

OFDMA 초소형 기지국의 인접셀 간섭을 최소화하기 위한 하향링크 전력 할당 기법

정회원 정 현 덕*, 종신회원 이 재 용*

Downlink Power Allocation of the OFDMA Femtocell for Inter-cell Interference Mitigation

Hyunduk Jung* *Regular Member*, Jaiyong Lee* *Lifelong Member*

요 약

OFDMA 초소형 기지국은 기존의 대형 기지국을 대신하여 실내에서의 고속 데이터 통신을 지원하기 위해 개발된 기술이지만 아직 실용화를 위해 해결해야할 여러 문제를 가지고 있다. 특히 초소형 기지국이 대형 기지국과 같은 주파수 대역을 사용할 경우 발생하는 셀간 간섭 문제는 시스템의 성능을 저하시키는 주요 원인이 된다. 초소형 기지국에 대한 사용 권한이 없는 사용자는 초소형 기지국의 서비스 영역 내에서도 대형 기지국과 통신을 수행하여야 하며 이때 하향링크에서 초소형 기지국의 전송 신호는 대형 기지국 사용자에게 간섭으로 작용하게 된다. 따라서 초소형 기지국의 전송 전력을 최소화하여 대형 기지국 사용자에게 미치는 간섭을 제어할 필요가 있다. 본 논문에서는 초소형 기지국의 전력 할당을 위한 margin adaptive 문제를 정의하고 이를 해결하기 위한 휴리스틱 기법을 제안한다. 또한 모의실험을 통해 제안한 기법의 성능을 검증한다.

Key Words : Femtocell, OFDMA, Power Allocation, Water Filling

ABSTRACT

OFDMA femtocell becomes an effective solution to support indoor high data rate services instead of the macrocell systems. Although the advantage of the femtocell, the co-channel interference between the femtocell and the macrocell is the most significant problem that reduces the system performance. Macrocell users who have no permission to access the femtocell suffer from interference of the downlink transmission of femtocell. Therefore, the femtocell should use transmission power as small as possible to reduce interference to macrocell users. In this paper, we define the margin adaptive power allocation problem for the femtocell and propose a heuristic power allocation algorithm to solve the problem. Simulation results show the performance of the proposed algorithm.

1. 서 론

이동 통신망을 이용한 데이터 서비스에 대한 사용자의 요구가 커짐에 따라 기존의 대형 기지국으로 구성된 이동 통신망의 부하가 증대되고 있다. 최

근의 연구에 따르면 특히 실내에서의 데이터 통신의 비율이 증가하고 있으며 음성 통화의 50%, 데이터 서비스의 70%가 실내에서 발생하고 있다. 하지만 대형 기지국을 이용하여 이러한 실내 통신의 QoS를 보장하는 것은 효율과 비용 측면에서 통신

※ 본 연구는 서울시 산학연 협력사업(WR080951)의 연구결과로 수행되었습니다.

* 연세대학교 전기전자공학과 유비쿼터스 네트워크 연구실(psychblue@yonsei.ac.kr)

논문번호 : KICS2010-03-117, 접수일자 : 2010년 3월 24일, 최종논문접수일자 : 2010년 7월 28일

사업자에게 큰 부담으로 작용한다. 따라서 실내에 위치한 사용자에게 보다 효율적으로 데이터 서비스를 제공하기 위한 기술이 요구되고 있다. [1]

초소형 기지국은 대형 기지국을 대신해서 실내 사용자들에게 이동 통신 서비스를 제공하기 위한 기술로 이동 통신망의 서비스 영역을 확대하고 대형 기지국에 대한 부하를 나누어 가짐으로써 전체 이동 통신망의 캐퍼시티를 향상시킨다. 초소형 기지국은 무선랜 Access Point (AP)와 같이 작은 서비스 영역을 가지는 기지국으로써 기본적으로 사용자에게 의해서 실내에 설치되는 시스템이기 때문에 auto-configuration과 self-organizing 기술을 요구한다. 초소형 기지국의 물리 계층은 대형 기지국과 동일하기 때문에 사용자는 무선랜과는 달리 대형 기지국을 통해 이용하던 서비스를 동일한 단말로 끊어짐 없이 초소형 기지국을 통해 제공 받을 수 있다. 또한 초소형 기지국은 이동 통신망의 코어 시스템과의 연결을 위해서 실내에서 사용자가 이용하던 xDSL이나 FTTH와 같은 초고속 인터넷망을 사용한다. [2]

초소형 기지국을 설치함에 있어서 중요한 문제 중 하나는 대형 기지국 및 인접 초소형 기지국과의 간섭을 제어하는 것이다. 이동 통신망 사업자는 초소형 기지국을 위한 주파수 대역을 별도로 할당할 수도 있으며, 대형 기지국과 초소형 기지국이 같은 주파수 대역을 공유하도록 설정할 수도 있다. 별도의 대역을 할당하여 초소형 기지국을 운영하는 것이 관리 측면에서는 효율적일 수 있지만, 주파수 대역을 나눔으로 인해 발생하는 spectral efficiency의 감소를 고려하면 대형 기지국과의 주파수 공유를 통해서 주파수 재사용에 의한 이득을 얻는 것이 더 효율적이다. 하지만 대형 기지국과의 주파수 공유는 초소형 기지국과 대형 기지국 사이에서 주파수 간섭이 발생한다는 것을 의미하기 때문에 이를 제어하기 위한 방법이 요구된다.

주파수 간섭 문제는 초소형 기지국에 가까이 접근한 대형 기지국 사용자의 성능을 크게 저하시킨다. 초소형 기지국은 특정 사용자에게 의해서 설치되기 때문에 허가된 몇몇 사용자만이 접속하여 서비스를 받을 수 있도록 제한될 수 있다. 이와 같은 경우 초소형 기지국에 대한 사용 권한이 없는 사용자는 초소형 기지국이 가까이 있음에도 불구하고 대형 기지국과 통신을 수행하여야 한다. 이러한 시나리오에서 주파수 간섭 문제는 그림 1과 같이 하향링크와 상향링크에서 다르게 발생한다. 하향링크의 경우 초소형 기지국의 전송 신호가 대형 기지국

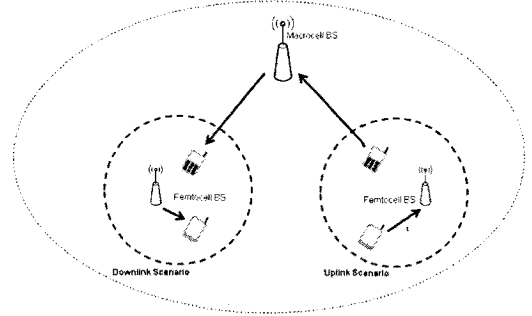


그림 1. 초소형 기지국의 주파수 간섭 시나리오

사용자에게 간섭으로 작용하며, 상향링크의 경우에는 대형 기지국 사용자의 전송 신호가 초소형 기지국에게 간섭으로 작용한다. [3],[4]

본 논문에서는 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)를 사용하는 초소형 기지국의 간섭을 최소화하기 위한 하향링크 전력 할당 기법을 제안한다. OFDMA 초소형 기지국은 차세대 이동 통신망인 3GPP Long Term Evolution (LTE)이나 mobile WiMAX와 같이 OFDMA를 전송 방법으로 사용하는 시스템을 위해서 개발되고 있다. OFDMA 시스템의 자원 관리를 위한 연구는 크게 시스템의 전체 전송률을 최대화하는 것을 목적으로 하는 rate adaptive (RA) scheme과 기지국의 전송 전력을 최소화하는 것을 목적으로 하는 margin adaptive (MA) scheme으로 나뉘어진다 [5]. 앞에서 언급한 바와 같이 초소형 기지국은 주변의 대형 기지국 사용자 및 다른 초소형 기지국에 대한 주파수 간섭을 최소화하여야하므로 최소한의 전력만을 이용하여 사용자의 서비스 요구 사항을 만족시킬 수 있어야 한다. 따라서 초소형 기지국의 자원 관리는 MA 관점에서 연구되어야 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 OFDMA 초소형 기지국을 위한 시스템 모델 및 MA 관점의 OFDMA 전력 할당 문제를 정의하고 III장에서는 이를 풀기 위한 전력 할당 기법을 제안한다. IV장에서는 모의 실험을 통해 제안된 기법의 성능을 검증하고 V장에서 결론을 맺도록 한다.

II. 시스템 모델 및 전력 할당 문제 정의

2.1 시스템 모델

본 논문은 주파수 재사용도가 1인 OFDMA 시스템을 고려한다. 집합 M 과 F 는 각각 시스템에 위치

하고 있는 대형 기지국과 초소형 기지국의 집합을 나타내며, 초소형 기지국은 대형 기지국의 서비스 영역 내에 균일하게 분포한다고 가정한다.

주파수 자원은 N 개의 OFDMA 부채널로 나누어지며 하나의 부채널은 여러 OFDMA 부전송과의 집합으로 구성된다. OFDMA의 특성상 알맞은 cyclic prefix의 사용으로 다중경로에 의한 inter-symbol interference (ISI)는 발생하지 않는다고 가정한다.

$a_{fk}^{(n)}$ 은 부채널 할당 지표를 의미하며 초소형 기지국 f 의 부채널 n 이 사용자 k 에게 할당되었을 경우, $a_{fk}^{(n)}=1$ 이 되며 할당되지 않았을 경우에는 $a_{fk}^{(n)}=0$ 이 된다. 하나의 부채널을 둘 이상의 사용자가 공유하지 못하도록 할당할 경우 $\sum_k a_{fk}^{(n)} \leq 1, \forall n$ 이 된다. 각 기지국의 부채널에는 서로 다른 전력이 할당되며, $p_i^{(n)}$ 은 기지국 i 의 부채널 n 에 할당된 전력을 의미하고 집합 $P_i = (p_i^{(1)}, p_i^{(2)}, \dots, p_i^{(M)})$ 으로 정의한다.

기지국 i 의 부채널 n 과 사용자 k 사이의 링크 이득은 $g_{ik}^{(n)}$ 으로 정의하고 거리에 따른 감쇠와 lognormal fading으로 구성된다. 이 때, 초소형 기지국 f 의 부채널 n 에 대한 사용자 k 의 하향링크 signal to interference plus noise ratio (SINR)는 다음과 같다.

$$SINR_{fk}^{(n)} = \frac{g_{fk}^{(n)} a_{fk}^{(n)} p_f^{(n)}}{I_{fk}^{(n)} + N_0 W^{(n)}} \quad (1)$$

여기에서 $W^{(n)}$ 은 부채널 n 의 대역폭을 나타내며, N_0 는 white Gaussian noise의 power spectral density를 의미한다. 또한 $I_{fk}^{(n)}$ 는 다른 기지국들로부터 발생하는 기지국간 간섭을 나타낸다. 초소형 기지국 f 의 사용자 k 가 부채널 n 을 통해 겪는 기지국간 간섭은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$I_{fk}^{(n)} = \sum_{m \in M} g_{mk}^{(n)} p_m^{(n)} + \sum_{\substack{f' \in \mathcal{F} \subseteq U_f \\ f' \neq f}} g_{f'k}^{(n)} a_{f'k}^{(n)} p_{f'}^{(n)} \quad (2)$$

즉, 기지국간 간섭은 주변의 대형 기지국 및 초소형 기지국의 전송 신호의 합으로 나타낼 수 있으며, 여기에서 U_i 는 기지국 i 의 사용자 집합이다.

초소형 기지국 사용자의 QoS를 보장하기 위해서 사용자 k 는 요구 전송률, R_k 를 가진다. 또한 $r_{fk}^{(n)}$ 은

사용자 k 가 초소형 기지국 f 의 부채널 n 을 통해서 얻을 수 있는 예상 전송률을 의미하며 이는 일반적으로 Shannon capacity를 이용하여 다음과 같이 정의한다.

$$r_{fk}^{(n)} = W^{(n)} \ln(1 + SINR_{fk}^{(n)}) \quad (3)$$

2.2 하향링크 전력 할당 문제

초소형 기지국의 하향링크 전송은 기지국간 간섭을 최소화하기 위해서 가능한 적은 전력으로 사용자의 요구 전송률을 만족시켜야 한다. 따라서 초소형 기지국의 하향링크 전력 할당 문제의 목적 함수는 기지국의 총 전송 전력이 되며 사용자의 요구 전송률을 제약 조건으로 가진다. 이와 같은 문제는 다음과 같은 MA 최적화 문제로 정의할 수 있다.

$$\min \sum_{k \in U_f} \sum_{n=1}^N a_{fk}^{(n)} p_f^{(n)} \quad (4)$$

이 때, 제약 조건은 다음과 같다.

$$\sum_{n=1}^N a_{fk}^{(n)} r_{fk}^{(n)} = R_k, \quad \forall k \quad (5)$$

$$\sum_{k \in U_f} a_{fk}^{(n)} p_f^{(n)} \geq 0, \quad \forall n \quad (6)$$

$$\sum_{k \in U_f} a_{fk}^{(n)} \leq 1, \quad \forall n \quad (7)$$

$$a_{fk}^{(n)} \in \{0, 1\} \quad (8)$$

조건 (5)는 모든 초소형 기지국 사용자의 요구 전송률을 만족시키며, 조건 (6)은 모든 부채널에 할당되는 전력이 음수값을 갖지 못하도록 한다. 또한 조건 (7)과 (8)에 의해서 하나의 부채널은 오직 하나의 사용자만 이용할 수 있도록 제한된다.

위 조건들을 만족시키는 P_f 중 그 합이 가장 작은 것을 찾는 것이 전력 할당 문제의 목적이다. 하지만 위 문제는 $a_{fk}^{(n)}$ 의 조합에 따라서 P_f 가 결정되며, N 이 커짐에 따라 $a_{fk}^{(n)}$ 이 이룰 수 있는 조합의 수 즉, 각 사용자에게 할당되는 부채널의 조합이 무수히 많아지게 된다. 이러한 최적화 문제는 NP-hard

combinatorial 문제로써 일반적인 방법으로는 답을 얻기 힘들다 [6]. 이를 해결하기 위해서 많은 연구들이 진행되고 있지만 이러한 연구들 역시 반복적인 연산을 통해서 사용자당 부채널과 채널당 전력의 세기를 결정하기 때문에 자원 할당에 걸리는 시간이 지연되는 원인이 된다 [7]-[9]. 따라서 본 논문에서는 보다 빠른 자원 할당을 위해서 위 문제를 부채널 할당과 채널당 전력 할당 문제로 나누어서 해결하는 접근 방식을 적용한다. 또한 일반적으로 초소형 기지국은 사용할 수 있는 부채널 수에 비해 기지국을 이용하는 사용자의 수가 적기 때문에 하나의 사용자가 이용할 수 있는 부채널의 수가 대형 기지국보다 많고 채널 할당 기법이 성능에 미치는 영향이 전력 할당 기법보다 작다. 따라서 본 논문은 부채널 할당 기법보다는 채널당 전력 할당 기법에 초점을 두고 연구를 진행하였다.

각 사용자 k 가 이용할 부채널이 결정되면 위 문제는 각 사용자마다 주어진 부채널을 이용하여 사용자의 요구 전송률을 만족시킬 수 있는 전력 할당 방법을 결정하는 문제로 단순화 된다. 즉, 다음과 같은 최적화 문제로 전환할 수 있다.

$$\min \sum_{n=1}^N a_{fk}^{(n)} p_f^{(n)} \quad (9)$$

이 때, 제약 조건은 다음과 같다.

$$\sum_{n=1}^N a_{fk}^{(n)} r_{fk}^{(n)} = R_k \quad (10)$$

$$\sum_{k \in U_f} a_{fk}^{(n)} p_f^{(n)} \geq 0, \quad \forall n \quad (11)$$

표 1. Ideal Water-filling 알고리즘

initialize $\lambda = 0$
do
$p_f^{(n)} = -\lambda W^{(n)} - \frac{I_{fk}^{(n)} + N_0 W^{(n)}}{g_{fk}^{(n)}}$
Decreasing λ
if $p_f^{(n)} < 0$
$p_f^{(n)} = 0$
while $\left(\sum_{k=1}^N a_{fk}^{(n)} r_{fk}^{(n)} < R_k \right)$

초소형 기지국은 위 문제를 각 사용자 k 에 대해 독립적으로 품으로써 부채널에 대한 전력 할당을 수행할 수 있다. 위 문제를 최적화 시키는 P_f 는 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 조건을 통해서 구할 수 있다. 위 문제의 KKT 조건은 다음과 같다.

$$a_{fk}^{(n)} \left\{ 1 + \frac{\lambda W^{(n)} g_{fk}^{(n)}}{g_{fk}^{(n)} p_f^{(n)} + I_{fk}^{(n)} + N_0 W^{(n)}} - \mu^{(n)} \right\} = 0 \quad (12)$$

$$\mu^{(n)} \sum_{k \in U_f} a_{fk}^{(n)} p_f^{(n)} = 0, \quad \forall n \quad (13)$$

$$\mu^{(n)} \geq 0, \quad \forall n \quad (14)$$

이 때, λ 는 라그랑지 멀티플라이어이며 $\mu^{(n)}$ 은 KKT 멀티플라이어를 의미한다. 각 사용자 k 마다 $a_{fk}^{(n)}$ 의 값이 1인 부채널에 대해서 식 (12)를 전력 $p_f^{(n)}$ 에 대해 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$p_f^{(n)} = \frac{\lambda}{\mu^{(n)} - 1} W^{(n)} - \frac{I_{fk}^{(n)} + N_0 W^{(n)}}{g_{fk}^{(n)}} \quad (15)$$

여기에서 모든 $\mu^{(n)}$ 이 0이라고 가정하면 식 (15)는 다음과 같은 일반적인 ideal water-filling 시스템을 나타낸다 [10].

$$p_f^{(n)} = -\lambda W^{(n)} - \frac{I_{fk}^{(n)} + N_0 W^{(n)}}{g_{fk}^{(n)}} \quad (16)$$

따라서 조건 (10)을 만족할 때까지 λ 를 감소시키면서 $p_f^{(n)}$ 를 계산하는 반복적인 방법을 통해서 전력 할당을 수행할 수 있다. 이 때 $p_f^{(n)}$ 가 음수값을 갖는 부채널의 경우는 $\mu^{(n)}$ 가 0이 아닌 경우이므로 해당 $p_f^{(n)}$ 를 0으로 설정한다. 표 1은 ideal water-filling의 과정을 자세히 나타낸 것이다.

Ideal water-filling은 OFDMA 전력 할당 문제에 대한 최적화된 해답을 제공하는 것으로 알려져 있지만 위와 같이 반복적인 과정을 통해서 각 부채널의 전력을 결정하기 때문에 채널의 상태에 따라 전력 할당에 소모되는 시간이 일정하지 않으며 실시간 트래픽이 많은 부분을 차지하는 멀티미디어 서

비스에서는 사용자의 QoS를 만족시키지 못하는 원인이 될 수 있다. 따라서 ideal water-filling과 동일하거나 혹은 근접한 성능을 갖으면서도 부채널의 전력을 결정하는 시간을 줄일 수 있는 기법이 요구된다.

III. 초소형 기지국의 효율적 전력 할당 기법

제안하는 전력 할당 기법은 각 사용자에게 배정된 부채널에 사용자의 요구 전송률을 나누어 할당하고 해당 전송률을 지원하기 위한 전력을 계산하는 방법으로 이루어진다.

식 (3)에 식 (16)을 대입하여 정리하면 초소형 기지국 f 의 사용자 k 가 $a_{fk}^{(n)} = 1$ 인 부채널 n 을 통해서 얻을 수 있는 전송률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_{fk}^{(n)} &= W^{(n)} \ln \left(\frac{\hat{\lambda} g_{fk}^{(n)} W^{(n)}}{I_{fk}^{(n)} + N_0 W^{(n)}} \right) \\ &= W^{(n)} \ln \left(\frac{g_{fk}^{(n)}}{I_{fk}^{(n)} + N_0 W^{(n)}} \right) \quad (17) \\ &\quad + W^{(n)} \ln(\hat{\lambda} W^{(n)}) \end{aligned}$$

여기에서 $\hat{\lambda} = -\lambda$ 이다. 즉, 사용자 k 가 하나의 부채널을 통해서 얻을 수 있는 전송률은 해당 부채널의 채널 상태에 따라 결정되는 부분과 $\hat{\lambda}$ 값에 의해서 결정되는 부분으로 나눌 수 있으며, $\hat{\lambda}$ 값에 의해서 결정되는 부분은 사용자 k 가 사용하는 모든 부채널이 동일하다. 또한 사용자의 요구 전송률을 만족시키기 위해서 부채널의 전송률은 조건 (10)을 만족해야 한다. 따라서 조건 (10)에 식 (17)을 대입하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N a_{fk}^{(n)} r_{fk}^{(n)} &= W^{(n)} \ln(-\lambda W^{(n)}) \sum_{n=1}^N a_{fk}^{(n)} \\ &\quad + W^{(n)} \sum_{n=1}^N a_{fk}^{(n)} \ln \left(\frac{g_{fk}^{(n)}}{I_{fk}^{(n)} + N_0 W^{(n)}} \right) \quad (18) \\ &= R_k \end{aligned}$$

식 (18)에 기초하여 사용자 k 가 사용하는 각 부채널에 목표 전송률을 할당하고 해당 전송률을 만족시키는 전력을 계산할 수 있으며 알고리즘의 자

세한 과정은 표 2와 같다. 우선 사용자 k 가 사용하는 부채널의 전송률 $r_{fk}^{(n)}$ 을 부채널의 채널 상태를 통해 계산한다. 이 때 초소형 기지국은 사용자의 채널 상태를 사용자의 피드백을 통해 완벽하게 알고 있다고 가정한다. 만약 계산된 전송률이 음수값을 갖는 부채널은 전송률을 0으로 설정하고 $a_{fk}^{(n)}$ 을 0으로 변경하여 사용자 k 의 부채널에서 제외시킨다. 부채널의 전송률이 계산되면 사용자 k 의 요구 전송률 R_k 에서 현재 각 부채널 전송률의 합을 뺀 값을 사용자 k 가 사용하는 부채널의 수로 나누고 이 값을 $\overline{r_{fk}^{(n)}}$ 으로 정의한다. 즉, $\overline{r_{fk}^{(n)}}$ 은 식 (17)에서 $\hat{\lambda}$ 값에 의해서 결정되는 전송률의 양을 의미한다. $\overline{r_{fk}^{(n)}}$ 이 계산되면 현재 전송률에 해당 값을 더하여 각 부채널의 전송률을 변경한다. 만약 변경된 전송률 중에 다시 음수값을 갖는 부채널이 발생할 경우 해당 부채널을 제외하고 $\overline{r_{fk}^{(n)}}$ 의 값이 0이 될 때까지 위와 같은 과정을 반복한다. 결과적으로 계산된 전송률을 지원할 수 있는 전력을 계산하면 해당 부채널에 할당해야 하는 전력을 구할 수 있다.

제안하는 전력 할당 기법 역시 ideal water-filling과 같이 반복적인 계산을 통해서 전력을 구하는 방법을 이용하지만 반복 과정에서 한 번 제거된 부채

표 2. 전력 할당 알고리즘

```

initialize

$$r_{fk}^{(n)} = a_{fk}^{(n)} W^{(n)} \left( \frac{g_{fk}^{(n)}}{I_{fk}^{(n)} + N_0 W^{(n)}} \right)$$

do
  if  $r_{fk}^{(n)} < 0$ 
     $r_{fk}^{(n)} = 0, a_{fk}^{(n)} = 0$ 

$$\overline{r_{fk}^{(n)}} = \frac{R_k - \sum_{n=1}^N a_{fk}^{(n)} r_{fk}^{(n)}}{\sum_{n=1}^N a_{fk}^{(n)}}$$


$$r_{fk}^{(n)} = r_{fk}^{(n)} + \overline{r_{fk}^{(n)}}$$

  while  $(\overline{r_{fk}^{(n)}} \neq 0)$ 

$$p_f^{(n)} = \left( e^{r_{fk}^{(n)} / W^{(n)}} - 1 \right) \frac{I_{fk}^{(n)} + N_0 W^{(n)}}{g_{fk}^{(n)}}$$

    
```

널은 다음 계산 과정에서 배제된다. 따라서 사용자가 모든 부채널을 사용하고 각 반복 마다 하나의 채널만을 배제시키는 경우에도 알고리즘의 최대 반복 횟수는 전체 부채널의 수인 N 을 넘지 않는다. 따라서 제안하는 기법은 ideal water-filling보다 빠른 전력 할당을 보장한다. 또한 전력을 할당하는 과정이 ideal water-filling의 조건식에서부터 출발하여 추가적인 가정 없이 이루어졌으므로 이 결과는 ideal water-filling의 결과와 동일하며, 전력 할당 과정에서 제외된 부채널은 ideal water-filling에서 $\mu^{(n)}$ 이 0이 아닌 값을 갖는 부채널과 일치한다. 다음 장에서는 모의 실험을 통해 제안하는 전력 할당 기법의 성능을 분석한다.

IV. 성능 분석

4.1 성능 분석 모델

본 논문에서 제안한 전력 할당 기법의 성능을 분석하기 위해 사용한 OFDMA 시스템 모델은 다음과 같다. 7개의 대형 기지국이 균일하게 분포된 주파수 재사용도 1의 셀룰러 시스템을 고려하였으며, 각 대형 기지국은 750m 반경을 가지는 영역을 서비스한다. 주파수 자원은 50개의 OFDMA 부채널로 나누어지며 하나의 부채널은 1 MHz의 대역폭을 갖는다. 무선 채널은 standard deviation이 8 dB인 frequency selective lognormal fading 채널을 가정하였으며, pathloss를 위한 pathloss exponent (PLE)는 4를 사용하였다.

초소형 기지국은 대형 기지국으로 구성된 시스템 내에 균일하게 분포시켰으며 무선 채널은 대형 기지국과 동일한 모델을 사용하였다. 단, 초소형 기지국 사용자의 경우 기지국과 사용자의 거리가 매우 가깝기 때문에 PLE로 3을 사용하였으며, lognormal fading의 standard deviation은 5 dB를 사용하였다.

각 사용자들이 사용할 부채널을 결정하기 위한 부채널 할당 기법으로는 사용자간의 보다 공평한 주파수 자원 사용을 보장하기 위해서 [11]에서 사용된 fairer subchannel-assignment scheme을 사용하였다. $G_{fk} = \{g_{fk}^{(1)}, g_{fk}^{(2)}, \dots, g_{fk}^{(n)}\}$ 라 하면 부채널 n 을 사용할 사용자 $k^{(n)}$ 는 다음과 같다.

$$k^{(n)} = \arg \max_k \frac{g_{fk}^{(n)}}{E\{G_{fk}\}} \quad (19)$$

즉, 사용자의 평균 부채널 이득과 부채널 n 의 이득과의 비율이 가장 큰 사용자가 부채널 n 을 사용하게 된다. 따라서 평균 부채널 이득이 높은 사용자가 대부분의 부채널을 독점하게 되어 나머지 사용자의 성능을 저하시키는 상황을 방지할 수 있다.

제안하는 기법과의 성능 비교를 위해서 모든 부채널에 일정한 요구 전송률을 할당하는 equal-rate allocation 기법과 함께 모의 실험을 수행하였다. equal-rate allocation 기법은 사용자의 요구 전송률을 사용자에게 배정된 부채널의 수로 나누어서 각 부채널마다 동일한 전송률을 할당하고 해당 전송률을 만족시킬 수 있는 전력을 계산하는 방식이다. 이는 전체 전력을 모든 부채널에 일정하게 나누어 사용하는 plain equal-power allocation (PEPA) 기법 [12]을 MA 문제에 적용한 것으로 가장 단순하고 빠르게 전력을 할당할 수 있다는 장점을 갖는다. 하지만 채널 상태를 고려하지 않기 때문에 ideal water-filling보다 많은 전력을 사용하게 되는 단점이 있다.

4.2 성능 분석 결과

그림 2, 3, 4는 사용자의 요구 전송률이 각각 10, 20, 30 Mbps일 때 초소형 기지국을 사용하는 사용자의 수에 따른 하향링크 사용 전력을 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 제안하는 전력 할당 기법은 앞에서 유도된 것과 같이 ideal water-filling과 동일한 전력 할당량을 보장한다. 초소형 기지국의 사용자가 증가하게 되면 한 사용자가 사용할 수 있는 부채널의 수가 줄어들기 때문에 하나의 부채널이 보장해야하는 전송률이 커지게 되고 그에 따라 초소형 기지국의 전송 전력도 커짐을 알 수 있다.

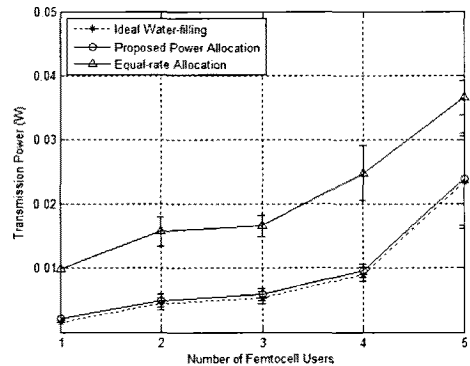


그림 2. 초소형 기지국의 전송 전력 ($R_k=10$ Mbps)

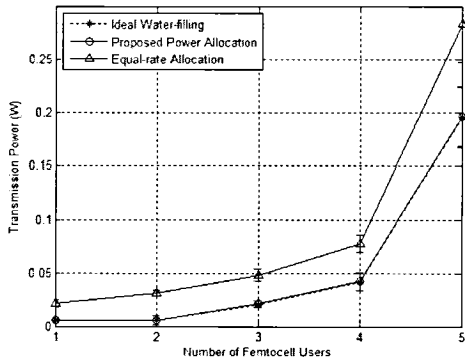


그림 3. 초소형 기지국의 전송 전력 ($R_k=20$ Mbps)

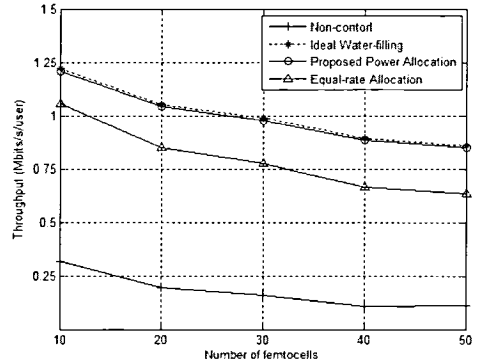


그림 5. 대형 기지국 사용자의 하향링크 평균 전송률

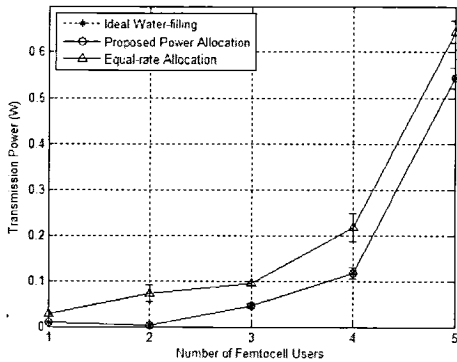


그림 4. 초소형 기지국의 전송 전력 ($R_k=30$ Mbps)

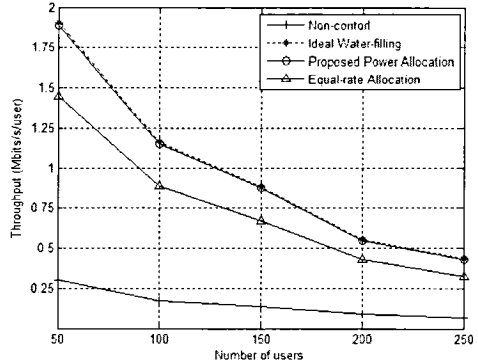


그림 6. 대형 기지국 사용자의 하향링크 평균 전송률

또한 사용자의 요구 전송률이 커질수록 각 부채널 당 전송률을 만족시키기 위한 전력이 증가하므로 초소형 기지국의 전체 사용 전력이 커짐을 확인할 수 있다.

제안하는 전력 할당 기법은 ideal water-filling과 마찬가지로 부채널의 상태에 따라 최적화된 전송률을 낼 수 있는 전력을 할당하기 때문에 부채널의 상태를 고려하지 않는 equal-rate allocation에 비해서 적은양의 전력으로 사용자의 요구 전송률을 만족시킬 수 있다. equal-rate allocation과의 할당 전력 차이는 사용자의 요구 전송률이 커질수록 증가하여 요구 전송률이 30 Mbps이고 초소형 기지국의 사용자가 5일 경우에 100 mW (20 dBm)까지 차이를 보인다.

그림 5와 그림 6은 대형 기지국 사용자의 하향링크 평균 전송률을 각각 대형 기지국 당 초소형 기지국의 수와 대형 기지국 사용자의 수에 따라 나타낸 것이다. 그림 5는 100명의 대형 기지국 사용자

를 분포시키고 각 초소형 기지국마다 3명의 초소형 기지국 사용자가 독립적으로 존재한다고 가정하였을 때의 결과이다. 이 때 대형 기지국은 모든 부채널에 일정한 양의 전력을 할당한다. 결과를 보면 대형 기지국 내에 존재하는 초소형 기지국의 수가 증가할수록 대형 기지국 사용자에게 미치는 간섭이 중첩되기 때문에 사용자의 평균 전송률이 감소함을 알 수 있다. 제안하는 전력 할당 기법을 이용할 경우 ideal water-filling과 같은 양의 전력을 초소형 기지국이 사용하기 때문에 더 많은 전력을 사용하는 equal-rate allocation보다 대형 기지국 사용자에게 미치는 간섭의 양이 줄어들게 된다. 따라서 초소형 기지국의 전력 제어를 하지 않는 non-controlled 결과와 비교하였을 때 얻을 수 있는 전송률의 이득이 equal-rate allocation보다 크다. 그림 6은 대형 기지국 당 초소형 기지국의 수가 20개일 때 대형 기지국 사용자의 평균 전송률을 사용자 수에 따라 나타낸 것이다. 사용자가 증가함에 따라 평균 전송률은

낮아지며 제안하는 전력 할당 기법과 equal-rate allocation의 성능 차이도 적어지지만 여전히 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 OFDMA 초소형 기지국의 하향링크 전력 제어를 통해서 초소형 기지국이 대형 기지국 사용자에게 미치는 주파수 간섭을 줄이기 위한 기법을 제안하였다. 사용자의 부채널이 할당된 상태에서 초소형 기지국의 간섭을 줄이기 위해서는 사용 전력을 최소화하는 기법이 필요하며 이는 ideal water-filling 문제로 나타난다. 제안하는 전력 할당 기법은 부채널 상태에 따른 전송률 할당을 통해서 ideal water-filling과 동일한 전력 할당을 보다 빠르게 수행한다. 모의 실험을 통한 성능 분석 결과는 제안하는 전력 할당 기법이 ideal water-filling의 결과와 일치하며 equal-rate allocation에 비해서 큰 성능 향상을 가져온다는 것을 보여준다.

참 고 문 헌

[1] D. Lopez-Perez, A. Valcarce, G. de la Roche, and J. Zhang, "OFDMA Femtocells: A Roadmap on Interference Avoidance," *IEEE Communications Magazine*, Vol.47, No.9, pp.41-48, Sep., 2009.

[2] V. Chandrasekhar, and J. G. Andrews, "Femtocell Networks: A Survey," *IEEE Communications Magazine*, Vol.46, No.9, pp.59-67, Sep., 2008.

[3] M. Yavuz, F. Meshkati, S. Nanda, A. Pokhariyal, N. Johnson, B. Raghathan, and A. Richardson, "Interference Management and Performance Analysis of UMTS/HSPA+ Femtocells," *IEEE Communications Magazine*, Vol.47, No.9, pp.102-109, Sep., 2009.

[4] H. Claussen, "Performance of macro- and co-channel femtocells in a hierarchical cell structure," in *proceeding of IEEE PIMRC 2007*, May., 2007, pp.1-5.

[5] S. Chiochan, and E. Hossain, "Adaptive radio

resource allocation in OFDMA systems: a survey of the state-of-the-art approaches," *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol.9, No.4, pp.513-527 Apr., 2009.

[6] B. Korte, and J. Vygen, *Combinatorial Optimization Theory, Theory and Algorithms, Second Edition*, Springer-Verlag, 2002.

[7] C. Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Letaief, and Ross D. Murch, "Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.17, No.10, pp.1747-1758, Oct., 1999.

[8] D. Kivanc, and Hui Liu "Subcarrier allocation and power control for OFDMA," in *proceeding of IEEE CSSC 2000*, Oct., 2000, pp. 147-151.

[9] L. Xiaowen, and Zhu Jinkang "An adaptive subcarrier allocation algorithm for multiuser OFDM system," in *proceeding of IEEE VTC 2003*, Oct., 2003, pp.1502-1506.

[10] R. Gallager, *Information Theory and Reliable Communication*, Wiley, 1968.

[11] Y. Zhang, and C. Leung "Subchannel Power-Loading Schemes in Multiuser OFDM Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.58, No.9, pp.5341-5347, Nov., 2009.

[12] S. Chung, and A. Goldsmith "Degrees of freedom in adaptive modulation: A unified view," *IEEE Transactions on Communications*, Vol.49, No.9, pp.1561-1571, Sep., 2001.

정 현 덕 (Hyunduk Jung)

정회원



2004년 2월 연세대학교 전기전
자공학부 학사

2006년 2월 연세대학교 전기전
자공학과 석사

2006년 3월~현재 연세대학교 전
기전자공학과 박사과정

<관심분야> 차세대 통신망, 핸

드오버, 휴대방송, 유무선 통합망, Femtocell

이재용 (Jaiyong Lee)

중신회원



1977년 2월 연세대학교 전자공
학과 학사

1984년 5월 IOWA State Univ.
(공학석사)

1987년 5월 IOWA State Univ.
(공학박사)

1987년 7월~1994년 8월 포항공

과대학 교수

1994년 9월~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수
<관심분야> Protocol Design for Wired/Wireless
QoS Management, Ubiquitous Sensor Network,
Wireless Multimedia Support Protocol