} g_{m_u m_b} - \gamma_{m_d}^t N_0)}{\gamma_{m_d}^t g_{s_b m_b} (p_{m_u} g_{m_u s_u} + N_0)} \right) \quad (14)$$

= $J_1(p_{m_u})$

식 (14)의 최적화 문제가 최댓값을 가질 조건은 (14)의 목적 함수 $J_1(p_{m_u})$ 가 오목 함수 (Concave Function)이어야 한다^[14]. 목적 함수 $J(p_{m_u})$ 의 이계 미분 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial^2 J_1(p_{m_u})}{\partial p_{m_u}^2} = - \left(1 + \gamma_{m_d}^t \right) \frac{g_{s_b m_b} g_{m_u s_u} N_0 (g_{m_u m_b} + \gamma_{m_d}^t g_{m_u s_u})}{\gamma_{m_d}^t g_{s_b m_b} (p_{m_u} g_{m_u s_u} + N_0)^3} \leq 0 \quad (15)$$

조건식 (6)과 (7)을 만족하는 영역에 대하여 식 (15)는 항상 음수이므로 (12)의 최적 해는 가지적인 범위에서 반드시 존재한다^[14].

식 (14)의 최적화 문제의 목적 함수 $J_1(p_{m_u})$ 를 최대화 하는 p_{m_u} 을 구하기 위해 식 (14)의 목적함수 $J_1(p_{m_u})$ 를 p_{m_u} 에 대하여 일계 미분하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial J_1(p_{m_u})}{\partial p_{m_u}} = \left(1 + \gamma_{m_d}^t \right) \frac{g_{s_b m_b} N_0 (g_{m_u m_b} + \gamma_{m_d}^t g_{m_u s_u})}{\gamma_{m_d}^t g_{s_b m_b} (p_{m_u} g_{m_u s_u} + N_0)^2} \geq 0 \quad (16)$$

식 (16)은 조건식 (6)과 (7)을 만족하는 영역에서 항상 0보다 크거나 같으므로

$J_1(p_{m_u})$ 은 조건식 (6)과 (7)을 만족하는 영역에서 단조 증가 함수 (Monotonically Increasing Function)이다.

$\gamma_{s_{dl}} = \gamma_{s_{dl}}^t$ 일 때 p_{m_u} 에 대해서도 단조 증가 함수임을 보일 수 있다. $\gamma_{s_{dl}} = \gamma_{s_{dl}}^t$ 일 때 p_{m_u} 는 다음과 같이 표현된다.

$$p_{s_b} = \frac{\gamma_{s_{dl}}^t (p_{m_u} g_{m_u s_u} + N_0)}{g_{s_b s_u}} \quad (17)$$

식 (17)을 (16)에 대입하면 (12)는 다음과 같이 표현된다.

$$p_{m_u}^* = \underset{p_{m_u}}{\operatorname{argmax}} \left(1 + \gamma_{s_{dl}}^t \right) \left(1 + \frac{p_{m_u} g_{m_u m_b} g_{s_b s_u}}{\gamma_{s_{dl}}^t g_{s_b m_b} (p_{m_u} g_{m_u s_u} + N_0) + g_{s_b s_u} N_0} \right) \quad (18)$$

= $J_2(p_{m_u})$

식 (18)의 최적화 문제가 최댓값을 가질 조건은 (18)의 목적 함수 $J_2(p_{m_u})$ 가 오목 함수이어야 한다^[14]. 목적 함수 $J_2(p_{m_u})$ 의 이계 미분 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial^2 J_2(p_{m_u})}{\partial p_{m_u}^2} = - \left(1 + \gamma_{s_{dl}}^t \right) \frac{\gamma_{s_{dl}}^t N_0 (\gamma_{s_{dl}}^t g_{s_b m_b} + g_{s_b s_u}) G}{(\gamma_{s_{dl}}^t g_{s_b m_b} (p_{m_u} g_{m_u s_u} + N_0) + g_{s_b s_u} N_0)^3} \leq 0 \quad (19)$$

식 (19)에서 $G = g_{s_b s_u} g_{s_b m_b} g_{m_u m_b} g_{m_u s_u}$ 이다. 조건식 (6)과 (7)을 만족하는 영역에 대하여 식 (19)는 항상 음수이므로 (12)의 최적 해는 가지적인 범위에서 반드시 존재한다^[14].

식 (18)의 최적화 문제의 목적 함수 $J_2(p_{m_u})$ 를 최대화 하는 p_{m_u} 을 구하기 위해 식 (18)의 목적함수 $J_2(p_{m_u})$ 를 p_{m_u} 에 대하여 일계 미분하면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial J_2(p_{m_u})}{\partial p_{m_u}} = \left(1 + \gamma_{s_{dl}}^t \right) \frac{g_{m_u m_b} g_{s_b s_u} N_0 (\gamma_{s_{dl}}^t g_{s_b m_b} + g_{s_b s_u})}{(\gamma_{s_{dl}}^t g_{s_b m_b} (p_{m_u} g_{m_u s_u} + N_0) + g_{s_b s_u} N_0)^2} \geq 0 \quad (20)$$

식 (20)은 조건식 (6)과 (7)을 만족하는 영역에서 항상 0보다 크거나 같으므로 $J_2(p_{m_u})$ 은 조건식 (6)과

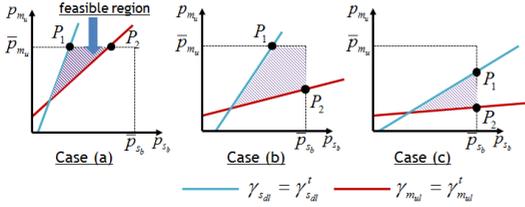


그림 7. 가시적 범위가 존재하는 경우에 발생할 수 있는 가시적 영역과 그 때의 최적 해의 위치.
Fig. 7. Feasible power allocation region for each possible feasible region.

(7)을 만족하는 영역에서 단조 증가 함수 이다.

동일한 방식으로 p_{s_b} 에 대해서도 $\gamma_{m_{dl}} = \gamma_{m_{dl}}^t$ 일 때와 $\gamma_{s_{dl}} = \gamma_{s_{dl}}^t$ 일 때 단조 증가함수임을 보일 수 있다.

위의 분석으로부터 식 (12)의 목적 함수가 최댓값을 가지기 위해선 $p_{m_u} = \bar{p}_u$ 또는 $p_{s_b} = \bar{p}_{s_b}$ 를 만족해야 함을 확인할 수 있다. 이는 매크로 기지국과 소형 셀 사용자 중 하나의 전송 노드만이 최대 송신 허용 전력으로 신호를 전송해야 함을 의미한다.

해가 존재하는 가시적인 범위는 기지국 위치와 사용자의 위치에 따라 달라지지만 그림 7과 같이 세 가지 경우로 구분할 수 있다. 최적의 전력 할당 방식을 $P^* = (p_{m_u}^*, p_{s_b}^*)$ 라 하면, 각 경우에 대하여 P^* 는 P_1 또는 P_2 중 하나를 따른다.

Case (a):

$$P_1 = \left(\frac{-\gamma_{s_{dl}}^t (\bar{p}_{m_u} g_{m_u s_u} + N_0)}{p_{m_u}}, \frac{\bar{p}_{m_u} g_{m_u p_b} - \gamma_{m_{dl}}^t N_0}{\gamma_{m_{dl}}^t g_{s_b m_b}} \right), P_2 = \left(\frac{-\gamma_{s_{dl}}^t (\bar{p}_{m_u} g_{m_u s_u} + N_0)}{p_{m_u}}, \frac{\bar{p}_{m_u} g_{m_u p_b} - \gamma_{m_{dl}}^t N_0}{\gamma_{m_{dl}}^t g_{s_b m_b}} \right)$$

Case (b):

$$P_1 = \left(\frac{-\gamma_{s_{dl}}^t (\bar{p}_{m_u} g_{m_u s_u} + N_0)}{p_{m_u}}, \frac{\bar{p}_{m_u} g_{m_u s_u} + N_0}{g_{s_b s_u}} \right), P_2 = \left(\frac{\gamma_{m_{dl}}^t (\bar{p}_{m_u} g_{s_b m_b} + N_0)}{g_{m_u m_b}}, \frac{-}{p_{s_b}} \right)$$

Case (c):

$$P_1 = \left(\frac{p_{s_b} g_{s_b s_u} - \gamma_{s_{dl}}^t N_0}{\gamma_{s_{dl}}^t g_{m_u s_u}}, p_{s_b} \right), P_2 = \left(\frac{\gamma_{m_{dl}}^t (\bar{p}_{m_u} g_{s_b m_b} + N_0)}{g_{m_u m_b}}, \frac{-}{p_{s_b}} \right)$$

Case (a)는 매크로 셀 사용자가, Case (c)는 소형 기지국이, Case (b)는 매크로 셀 사용자와 소형 기지국 중 하나의 전송 노드만이 최대 송신 허용 전력으로 신호를 전송해야 총 전송률을 최대화 할 수 있음을 의미한다. 각 경우에 대하여 최적 전력 할당 방식은 아래의 수식을 따른다.

$$P^* = \arg \max_{P_i} R_1(P_i), i \in \{1, 2\}$$

IV. 매크로 셀이 하향링크로 동작하고 소형 셀이 상향링크로 동작하는 환경에서의 전력 할당 방식

본 장에서는 매크로 셀이 하향 링크로 동작하고 소형 셀이 상향 링크로 동작하는 이중 네트워크의 총 전송률을 최대화하는 전력 할당 방식을 분석한다. 매크로 기지국이 하향 링크로 동작하고 소형 기지국이 상향 링크로 동작할 때 매크로 셀 사용자의 하향 링크 신호에 대한 수신 SINR은 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_{m_{dl}} = \frac{p_{m_b} g_{m_b m_u}}{p_{s_u} g_{s_u m_u} + N_0} \geq \gamma_{m_{dl}}^t \quad (21)$$

식 (21)에서 p_{m_b} 와 p_{s_u} 는 매크로 셀 기지국과 소형 셀 사용자의 송신 전력을 의미한다. $\gamma_{m_{dl}}^t$ 은 매크로 셀 하향 링크의 최소 성능을 만족시키는 Target SINR이다^[12,13].

매크로 셀이 하향 링크로 동작할 때 상향 링크로 동작하는 소형 셀에서 소형 기지국이 수신하는 상향 링크 신호의 수신 SINR은 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_{s_{ul}} = \frac{p_{s_u} g_{s_u s_b}}{p_{m_b} g_{m_b s_b} + N_0} \geq \gamma_{s_{ul}}^t \quad (22)$$

식 (22)에서 $\gamma_{s_{ul}}^t$ 은 소형 셀 하향 링크의 최소 성능을 만족시키는 Target SINR이다^[12,13].

식 (21)과 (22)를 이용하면 매크로 셀이 하향 링크로 동작하고 소형 셀이 상향 링크로 동작하는 상황에서의 총 전송률은 다음과 같이 주어진다.

$$R_2 = \underbrace{W \log_2(1 + \gamma_{m_{dl}})}_{\text{downlink macro cell}} + \underbrace{W \log_2(1 + \gamma_{s_{ul}})}_{\text{uplink small cell}} \quad (23)$$

식 (21)–(23)을 이용하여 매크로 셀이 하향 링크로 동작하고 소형 셀이 상향 링크로 동작하는 환경에서 총 전송률을 최대화하는 매크로 기지국 전력과 소형 셀 사용자의 전력을 구하는 문제는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(p_{m_b}^*, p_{s_u}^*) = \arg \max_{p_{m_b}, p_{s_u}} R_2(p_{m_b}, p_{s_u}) \quad (24)$$

$$\text{s.t. } \gamma_{m_{dl}} \geq \gamma_{m_{dl}}^t, \gamma_{s_{ul}} \geq \gamma_{s_{ul}}^t \quad (25)$$

$$0 \leq p_{m_b} \leq \overline{p_{m_b}}, 0 \leq p_{s_u} \leq \overline{p_u} \quad (26)$$

식 (26)에서 $\overline{p_{m_b}}$ 는 매크로 기지국의 최대 송신 허용 전력을 의미한다.

4.1 최적 해를 가지기 위한 조건

3장에서 구해진 조건을 이용하여, 최적화 문제 (24)에서 제약 조건 (25) 및 (26)을 만족시키는 가시적 영역에 대한 조건은 다음과 같다.

$$0 \leq \frac{\gamma_{m_{di}}^t N_0}{g_{m_b m_u}} \left(\frac{1 + \frac{g_{s_u m_u} \gamma_{s_{ud}}^t}{g_{s_u s_b}}}{1 - \frac{g_{s_u m_u} g_{m_b s_b}}{g_{m_b m_u} g_{s_u s_b}} \gamma_{m_{di}}^t \gamma_{s_{ud}}^t} \right) \leq \overline{p_{m_b}} \quad (27)$$

$$0 \leq \frac{\gamma_{s_{ud}}^t N_0}{g_{s_u s_b}} \left(\frac{1 + \frac{g_{m_b s_b}}{g_{m_b m_u}} \gamma_{m_{di}}^t}{1 - \frac{g_{s_u m_u} g_{m_b s_b}}{g_{m_b m_u} g_{s_u s_b}} \gamma_{m_{di}}^t \gamma_{s_{ud}}^t} \right) \leq \overline{p_u} \quad (28)$$

조건식 (27)과 (28)를 만족할 때 총 전송률을 최대화하는 전력 할당 방식은 3장에서와 같은 방식으로 분석할 수 있다.

4.2 총 전송률을 최대화하는 전력 할당 방식

식 (24)의 최적화 문제에서 목적 함수에 존재하는 log 함수는 단조 증가 함수이므로 식 (24)을 다시 쓰면 아래와 같은 문제로 재구성할 수 있다^[14].

$$(p_{m_b}^*, p_{s_u}^*) = \arg \max_{p_{m_b}, p_{s_u}} (1 + \gamma_{m_{di}})(1 + \gamma_{s_{ud}}) \quad (29)$$

3장에서의 동일한 원리를 적용하면 $p_{m_b} = \overline{p_{m_b}}$ 또는 $p_{s_u} = \overline{p_u}$ 일 때 (29)의 목적 함수를 최대화시킬 수 있다. 이 때 총 전송률을 최대화 하는 전력 할당 방식은 3-2절에서 얻은 결과와 동일한 방식으로 표현될 수 있다.

V. 실험 결과

본 장에서는 비동기식 TDD 기반의 이중 네트워크 환경에서 제안하는 전력 할당 방식을 사용한 전송 방식과 모든 전송 노드들이 최대 송신 허용 전력으로 신

호를 전송하는 전송 방식의 성능을 실험을 통해 비교한다. 매크로 셀 사용자는 매크로 기지국으로부터 10~100m에, 소형 셀 사용자는 소형 기지국으로부터 5~30m에 랜덤하게 위치해 있다고 가정한다. 단말은 매크로 기지국과 소형 기지국 중 자신으로 오는 신호의 세기가 큰 기지국으로 연결된다. 실험에 사용된 다른 파라미터들은 표 1에 정리되어 있다.

그림 8과 9는 소형 셀이 하향 링크로 동작하고 매크로 셀이 상향 링크로 동작하는 환경에서 매크로 기지국과 소형 기지국의 거리에 따른 총 전송률과 Outage 확률을 보여준다. 그림 9에서 검은색 점선은 가시적인 영역이 존재하지 않을 확률을 의미한다. 그림 8에 나타난 바와 같이 최대 송신 허용 전력을 사용한 전송 방식 보다 제안한 전력 할당 방식을 사용한 전송 방식이 총 전송률 관점에서 더 높은 성능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 9를 통하여 제안된 전력 할당 방식을 사용한 전송 방식을 통해 수신 기지국 또는 사용자의 Outage 확률을 줄일 수 있음을 확인할 수 있다. 그림 8과 9에서 기지국 간의 거리가 증

표 1. 실험 파라미터
Table 1. Simulation Parameters

Parameter	Value
System Bandwidth	10 MHz
Max. TX power of BS	Macro BS: 46 dBm Small BS: 30 dBm
Max. TX power of user	23 dBm
Path loss exponent	4
Noise	-174 dBm/Hz
Target SINR	0 dB

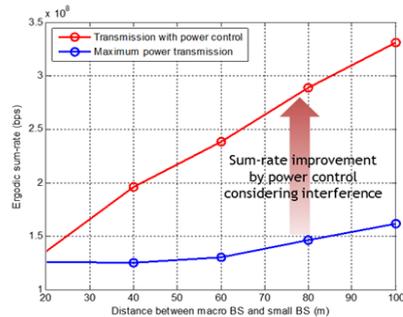


그림 8. 소형 셀이 하향 링크로 동작하고 매크로 셀이 상향 링크로 동작할 때 기지국 간 거리에 따른 Ergodic 총 전송률. Fig. 8. Ergodic sum-rate as a function of the distance between macro and small cell base station when the small cell operates in downlink mode and the macro cell operates in uplink mode.

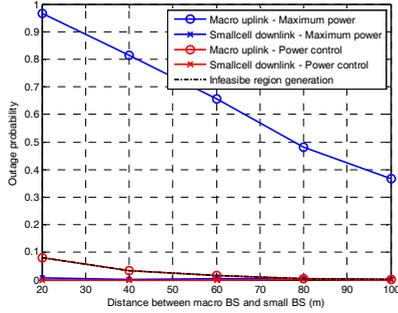


그림 9. 소형 셀이 하향 링크로 동작하고 매크로 셀이 상향 링크로 동작할 때 기지국 간 거리에 따른 outage 성능.
Fig. 9. Outage performance as a function of the distance between macro and small cell base station when the small cell operates in downlink mode and the macro cell operates in uplink mode.

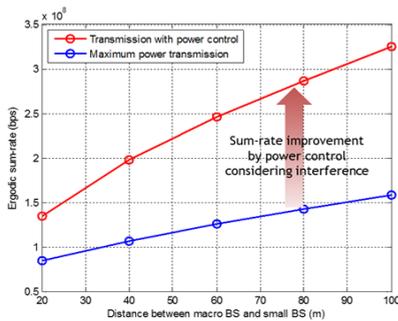


그림 10. 매크로 셀이 하향 링크로 동작하고 소형 셀이 상향 링크로 동작할 때 기지국 간 거리에 따른 Ergodic 총 전송률.
Fig. 10. Ergodic sum-rate as a function of the distance between macro and small cell base station when the macro cell operates in downlink mode and the small cell operates in uplink mode.

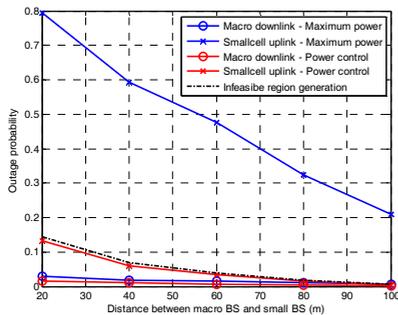


그림 11. 매크로 셀이 하향 링크로 동작하고 소형 셀이 상향 링크로 동작할 때 기지국 간 거리에 따른 outage 성능.
Fig. 11. Outage performance as a function of the distance between macro and small cell base station when the macro cell operates in downlink mode and the small cell operates in uplink mode.

가함에 따라 총 전송률이 증가함과 동시에 Outage 확률이 감소한다. 이는 기지국 간의 거리가 증가함에 따라 기지국 간 그리고 사용자 간 간섭의 영향이 줄어들기 때문이다.

그림 10과 11은 소형 셀이 하향 링크로 동작하고 매크로 셀이 상향 링크로 동작하는 환경에서 매크로 기지국과 소형 기지국의 거리에 따른 총 전송률과 Outage 확률을 보여준다. 그림 8과 9와 마찬가지로 제안하는 전력 할당 방식을 사용한 전송 방식을 통해 총 전송률을 높이며 Outage 성능을 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

본 논문에서는 비동기식 TDD 기반의 이중 네트워크에서 총 전송률을 최대화 하는 전력 할당 방식을 분석하였다. 최적화 문제를 통하여 총 전송률을 최대화 하는 전력 할당 방식이 존재하는 조건과 제약 조건을 만족하면서 총 전송률을 최대화 하는 전력 할당 방식을 분석하였다. 본 논문에서는 주어진 Target 성능을 만족시키면서 총 전송률을 최대화하기 위해서는 매크로 셀에서의 전송 노드와 소형 셀에서의 전송 노드 중 반드시 하나의 전송 노드가 최대 송신 허용 전력으로 신호를 전송해야 함을 증명하였다. 실험 결과를 통하여 제안한 전력 할당 방식을 사용한 전송 방식이 모든 전송 노드들이 최대 송신 허용 전력으로 전송하는 전송 방식보다 더 나은 성능을 보임을 확인하였다.

추후 본 논문에서의 분석은 하나의 매크로 셀 안에 여러 개의 소형 셀이 존재하는 환경으로 확장될 필요가 있다. 구체적으로 여러 개의 소형 셀이 일부는 하향 링크로 동작하고 일부는 상향 링크로 동작하는 환경에서의 전력 할당 방식에 관한 연구가 필요하다. 추가적으로 다수의 이중 네트워크가 공존하는 환경에서 각 네트워크가 서로 다른 트래픽 요구량을 가질 때의 전력 할당 방식에 관한 연구 또한 필요하다.

References

- [1] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, and A. Gather, "Femtocell networks: a survey," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 9, pp. 59-67, Sept. 2008.
- [2] RP-121764, *New study item proposal for small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN - physical layer aspects*, Huawei, HiSilicon,

CATR, Ran#58.

[3] J. G. Andrews, "Seven ways that HetNets are a cellular paradigm shift," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 3, pp. 136-144, Mar. 2013.

[4] H. Lee, "Optimal cell selection scheme for load balancing in heterogeneous radio access networks," *J. KICS*, vol. 37B, no. 12, pp. 1102-1112, Dec. 2012.

[5] Z. Shen, *et al.*, "Dynamic uplink-downlink configuration and interference management in TD-LTE," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 11, pp. 51-59, Nov. 2012.

[6] 3GPP TR 36.828 V11.0.0, *Further enhancements to LTE time division duplex (TDD) for downlink-uplink (DL-UL) interference management and traffic adaptation* (Release 11), Jun. 2012.

[7] Y. Lin, *et al.*, "QoS aware dynamic uplink-downlink reconfiguration algorithm in TD-LTE HetNet," in *Proc. IEEE Global Commun. Conf. Workshops (GC Wkshps 2013)*, pp. 708-713, Atlanta, USA, Dec. 2013.

[8] D. Dowhuszko, *et al.*, "A decentralized cooperative uplink/downlink adaptation scheme for TDD small cell networks" in *Personal Indoor and Mobile Radio Commun. (PIMRC 2013)*, pp. 1682-1687, London, UK, Sept. 2013.

[9] H. Jo, C. Mun, J. Moon, and J. Yook, "Interference mitigation using uplink power control for two-tier femtocell networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 8, no. 10, pp. 4906-4910, Oct. 2009.

[10] K. Son, *et al.*, "REFIM: A practical interference management in heterogeneous wireless access networks," *IEEE J. Sel. Area Commun.*, vol. 29, no. 6, pp. 1260-1272, Jun. 2011.

[11] H. S. Dhillon, T. D. Nolan, and J. G. Andrews, "Coverage probability of uplink cellular networks," in *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (Globecom 2012)*, pp. 2203-2208, Anaheim, USA, Dec. 2012.

[12] M. Jung and S. Choi, "Analysis of energy efficiency for device-to-device (D2D)

communication underlying cellular networks," *J. KICS*, vol. 38A, no. 7, pp. 571-579, Jul. 2013.

[13] M. Jung and S. Choi, "Optimal number of base station antennas and users in MF based multiuser massive MIMO systems," *J. KICS*, vol. 38A, no. 8, pp. 724-732, Aug. 2013.

[14] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge University Press, 2004.

[15] C-H. Yu, *et al.*, "Resource sharing optimization for device-to-device communication underlying cellular networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 10, no. 8, pp. 2752-2763, Aug. 2011.

민 경 식 (Kyungsik Min)



2011년 8월 : 연세대학교 전기 전자공학과 졸업
 2011년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석박사 통합 과정
 <관심분야> Massive MIMO, Small cell

김 태 형 (Taehyoung Kim)



2010년 2월 : 연세대학교 전기 전자공학과 졸업
 2010년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석박사 통합 과정
 <관심분야> Massive MIMO, Small cell

박 상 준 (Sangjoon Park)

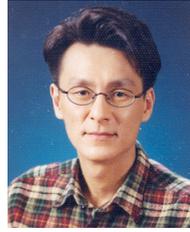


2004년 8월 : 연세대학교 전기
전자공학과 졸업
2006년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 석사
2011년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 박사
2011년 8월~2014년 2월 : LG
전자 선임연구원

2014년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 BEST
정보기술사업단 연구교수

<관심분야> Equalization, Error Control Coding,
Hybrid ARQ, MIMO Systems, ITS Systems,
Cryptography

최 수 용 (Sooyong Choi)



1995년 8월 : 연세대학교 전자공
학과 졸업
1997년 8월 : 연세대학교 전자공
학과 석사
2001년 8월 : 연세대학교 전자공
학과 박사
2002년 3월~2004년 8월 : University

of California, San Diego, Postgraduate Researcher
2004년 9월~2005년 7월 : Oklahoma State University,
Research Assistant Professor and Researcher

2005년 9월~2011년 8월 : 연세대학교 전기전자공학과
조교수

2011년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 부교수
<관심분야> Massive MIMO, Interference manage-
ment/coordination/cancellation/mitigation,
Detection and estimation, Iterative receivers, 무선
통신 시스템, Cognitive radios