

이기종 셀룰러 네트워크에서의 상향 링크 셀 접속 기법

이형열*, 상영진*, 박진배**, 김광순^o

Cell Association Scheme for Uplink Heterogeneous Cellular Networks

Hyung Yeol Lee*, Young Jin Sang*, Jin Bae Park**, Kwang Soon Kim^o

요약

단일 셀룰러 네트워크에는 같은 종류의 기지국만 존재하기 때문에 가장 가까운 기지국에 접속하는 하향 링크 수신 신호 기준 셀 접속이 상향 링크의 경우에도 최적의 셀 접속 방식이었다. 그러나 이기종 셀룰러 네트워크에서는 서로 다른 계층의 기지국의 하향 링크 수신 신호 차이와 상향 링크 수신 신호 차이가 다르기 때문에, 상향 링크 수신 신호의 경우 하향 링크 기반 셀 접속은 더 이상 최적의 셀 접속이 될 수 없다. 이에 본 논문에서는 이기종 셀룰러 네트워크에서 상향 링크 기준 셀 접속 기법에 대해 제안하고 상향 링크 성능을 효과적으로 볼 수 있는 성능 메트릭 (performance metric)을 제안한다. 이 성능 메트릭을 통하여 상향 링크 기준 셀 접속을 통해 아웃티지 확률 (outage probability), 지연 제한 아웃티지 확률 (delay constraint outage probability), 지연 제한 아웃티지 용량 (delay constraint outage capacity) 측면에서 성능 향상을 보이고 상향 링크 기준 셀 접속의 필요성을 논의한다.

Key Words : cell association, uplink, outage probability, heterogeneous cellular networks

ABSTRACT

In conventional single-tier networks, downlink based association is the best association scheme for the uplink association because all macro base stations have the same physical specification. However, in uplink heterogeneous cellular networks, a downlink based cell association cannot be the best for uplink any more because of the difference of physical specification between the different base station. In this paper, we will propose a uplink based cell association scheme, and devise performance metric for describing a uplink performance in heterogeneous cellular networks. Then, we will discuss the necessity of the uplink based association by observing outage probability, delay constraint outage probability, delay constraint outage capacity.

I. 서론

통신 기기의 다양화와 스마트 기기의 사용 증가로 인한 데이터 트래픽 (data traffic) 증가는 2020년까지 현재 규모의 1000배 이상으로 폭증할 것이

라고 예상하고 있다^[1]. 이러한 데이터 트래픽의 폭증을 해결하기 위해서 기지국의 숫자를 늘리는 방안이 모색되고 있지만 이는 설치 및 유지비용이 많이 든다는 한계점이 있다. 이에 설치가 쉽고 기지국 유지비용이 적은 펨토 (femto)나 피코 (pico) 기지

※ 이 논문은 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2012-0001571).

♦ 주저자 : 연세대학교 전기전자공학과 디지털통신 연구실, neolee@dcl.yonsei.ac.kr, 학생회원

° 교신저자 : 연세대학교 전기전자공학과 디지털통신 연구실, ks.kim@yonsei.ac.kr, 중신회원

* 연세대학교 전기전자공학과 디지털통신 연구실, yjmich@dcl.yonsei.ac.kr, 학생회원

** 연세대학교 전기전자공학과 디지털통신 연구실, spacey2k@dcl.yonsei.ac.kr, 학생회원

논문번호 : KICS2013-03-119, 접수일자 : 2013년 3월 5일, 최종논문접수일자 : 2013년 4월 18일

국의 소형 기지국이나 중계기 (relay)를 이용하여 사용자의 서비스 품질 (service quality)를 향상시키는 이기종 셀룰러 네트워크 (heterogeneous cellular network)가 보급되어 관련 기술들이 LTE, LTE-A 등의 표준화 기구 및 각종 연구 단체에서 활발히 연구되고 있으며, 특히, LTE-A에서는 세 가지 주요 특징 중 하나로 이기종 셀룰러 네트워크를 정의하고 이기종 네트워크의 효과적인 이용 방안에 대해 연구하고 있다²⁾.

그러나 이러한 이기종 네트워크에서는 매크로 (macro) 기지국과 소형 기지국의 송신 전력 및 안테나 이득 (antenna gain) 차이로 인해 소형 기지국의 사용자가 매크로 기지국으로부터 자신의 신호 세기보다 큰 신호를 간섭으로 받는 문제나 셀 영역 (coverage)의 비대칭으로 인한 트래픽부하 불균형 문제 등의 새로운 문제가 발생하게 된다³⁾. 이에 셀 접속 시 사용자가 기지국으로부터의 수신 신호를 실제 보다 더 크게 인지하는 편향 수신 신호 세기 (biased received signal power)를 이용하여 펌토 기지국의 셀 영역을 늘리는 기법들이 연구되고 있다^{4,5)}. [4]에서는 편향 요소를 적용한 하향 링크 셀룰러 네트워크에서 임의의 사용자의 하향 링크 수신 신호 대 간섭 및 잡음비(signal-to-interference-ratio)를 수학적으로 분석하고 여러 편향 요소를 적용한 성능을 비교 분석하였으며 [5]에서는 편향 요소를 고려한 하향 링크 셀 접속 문제를 수학적으로 정의하고 이를 최적화 하는 문제에 대한 솔루션을 찾는 방법을 제안하였다. 그러나 이러한 셀 접속 기법 연구들은 하향 링크 기준의 셀 접속 방법에 대한 연구라는데 장점이 있지만 이기종 셀룰러 네트워크에서 하향 링크 신호 품질의 성능만을 고려한 셀 접속 기법이라는 한계점이 있다. 특히, 이기종 셀룰러 네트워크에서는 서로 다른 계층의 기지국의 하향 링크 수신 신호 차이와 상향 링크 수신 신호 세기의 차이가 달라서, 상향 링크 수신 신호의 경우 하향 링크 기반 셀 접속은 더 이상 최적의 셀 접속이 될 수 없다⁶⁾. 즉, <그림 1>에서 나타나 있는 것처럼 하향 링크 수신 신호 기반의 셀 영역과 상향 링크 수신 신호 기반의 셀 영역이 다르다. 또한, 차세대 네트워크에서는 실시간 영상 전화 (real-time video call), 동영상 업로드 (upload) 등의 서비스로 인해 상향 링크의 품질 역시 매우 중요하므로 상향 링크 성능을 고려한 상향 링크 기반의 셀 접속 기법이 연구되어야 한다. 이에 이기종 네트워크에서 상향 링크 성능을 고려한 셀 접속 기법에 대한 연

구가 일부 진행되어왔다^{6,7)}. [6]에서는 중계기가 포함된 이기종 네트워크에서 이중 접속 포인트 (dual access point)를 통한 셀 접속 기법을 제안 하고 상향 링크와 하향 링크 셀 접속을 독립적으로 수행하는 셀 접속 기법을 제안하였으며, [7]에서는 간접 세기를 최소화를 통해 하향 링크와 상향 링크 성능을 동시에 고려하여 사용자 관점에서의 성능을 향상 시키는 셀 접속 기법에 대해 연구하였다. 이러한 연구들은 하향 링크와 상향 링크의 독립적인 접속의 필요성에 대해 언급하였는데 그 의의가 있으나 단순히 상향 링크 셀 접속의 필요성에 대한 언급을 했을 뿐 여전히 성능 메트릭은 하향 링크의 성능이 중심이었으며 상향 링크 성능 메트릭에 대한 고찰이 없었다. 또한, 이기종 셀룰러 네트워크에서 상향 링크의 경우 <그림 1>의 상향 링크 간섭 문제처럼 매크로 기지국이 매크로 기지국의 셀 영역 안에 존재하는 소형 기지국 사용자로부터 해당 매크로 사용자의 송신 신호 세기보다 더 큰 간섭을 받게 되므로 매크로 기지국 사용자의 수신 신호 품질이 크게 저하되어 서로 다른 계층 (layer)간의 신호 대 간섭 및 잡음비 (signal-to-interference-ratio) 불균형 현상 등이 발생하게 된다. 그러나 아직 이러한 계층 간 신호 품질 불균형 문제 등 상향 링크 특성에 따른 문제를 해결하기 위한 셀 접속 기법 연구는 아직 미흡한 실정이다.

이에 본 논문에서는 이기종 셀룰러 네트워크에서 상향 링크의 각 계층의 신호 대 간섭 및 잡음비의 특성을 실험을 통해서 알아보고 이 때 생기는 계층 간 품질 불균형 현상을 극복할 수 있는 상향 링크 셀 접속 기법을 제안한다. 또한, 기존 논문들에서 일반적으로 다루고 있는 성능 메트릭인 사용자의 평균 데이터 용량 (user rate)이나 기지국의 데이터 유포율이 아닌, 각 계층의 사용자 수, 기지국 밀도, 신호 품질 등을 동시에 고려한 성능 메트릭을 제안한다. 앞서 살펴본 듯이 이기종 셀룰러 네트워크에서는 계층 간 신호 품질의 차이 및 사용자 수의 차이가 존재하기 때문에 제안하는 성능 메트릭은 이기종 셀룰러 시스템에서 서로 다른 계층의 사용자 관점에서의 성능을 효과적으로 반영할 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 성능 메트릭을 통하여 상향 링크 기준 셀 접속이 시스템에 어떠한 성능 향상을 가져오는지 알아보고 상향 링크 기준 셀 접속의 필요성을 논의한다.

II. 시스템 모델

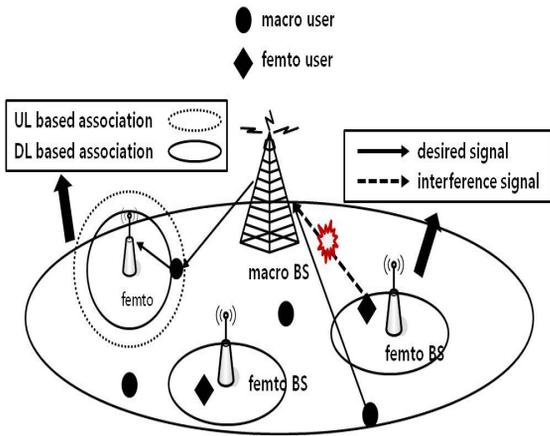


그림 1. 상향 링크 이기종 셀룰러 네트워크 문제
Fig. 1. Problem of uplink heterogeneous cellular networks

2.1. 이기종 셀룰러 네트워크 모형

본 논문에서는 송신 전력 (transmit power), 공간적 밀도 (spatial density), 안테나 이득 (antenna gain) 으로 구별되는 매크로 기지국과 펌토 기지국에 혼재하는 2계층의 상향 링크 이기종 셀룰러 네트워크 모형을 가정한다. 즉, <그림 1>에 설명되어 있는 것처럼 이기종 셀룰러 네트워크에는 더 큰 안테나 이득을 가지는 매크로 기지국과 상대적으로 작은 안테나 이득을 가지는 펌토 기지국들이 혼재하고 있는데 이 때, 단말은 네트워크 내에 균등하게 분포한다고 가정하며 모든 단말은 동일한 송신 전력 P 로 송신한다고 가정한다. 이는 [8]에서 $\epsilon=0$ 인 상황으로 모델링 될 수 있으며 이는 단말이 전력 조절 (power control)을 하지 않는 경우를 의미한다. 또한, 각 계층 기지국의 안테나 이득은 $\{A_l\}_{l \in \{m, f\}}$ 로 정의되며 m 은 매크로 기지국, f 는 펌토 기지국을 나타낸다. 안테나의 특성은 안테나 이득, 안테나 패턴 (antenna pattern), 빔 폭 (beam width), 메이저와 사이드 로브 (major and side lobe), 애퍼처 (aperture) 등으로 분류되지만, 안테나 모형의 단순성을 도모하기 위해 본 논문에서는 등방향 안테나 (isotropic antenna)를 사용한다고 가정하고 안테나 이득 A_l 로 안테나 특성을 대표한다. 각 계층의 경로 손실 (path loss)은 $\{\alpha_l\}_{l \in \{m, f\}}$ 로 정의하고 이 때, 두 계층의 기지국은 안테나 높이 등의 배치 환경의 차이로 인해 $\alpha_m \geq \alpha_f$ 의 관계를 갖는다^[9]. 또한, 무선 채널 환경은 평균이 1인 레일리 페이딩 (Rayleigh fading)으로 모델링되며 임의의 user에게 오는 1번째 계층으로부터의 간섭 신호의 세기 합은 I_l 로 정의되며, 잡음은 평균이 0

이고 분산이 N_0 인 복소 가우시안 (complex Gaussian) 랜덤 변수로 모델링 한다.

한편, 2 계층의 이기종 셀룰러 네트워크 모형은 동종 포아송 포인트 프로세스로 모델링된다. 1번째 계층의 기지국들 위치는 밀도가 λ_l 인 동종 포아송 포인트 프로세스 Φ_l 에 따라 분포한다고 가정한다^[10]. 또한, 사용자의 위치 집합은 X 로 정의되며 밀도가 $\lambda^{(u)}$ 인 동종 포아송 포인트 프로세스 $\Phi^{(u)}$ 를 따른다. 주어진 셀 접속 기법에 대하여, 사용자들은 특정 기지국에 셀 접속을 하게 되고 각각의 기지국은 라운드 로빈 (round robin) 스케줄링 (scheduling) 기법에 의해 스케줄링된 사용자 집합을 정의하고 이를 \bar{X} 라고 정의하며 축소된 포인트 프로세스 (thinned point process)^[10]인 $\bar{\Phi}$ 에 따라서 분포하며 $\bar{X} \subset X$ 관계가 성립한다. 따라서, 한 스케줄링 시간당 한명의 사용자가 전송한다고 가정할 때, 스케줄링 사용자의 집합을 정의하는 포아송 포인트 프로세스 $\bar{\Phi}$ 의 밀도는 기지국의 밀도와 같다.

2.2. 시스템 모델 및 제안하는 셀 접속 기법

위 가정을 기반으로 본 논문에서는 사용자가 상향 링크 편향 수신 신호 세기 (biased received signal power)가 최대인 기지국에 접속을 하는 셀 접속 기법을 사용한다고 가정한다. 이 때, 스케줄링된 사용자의 위치 집합 \bar{X} 안의 임의의 사용자와 셀 접속된 k 번째 계층의 기지국과의 거리를 R_k 라고 하고 k 번째 계층의 기지국에 셀 접속한 임의의 사용자에게 대한 실제 상향 링크 신호 대 간섭 및 잡음비는 아래와 같이 정의한다.

$$SINR_k = \frac{PA_k h_k R_k^{-\alpha}}{N_0 + \sum_{l \in \{m, f\}} I_l} \quad (1)$$

여기서, A_k 는 k 번째 계층 기지국의 안테나 이득을 나타내고 N_0 은 복소 가우시안으로 모델링되는 잡음 신호의 분산을 나타내며 무선 채널 환경 h_k 은 평균이 1인 레일리 페이딩 (Rayleigh fading)으로 모델링된다고 가정한다. 이 때 1번째 계층으로부터의 간섭 I_l 은 아래와 같이 정의되며,

$$I_l = \sum_{x_{l,m} \in X_l \setminus B_{k,0}} PA_l h_{l,m} |x_{l,m}|^{-\alpha}, \quad (2)$$

이 때, 기준이 되는 기지국이 원점에 위치한다고 가정하면 $|x_{l,m}|$ 는 l 번째 계층의 m 번째 기지국에 속해있는 사용자와의 거리를 나타내며 이 때, 기준 기지국의 사용자는 제외 한다 ($x_{l,m} \in X_l \setminus B_{k,0}$). 또한, 임의의 사용자 중 k 번째 계층의 기지국에 셀 접속된 사용자의 상향 링크 아웃티지 확률은 주어진 신호 대 간섭 및 잡음비 한계점 (threshold)인 T 에 대해 수신 신호 대 간섭 및 잡음비가 그 값보다 작을 때로 정의되며 상향 링크 아웃티지 확률 (outage probability)은 아래와 같이 정의된다.

$$P_{out,k} = E_{R_k} [Pr [SINR_k(R_k) < T]]. \quad (3)$$

여기서, 상향 링크 아웃티지 확률의 물리적 의미는 k 번째 계층의 기지국에 셀 접속된 임의의 사용자의 신호 대 간섭 및 잡음비가 한계점 T 보다 작을 확률이며, 신호 대 간섭 및 잡음비의 누적 분포 함수 (cumulative distribution function)와 같다. 또한, 본 논문에서는 지연 제한 아웃티지 확률 (delay constraint outage probability)을 정의한다. 이 때, 지연 제한 아웃티지 확률의 물리적 의미는 제한 시간인 τ 시간동안 재전송을 한다고 가정하였을 때, 제한 시간 내에 R bps를 받지 못할 확률이며 식 (4)와 같이 정의하고 계산할 수 있으며, N_k 는 k 번째 계층 기지국에 접속된 사용자 수를 의미하며 $f_{R_k}(r_k)$ 은 [4] 을 따르고 임의의 사용자가 k 번째 계층 기지국에 셀 접속 되어 있을 때, 해당 사용자와 기지국과의 거리의 확률 분포 함수 (probability distribution function)를 의미하며, c 는 서브 채널 수를 의미한다. 여기서 주목할 점은, 지연 제한 아웃티지 확률의 경우 식 (4)와는 달리 사용자 수에 따라서 값의 변화가 있다는 것이다. 즉, 사용자 수를 고려하는 메트릭 이라는데 그 의미도 있다. 또한, 이 식은 $R > 0$ 일때에 대한 식으로 $R=0$ 일때의 지연 제한 아웃티지 확률을 0이다. 이러한 가정 하에서, k 번째 계층의 기지국에 있는 사용자의 지연 제한 아웃티지 용량 (delay constraint outage capacity)은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$\overline{R}_k = D_{out,k}^{-1}(\epsilon). \quad (5)$$

여기서, 지연 제한 아웃티지 용량은 지연 제한 아웃티지 확률이 ϵ 일 때, 그 때의 도달할 수 있는 데이터율을 의미한다. 한편, 앞서 서론에서 설명한 대로 이기종 셀룰러 네트워크에서 상향 링크의 경우 <그림 1>처럼 매크로 기지국이 매크로 기지국의 셀 영역 안에 존재하는 소형 기지국 사용자로부터 해당 매크로 사용자의 송신 신호 세기보다 더 큰 간섭을 받게 되므로 매크로 기지국 사용자의 수신 신호 품질이 크게 저하되어 서로 다른 계층 (layer) 간의 신호 대 간섭 및 잡음비 (signal-to-interference-ratio) 불균형 현상 등이 발생하게 된다. 이에 본 논문에서는 펠토 기지국 사용자와 매크로 기지국의 사용자의 성능 차이를 $\overline{R}_F \leq L \overline{R}_M$ 로 제한하는 조건을 반영하는 성능 메트릭 (performance metric)을 정의하고자 한다. 이 때, 제한 조건이 있을 경우 매크로 기지국 사용자의 지연 제한 아웃티지 용량은

$$\widehat{R}_M = \min(\overline{R}_M, \frac{\overline{R}_F}{L}), \quad (6)$$

펠토 기지국의 지연 제한 아웃티지 용량은

$$\widehat{R}_F = \min(\overline{R}_F, L \overline{R}_M), \quad (7)$$

로 정의할 수 있다. 식 (6)과 식 (7)은 지연 제한 아웃티지 용량에 제한 조건이 반영된 값으로 펠토 기지국의 지연 제한 아웃티지 용량이 매크로 기지국의 지연 제한 아웃티지 용량보다 지나치게 큰 경우 펠토 기지국의 지연 제한 아웃티지 용량을 제한 조건에 맞추어 주기 위함이다. 매크로 기지국과 펠토 기지국의 지연 제한 용량을 이용하여 본 논문에서 사용하고자 하는 성능 메트릭 U 를 아래와 같이 정의한다.

$$U = \lambda_m n_m \widehat{R}_M + \lambda_f n_f \widehat{R}_F \text{ [bps/m}^2\text{]}. \quad (8)$$

여기서, n_m 은 매크로 기지국의 평균 사용자 수이며 n_f 는 펠토 기지국의 평균 사용자 수이다.

$$\begin{aligned}
 D_{out,k}(R) &= E_{R_k, N_k} \left[\sum_{i=0}^{\tau} \binom{\tau}{i} \left(\frac{c}{n}\right)^i \left(\frac{n-c}{n}\right)^{\tau-i} (\Pr[SINR_k < 2^R - 1])^i |n_k, r_k \right] \\
 &= E_{R_k} \left[\sum_n \Pr[N_k = n] \sum_{i=0}^{\tau} \binom{\tau}{i} \left(\frac{c}{n}\right)^i \left(\frac{n-c}{n}\right)^{\tau-i} (\Pr[SINR_k < 2^R - 1])^i |r_k \right] \\
 &= \int_{r_k > 0} \sum_n \Pr[N_k = n] \sum_{i=0}^{\tau} \binom{\tau}{i} \left(\frac{c}{n}\right)^i \left(\frac{n-c}{n}\right)^{\tau-i} (\Pr[SINR_k < 2^R - 1|r_k])^i f_{R_k}(r_k) dr_k \\
 &= \int_{r_k > 0} \sum_n \Pr[N_k = n] \left(1 - c \frac{\Pr[SINR_k > 2^R - 1|r_k]}{n} \right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

따라서, 성능 메트릭 U는 각 기지국별 지연 제한 아웃티지 용량에 평균 사용자 수 및 기지국 밀도를 곱한 값으로 제한 조건 $\overline{R}_F \leq L \overline{R}_M$ 가 반영된 지연 제한 아웃티지 용량의 기지국 별 평균 사용자 수의 가중합 (weighted sum)이며, 해당 제한 조건 서비스 품질을 만족하는 면적당 전송률이라는 물리적 의미가 있다.

또한, 본 논문에서는 일반적인 셀룰러 네트워크에서 적용하는 하향 링크 수신 신호 기준 셀 접속과 달리 상향 링크 수신 신호 기준의 셀 접속 기법을 제안한다. 이 때, 사용자는 모든 계층의 기지국에 접속 가능하다고 가정하며 스케줄링된 사용자 집합 \overline{X} 안의 임의의 사용자와 셀 접속된 k번째 계층의 기지국과의 거리를 R_k 라고 했을 때, 임의의 사용자에게 대한 상향 링크 편향 수신 신호 세기 (uplink biased received signal strength)는 다음과 같이 정의 된다.

$$\widetilde{P}_{k, UL} = P A_k \kappa_k R_k^{-\alpha}. \tag{9}$$

여기서, κ_k 는 k번째 계층의 기지국에 있는 양수 값의 편향 요소 (biasing factor) 값이다. 이 때, 편향 요소는 k번째 계층의 기지국이 단말로부터 오는 수신 신호 크기를 실제보다 κ_k 배 크게 인지하도록 하는 값이며 이 값은 시스템의 목적에 따라 다른 값을 적용할 수 있다. 특히, 상향 링크의 경우 편향 요소를 적용하면 계층 간 신호 대 간섭 및 잡음비의 경험 차이가 작아지는 것을 본 연구진의 또 다른 연구를 통해 확인하였는데 이는 편향 요소를 통해서 상향 링크의 셀 영역의 차이가 줄어들기 때문이며 편향 요소 값에 대한 최적 값을 찾는 방법은 이 논문의 연구 범위에서 벗어나므로 따로 언급하지는 않으며 편향 요소에 대한 효과는 실험을 통

해서 제시한다. 위에서 정의된 상향 링크 수신 신호 세기를 바탕으로 사용자는 아래와 같은 수식을 만족하는 계층의 기지국을 선택한다.

$$k^* = \operatorname{argmax}_k \widetilde{P}_{k, UL}. \tag{10}$$

이 식은 각 계층의 기지국 중 가장 가까운 기지국의 상향 링크 편향 수신 신호 세기의 중 가장 큰 계층의 기지국을 선택하는 것이며, 편향 수신 신호 세기를 바탕으로 셀 접속이 결정된 계층의 인덱스 (index)를 의미한다. 이 때, 상향 링크 단말 접속의 대략적인 과정은 <그림 2>에 설명 되어 있다. 제안하는 상향 링크 단말 접속 기법의 기본적인 가정은 단말이 최초 셀 접속을 기존의 방법인 하향 링크 신호를 기준으로 매크로 기지국에 셀 접속하여 있다고 가정한다. 단말은 상향 링크 기준 신호 (uplink reference signal)을 주변 펠토 기지국에 보내 주변 기지국들은 이 신호를 이용해서 상향 링크 신호의 세기를 측정하고 이를 단말의 하향 링크 기지국에 사용자의 아이디 (ID)와 해당 펠토 기지국의 편향 요소를 피드백 (feedback)한다. 하향 링크 기지국은 이 정보들을 이용하여 해당 사용자의 상향 링크 기지국을 결정하고 이를 사용자에게 다시 피드백 해준다. 사용자는 위 식과 과정을 토대로 결정된 k번째 계층의 기지국 중 가장 가까운 기지국에 상향 링크 셀 접속을 수행 한다. 위와 같은 상향 링크 셀 접속 기법을 토대로 다음 장에서는 상향 링크 수신 신호 기반 셀 접속 기법이 아웃티지 확률, 지연 제한 아웃티지 확률, 지연 제한 아웃티지 용량 측면에서 어떠한 경향을 보이는지 알아본다.

III. 실험 결과

본 논문의 실험에서는 전체 네트워크 면적이 가

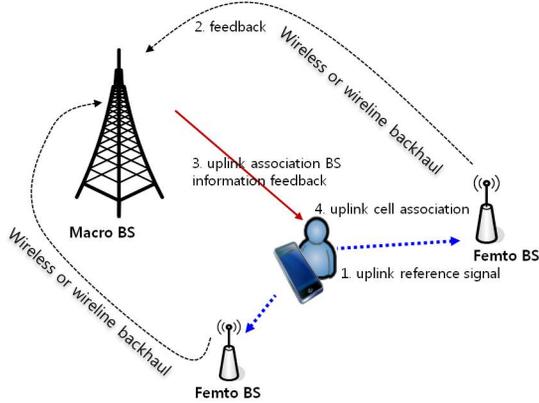


그림 2. 상향 링크 셀 접속 과정
Fig. 2. Procedure of uplink cell association

로 세로 20km인 이기종 셀룰러 네트워크를 가정한다. 모든 기지국 및 사용자 노드는 포아송 포인트 프로세스에 따라 발생하며 매크로 기지국의 밀도는 1.414×10^{-7} 으로 정하였으며 이는 반경 1500m당 매크로 기지국이 평균적으로 1개 발생하는 값이다. 또한, 사용자는 매크로 기지국 1개당 300명의 사용자가 발생하도록 하였으며 펌토 기지국의 밀도는 10 배로 설정하여 경향을 보았다. 경로 손실 계수 α 는 모든 기지국이 4로 동일하며 상향 링크 시 사용자의 송신 전력은 23dBm, 잡음 신호의 전력은 -174dBm/Hz 로 설정하였으며 전체 대역폭은 107Hz로 정하였다. 또한, 상향 링크 전력 조절을 위해 목표 수신 신호 대 잡음비를 20dB로 설정하였으며 매크로 기지국과 펌토 기지국의 수신 안테나 이득은 펌토 기지국의 경우 $A_f = 1$ 로 정하고 이에 비해 $A_m = 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80$ 으로 변화시켜 가면서 경향을 관찰하였다.

<그림 3>은 하향 링크 기준 셀 접속을 기법에 대해 상향 링크 전력 조절을 한 경우와 하지 않은 경우, 상향 링크 셀 접속을 한 경우에 대해 식 (4)에 정의한 상향 링크 아웃티지 확률을 비교한 것이다. 먼저, 전력 조절을 하지 않았을 때, 하향 링크와 상향 링크 기준 셀 접속의 경우의 상향 링크의 아웃티지 확률을 비교해보자. 하향 링크 기준 셀 접속 시 전력 조절을 하지 않으면 두 계층 간 극심한 성능 차이를 보인다. 하향 링크 셀 접속한 상태에서 전력 조절을 한 경우에는 펌토 기지국은 확률적으로 자신의 기지국으로 부터의 거리가 작은 사용자들이 많아서 상대적으로 작은 파워로 쓰기 때문에 펌토 사용자의 아웃티지 확률이 오히려 낮아진다. 그로 인해 계층 간 성능 차이는 많이 줄어들지만

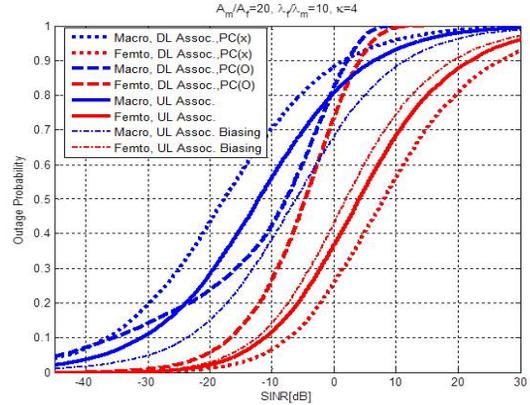


그림 3. 상향 링크 아웃티지 확률
Fig. 3. Uplink outage probability

매크로 기지국의 사용자들은 펌토 사용자들의 전력 조절로 인해 간접 측면에서 이득을 보게 된다. 그러나 상향 링크 기준 셀 접속을 하면 하향 링크 전력 조절하는 것 대비 매크로 기지국 사용자의 큰 차이 없이 펌토 기지국의 성능을 개선할 수 있다. 또한, 편향 요소를 사용한 상향 링크 접속 기법을 통해 큰 손실 없이 매크로와 펌토 기지국 사용자 사이의 차이를 줄일 수 있어 전체적인 성능을 올릴 수 있다.

<그림 4>는 하향 링크 기준 셀 접속을 기법에 대해 상향 링크 전력 조절을 한 경우와 하지 않은 경우, 상향 링크 셀 접속을 한 경우, 편향 요소를 고려하여 셀 접속을 한 경우에 대해 식 (6)에 정의한 사용자의 상향 링크 지연 제한 아웃티지 확률의 분포를 비교한 것이다. 실험 결과, 하향 링크 기준 셀 접속을 했을 때 전력 조절을 한 경우에 비해서 상향 링크 기준 셀 접속을 했을 경우 지연 제한 아웃티지 확률면에서 매크로 기지국 사용자와 펌토 기지국 사용자 모두 우수한 성능을 나타내는 것을 볼 수 있다. 왜냐하면 매크로 기지국 사용자의 경우, 두 방법 모두 아웃티지 확률 측면에서는 큰 차이가 없지만 상향 링크 셀 접속을 하는 경우에는 펌토 기지국으로 더 많은 사용자가 넘어가게 되어, 사용자 수 측면에서 이득을 보기 때문이다. 또한, 펌토 기지국 사용자의 경우 비록 사용자 수 부분에서는 손해를 보지만 이러한 손해를 여러 개의 펌토 기지국이 나누어 분담하는 상황이고, 아웃티지 확률 측면에서 큰 이득을 보게 되므로 지연 제한 아웃티지 확률면에서 이득을 보게 된다. 추가적으로, 적절한 편향 요소 값을 적용할 경우, 계층간 지연 제한 아웃티지 확률의 차이가 줄어드는 것을 확인할 수

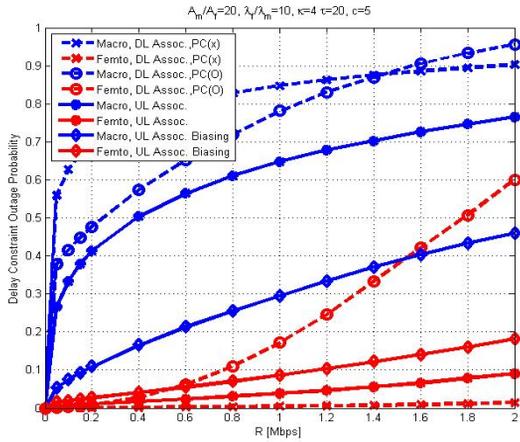


그림 4. 지연 제한 아웃티지 확률
Fig. 4. Delay constraint outage probability

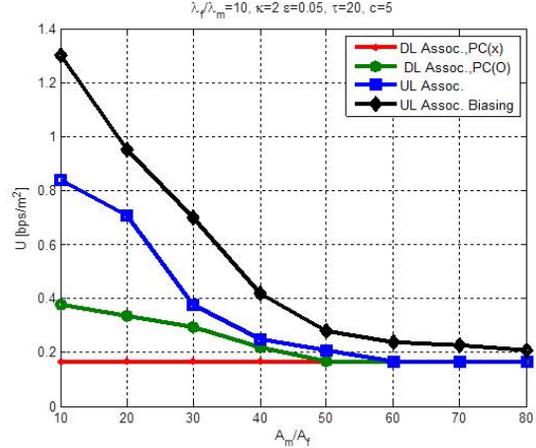


그림 5. 성능 메트릭
Fig. 5. Performance metric

있다.

<그림 5>는 하향 링크 기준 셀 접속을 기법에 대해 상향 링크 전력 조절을 한 경우와 하지 않은 경우, 상향 링크 셀 접속을 한 경우, 편향 요소를 고려하여 셀 접속을 한 경우에 대해 식 (9)에 정의한 제한 조건 $\overline{R}_F \leq \overline{LR}_M$ 가 반영된 지연 제한 아웃티지 용량의 기지국 별 평균 사용자 수의 가중합 분포 상향 링크 기지구의 안테나 이득 차이에 따라 비교한 것이다. 실험 결과, 안테나 이득 차이가 작을수록 상향 링크 셀 접속의 제한 아웃티지 용량 이득이 크다는 것을 알 수 있는데, 이는 A_M/A_F 값이 작을수록 하향 링크 기준 셀 접속과 차이가 많이 나서 두 셀 접속 방법의 셀 영역 차이가 많이 나기 때문이다. 또한, A_M/A_F 이 증가할수록 지연 제한 아웃티지 용량이 작아지는 것은, 매크로 사용자의 성능과 펠토 사용자의 성능 차이가 많이 나는 상황, 즉, 사용자 수가 많은 매크로 사용자들의 지연 제한 아웃티지 확률이 높아지기 때문이다. 편향 요소를 적용한 경우에는 지연 제한 아웃티지 용량 측면에서 가장 높은 성능을 얻을 수 있다. 이 때, 편향 요소 값 $\kappa = 2$ 로 고정하여 비교하였다.

IV. 결 론

이기종 셀룰러 네트워크에서는 서로 다른 계층의 기지국의 하향 링크 수신 신호 차이와 상향 링크 수신 신호 차이가 다르기 때문에, 상향 링크 수신 신호의 경우 하향 링크 기반 셀 접속은 더 이상 최

적의 셀 접속이 될 수 없다. 이에 본 논문에서는 이기종 셀룰러 네트워크에서 상향 링크 수신 신호 기준 셀 접속 기법에 대해 제안하고 상향 링크 셀 접속 기법의 성능을 효과적으로 볼 수 있는 성능 메트릭을 제안하였다. 그리고 실험을 통하여 상향 링크 기준 셀 접속 기법이 아웃티지 확률, 지연 제한 아웃티지 확률, 지연 제한 아웃티지 용량 측면에서 하향 링크 기준 셀 접속방법보다 성능이 우수함을 확인하였다.

References

- [1] R. Andrew, "2020:The ubiquitous heterogeneous network beyond 4G," *ITU Kaleidoscope*, 2011.
- [2] M. Baker, "From LTE-advanced to the future," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 2, pp. 116-120, Feb. 2012.
- [3] H. Y. Lee, Y. J. Sang, J. B. Park, and K. S. Kim, "Survey on heterogeneous networks for B4G systems," *KICS Inform. Commun. Mag.*, pp. 17-25, Aug. 2012.
- [4] H. Jo, Y. J. Sang, P. Xia, and J. G. Andrews, "Heterogeneous cellular networks with flexible cell association: a comprehensive downlink SINR analysis," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 1, no. 99, pp. 1-12, 2012.
- [5] Q. Ye, B. Rong, Y. Chen, M. Al-Shalash, C. Caramanis, and J. G. Andrews, "User Association for Load Balancing in

Heterogeneous cellular networks,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. PP, no. 99, pp. 1-11, Apr. 2013.

- [6] H. Kim, X. Yang, and M. Venkatachalam, “Dual access points association in relay networks to conserve mobile terminals’ energy,” *IET Commun.*, vol. 5, no. 18, pp. 2598-2605, July 2011.
- [7] R. Q. Hu, Y. Yu, Z. Cai, J. E. Womack, and Y. Song, “Mobile association in a heterogeneous network,” *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 1, no. 1, pp.1-6, May 2010.
- [8] T. D. Novlan, H. S. Dhillon, and J. G. Andrews, “Analytical modeling of uplink cellular networks,” Accepted for publication in *IEEE Trans. Wireless Commun.*, <http://arxiv.org/abs/1203.1304>, Mar. 2012.
- [9] V. Chandrasekhar and J. G. Andrews, “Uplink capacity and interference avoidance for two-tier femtocell networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 7, July 2012.
- [10] D. Stoyan, W. Kendall, and J. Meche, *Stochastic Geometry and Its Applications*, 2nd Ed., John Wiley and Sons, 1996.

이 형 열 (Hyung Yeol Lee)



2007년 2월 연세대학교 전기 전자공학과 학사
 2007년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 석·박사 통합과정
 <관심분야> 이기종 네트워크, 셀 접속, 무선 자원 관리

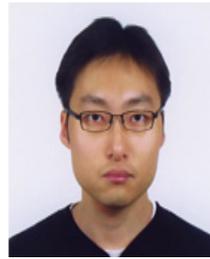
상 영 진 (Young Jin Sang)



무선 자원 관리

2005년 2월 연세대학교 전기 전자공학과 학사
 2007년 2월 연세대학교 전기 전자공학과 석사
 2007년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 <관심분야> 이기종 네트워크,

박 진 배 (Jin Bae Park)



자원 관리

2006년 2월 연세대학교 전기 전자공학과 학사
 2008년 2월 연세대학교 전기 전자공학과 석사
 2008년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 <관심분야> 협력 통신, 무선

김 광 순 (Kwang Soon Kim)



1994년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 학사
 1996년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사
 1999년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사
 1999년 3월~2000년 3월 Dept. ECE, UC San Diego, 박사후연구원
 2000년 4월~2004년 2월 한국 전자 통신 연구소 선임연구원
 2004년 3월~2009년 2월 연세대학교 전기전자공학부 조교수
 2009년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학부 부교수
 <관심분야> 통신이론, 신호 검출 이론, 이기종 셀룰러 네트워크, D2D/모바일 애드혹 네트워크, 자원 및 간섭 관리