

하향링크 스몰셀 네트워크 환경에서 최선형 서비스를 위한 분산적인 주파수 재사용 기법

박승영*, 김준영*, 김동회^o

Decentralized Frequency Reuse Scheme Supporting Best-Effort Services in Downlink Small-Cell Network

Seung Young Park*, Joon Young Kim*, Dong Hoi Kim^o

요약

하향링크 스몰셀 네트워크 환경에서 최선형 서비스를 지원해야 할 때, 기존 기법들에서는 각 기지국 기준으로 동일 채널간섭이 가장 적게 수신되는 채널들만을 선택하게 되는데 이 채널들은 해당 기지국에 인접한 사용자의 하향링크 수율 성능만을 향상시킨다. 따라서 기존의 분산 주파수 재사용 기법들은 전체 최선형 서비스 사용자들을 공정하게 지원하지 못한다. 이 논문에서는 하향링크 스몰셀 네트워크 환경에서 기지국으로부터의 거리와 관계없이 최선형 서비스 사용자들의 수율 성능을 공정하게 향상시킬 수 있는 분산 주파수 재사용 기법을 제안한다. 각 기지국은 기존의 분산재사용 기법을 수행하여 주위 기지국들에서 가장 적게 사용되는 채널들을 선택한 다음, 전체 수율 성능의 감소를 줄이면서도 수율성능이 낮은 사용자들의 수율성능을 향상시킬 수 있는 채널들로 일부채널들을 교체한다. 모의실험을 통해 제안된 기법은 수율성능 기준 하위 10%에 해당되는 사용자들의 수율성능을 기존기법에 비해 최대 15% 정도 향상시키면서 전체 수율 성능 감소는 3% 정도 허용함을 확인하였다.

Key Words : 분산 주파수 재사용(decentralized frequency reuse), 스몰셀 네트워크 (small-cell network), 동일 채널 간섭(cochannel interference), 최선형 서비스 (best-effort service)

ABSTRACT

When best-effort traffic users are supported in a downlink small-cell network, conventional schemes assign the channels experiencing low co-channel interference at each base station and provide a better downlink performance to the user near its serving base station, so that conventional schemes are not suitable to fairly support all users. In this paper, we propose a decentralized frequency reuse scheme for a small-cell network, where each basestation chooses a set of channels to fairly support the best-effort traffic users regardless of the distances to their serving basestation. After performing the conventional scheme that each basestation selects the channels which are not used in its adjacent basestations, it updates assigned channels improving the performance of low throughput users in a fully distributed manner with mitigating the overall throughput performance loss. The computer simulation demonstrates that the average throughput performance of the 10th percentile throughput users is improved up to 15% in some case compared to that of the conventional scheme, while allowing the overall throughput loss around 3%.

※ 본 연구는 2011년 연암해외연구교수 지원사업의 지원에 의하여 수행하였음.

♦ 주저자 : 강원대학교 IT대학 전자통신공학과, s.young.park@kangwon.ac.kr, 중신회원

° 교신저자 : 강원대학교 IT대학 전자통신공학과, donghk@kangwon.ac.kr, 중신회원

* Purdue University, School of Electrical and Computer Engineering, kim415@purdue.edu

논문번호 : KICS2012-05-246, 접수일자 : 2012년 5월 12일, 최종논문접수일자 : 2012년 11월 12일

I. 서 론

패킷 손실, 지터 (Jitter), 전송 지연과 같은 서비스 품질 (QoS: Quality of Service) 에 둔감한 웹서비스나 데이터 수신과 같은 최선형 서비스 데이터의 증가와 더불어, 이에 대한 효율적 지원은 최근 많은 관심을 받고 있다¹¹. 구체적으로, 비례적 공정 (PF: Proportional Fair) 스케줄러를 이용하여 주어진 채널들을 복수의 사용자들이 공유하게 한다면 이 데이터를 효율적으로 전송할 수 있다¹². 셀룰러망에서 최선형 서비스 데이터를 효율적으로 전송하기 위해서는 이러한 스케줄러 및 기지국간 채널 재사용 특성을 고려한 주파수 재사용 기법이 필요하다.

마크로 셀룰러시스템의 경우, 셀 가장자리의 사용자는 인접셀로부터 발생하는 높은 동일 채널 간섭 (CCI: Co-Channel Interference) 으로 수율성능의 감소가 심하게 발생한다. 이 문제를 줄이기 위하여, 사용자의 위치에 따라 주파수 재사용율을 조절하는 다양한 주파수 재사용기법들이 제안되었다^{3,4}. 이 기법들은 마크로 셀룰러 시스템에서 기지국이 일정하게 분포되는 환경을 고려하여 개발되었다. 그러나 지속적으로 증가하는 무선서비스 요구를 만족시키기 위해서는, 서비스영역을 작은 영역들로 분할하여 단위영역당 주파수 재사용율을 증가 시키는 스몰셀 네트워크의 도입이 필요하다⁵. 일반적으로 스몰셀 네트워크 기지국의 높이는 마크로셀 네트워크 기지국의 높이보다 낮으며, 전송전력 또한 낮다. 이러한 조건은 무선 전파특성을 더욱 불규칙하게 만들어 전파를 멀리까지 도달하지 못하게 하며, 결과적으로 마크로셀 네트워크에 비해 많은 영역에서 음영손실을 일으킨다. 이 음영손실 영역에 기지국들을 설치해야 하므로 결과적으로 기지국들이 불규칙하게 배치된다. 그러므로 기지국이 일정하게 배치되어 있는 마크로셀 환경에 적합하게 제안된 기존의 주파수 재사용기법은 스몰셀 네트워크 환경에 적합하지 않다⁶. 따라서 스몰셀 네트워크 환경에서는 다양한 기지국 배치를 고려해서 적절히 주파수를 분배할 수 있는 분산적인 주파수 재사용 기법이 효과적이다.

기존의 분산 주파수 할당기법은 주로 각 채널을 단일 사용자에게 할당하는 경우를 고려하였다^{6,9}. 각 기지국은 통화중 절단을 혹은 통화중 차단율을 최소화할 수 있는 채널들을 각 사용자에게 할당해야 한다. 이를 위해 각 기지국은 주변 기지국에서 거의 선택되지 않는 채널들을 적응적으로 선택하고 데이터가 발생할 때마다 선택된 채널들을 순서대로 할당한다. 그

러나 최선형 서비스의 경우 효율적인 전송을 위해 PF 스케줄러를 통해 채널을 공유하여 전송되어야 하므로, 기존의 할당 기법들은 적절하지 않다.

각 기지국들이 분산적으로 CCI 값이 가장 낮은 복수의 채널들을 선택할 때, 스케줄러를 통해 공유하면 하향링크 최선형 서비스 데이터를 효율적으로 전송할 수 있다¹⁰⁻¹². 이 기법에서 각 기지국은 미리 결정되거나 혹은 임의로 선택된 시점에서 주변기지국으로부터 발생되는 각 채널의 CCI 값을 측정하고, 가장 낮은 값을 갖는 복수의 채널들을 선택한다. 이 과정을 분산적으로 여러 번 반복하면 각 기지국들은 상대적으로 낮은 CCI 값이 수신되는 채널들을 선택할 수 있게 된다. 이때, 각 기지국에서 채널 선택의 기준이 되는 각 채널에 수신되는 CCI 는 인접한 기지국들의 신호들로 구성된다. 또한, 해당 기지국 근처에 존재하는 사용자도 이와 유사한 크기의 CCI 값을 수신하게 된다. 따라서 소속 기지국에서 낮은 CCI를 수신하는 채널들을 사용하여 하향링크 전송을 할 경우, 소속 기지국 근처에 존재하는 사용자의 신호 대 간섭비 (SIR: Signal-to-Interference Power Ratio) 성능이 향상될 수 있다. 이에 반해, 소속 기지국으로부터 상대적으로 멀리 떨어져 있는 사용자의 경우, 자신이 수신하는 각 채널별 CCI 전력과 소속 기지국에서 수신되는 각 채널별 CCI 전력이 전혀 유사하지 않다. 따라서 기존 채널선택기법에 의한 해당사용자의 하향링크 SIR 성능향상은 제한적이며 충분한 수율성능향상을 기대하기 어렵다. 때에 따라서는, 소속 기지국에 수신되는 CCI의 전력이 큰 채널을 이용하는 경우, 소속 기지국에서 멀리 떨어진 사용자의 수율성능이 오히려 향상되는 경우도 발생할 수 있다. 따라서 소속 기지국과 사용자의 거리와 관계없이 수율 성능을 공정하게 향상시킬 수 있는 분산적 주파수 재사용 기법이 필요하다. 이 논문에서는, 하향링크 스몰셀 네트워크 환경에서 최선형 서비스 사용자들을 공정하게 지원할 수 있는 분산 주파수 재사용 기법을 제안한다. 모의실험을 통해, 제안된 기법은 기존 기법에 비해 전체 수율 성능 감소를 허용하는 대신 낮은 수율 사용자의 수율 성능을 개선시킬 수 있음을 보였다. 또한 제안된 기법을 실행하는데 있어 필요한 시스템 파라미터들의 변화에 따른 시스템 수율 성능 특성을 보여주었다.

II. 시스템 모델

전체 K 개의 채널 중 M 개의 채널만을 사용하는 기지국들로 구성된 OFDMA 기반의 스몰셀 네트워크를

가정하였다. 또한, OFDMA 기법에서 연속된 부반송파로 구성된 PRB (physical resource block) 을 하나의 채널로 정의하고, 채널내의 모든 부반송파는 동일한 페이딩을 겪는다고 가정한다^[13]. 사용자 n 이 q 번째 프레임에서 기지국 i 의 채널 j 를 통해 수신하는 하향링크 신호의 SIR은 다음과 같이 정의한다.

$$\gamma_{i,n}^{(j)}(q) = \left| \rho_{i,n}^{(j)}(q) \right|^2 \bar{\gamma}_{i,n}^{(j)} \quad (1)$$

여기서, $\rho_{i,n}^{(j)}(q)$ 는 단위 분산값을 갖는 q 번째 프레임에서 발생하는 레일리 페이딩 (Rayleigh Fading) 확률 변수 값이며, 채널, 프레임, 사용자 별로 독립이라 가정한다. $\bar{\gamma}_{i,n}^{(j)}$ 는 해당 하향링크 신호의 평균 SIR이며

$$\bar{\gamma}_{i,n}^{(j)} = \frac{PG_{i,n}}{N_0 + \sum_{i \in S_j, i' \neq i} PG_{i',n}} \quad (2)$$

로 정의된다. 여기서, P 는 각 채널당 전송 전력, S_j 는 채널 j 를 사용하는 기지국 집합, $G_{i,n}$ 는 기지국 i 와 사용자 n 사이의 경로 감쇄 및 음영 손실을 포함한 링크이득, N_0 는 백색잡음의 분산값이다.

채널 j 를 사용자 n 에게 프레임 q 시점에서 할당하는 경우, 이에 해당되는 하향링크 전송신호의 주파수 효율은 다음과 같다.

$$r_{i,n}^j(q) = \log_2 \left(1 + \gamma_{i,n}^{(j)}(q) \right) \text{ (bps/Hz)} \quad (3)$$

또한, 각 사용자에게는 항상 전송 받아야 할 패킷이 존재한다고 가정하는 풀버퍼 (full buffer) 모델을 가정하고^[14-17], 멀티채널 PF 스케줄러를 통해 채널을 할당한다고 가정한다^[2]. 풀버퍼 모델은 실제 최선형 서비스 특성을 반영하는데 한계가 있지만, 수율성능만을 고려하는 경우 분석 및 모의실험을 용이하게 하는 장점이 있다. 이 때, 사용자 n^* 이

$$n^* = \operatorname{argmax}_{n \in \mathcal{U}_i} \frac{\gamma_{i,n}^{(j)}(q)}{\bar{\gamma}_{i,n}^{(j)}} \quad (4)$$

을 만족시키는 경우, 기지국 i 는 채널 j 를 사용자 n^*

에게 프레임 q 시점에서 할당한다^[2,18]. 여기서, \mathcal{U}_i 는 기지국 i 에 소속된 사용자 집합이다. 이 환경에서, 기지국 i 의 채널 j 를 통해 얻을 수 있는 사용자 n 의 하향링크 평균 수율은 다음과 같이 쓸 수 있다^[18].

$$R_{i,n}^{(j)} = \frac{1}{N_i} \int_0^\infty \log_2 \left(1 + x \bar{\gamma}_{i,n}^{(j)} \right) e^{-x} (1 - e^{-x})^{N_i-1} dx \quad (5)$$

여기서, N_i 는 기지국 i 에 속해 있는 사용자 수이다. 식 (5)에서, N_i 와 $\bar{\gamma}_{i,n}^{(j)}$ 는 각 사용자의 평균 수율을 예측하기 위해 필요하다.

III. 기존 분산 주파수 재사용 기법

III 장에서는 주변 기지국에서 가장 낮은 빈도로 사용되는 채널 혹은 기지국을 기준으로 가장 낮은 CCI가 수신되는 채널을 선택하는 기존의 분산 주파수재사용 기법에 대하여 설명한다^[10-12]. 각 기지국은 전체 K 개의 채널 중 임의로 M 개의 채널을 초기 채널로 선택한다. 그 다음 각 기지국은 임의로 선택한 시점에서 모든 채널로부터 수신되는 주변 기지국에 의해 발생하는 평균 CCI 전력을 측정하고, 측정된 CCI 전력이 가장 낮은 M 개의 채널을 새로 선택하는데 이러한 과정을 일정 회수 반복한다. 구체적인 과정은 다음과 같다. 기지국 i 는 임의로 선택한 프레임 시점에서 전송을 중단하고 다른 기지국에 의해 발생하는 CCI 전력을 측정한다. 이때, 기지국 i 의 채널 j 를 통해 수신되는 평균 CCI 전력은

$$I_i(j) = P \cdot \sum_{i' \in S_j, i' \neq i} \mu_i(i') \quad (6)$$

이며, 여기서 $\mu_i(i')$ 는 경로 감쇄와 음영 손실을 포함한 기지국 i 와 기지국 i' 사이의 링크이득이다. 측정된 링크이득을 바탕으로 기지국 i 는 가장 낮은 평균 CCI 전력이 수신되는 M 개의 채널을 선택한다. 식 (6)으로 $I_i(j) \leq I_i(\pi_M)$ 를 만족하는 채널 j 가 선택되며, $\pi = I_i(\pi_1) \leq \dots \leq I_i(\pi_K)$ 를 만족하는 순열이다. 모든 기지국이 이러한 채널 갱신을 1회씩 완료하면 한 번의 과정이 완료되며, 이 과정을 여러 번 반복한다. 이를 통해 각 기지국은 분산적으로 가장 낮은 CCI 전력이 수신되는 채널들을 선택할 수 있게 된다. 각 기지

국이 채널을 갱신하는 시점을 임의로 결정한다면, 두 개 이상의 기지국이 동시에 채널을 갱신하는 상황이 발생할 수 있다. 이 문제를 해결하기 위해, 채널을 갱신하는 기지국의 순서를 각 반복마다 미리 결정한다.

기존의 주파수 재사용 과정이 완료되면, 각 기지국은 가장 낮은 CCI 전력이 수신되는 채널들을 선택하게 된다. 따라서 소속 기지국과 가까운 거리에 존재하는 사용자의 낮은 CCI 전력이 수신되는 채널들은 기지국에서 선택한 채널들과 매우 유사할 것이다. 이 유사성으로 인해 가까운 거리에 존재하는 사용자의 하향링크 SIR 성능은 매우 높은 확률로 향상되고, 해당 사용자의 수율 성능 향상을 기대할 수 있다. 그림 1은 기존 주파수 재사용기법의 흐름도를 보여 주고 있다.

IV. 제안하는 분산 주파수 재사용 기법

4.1. 제안 동기

III 장에서 설명한 바와 같이 기존의 주파수 재사용 기법은 소속 기지국에 가까운 사용자의 수율 성능이 향상되는 특성을 가진다. 그에 반해, 해당 사용자가 수신하는 각 채널별 CCI 전력의 특성은 기지국에서 수신되는 각 채널별 CCI 전력 특성과 매우 상이하기 때문에 소속 기지국으로부터 멀리 떨어진 사용자의 수율 성능이 크게 향상된다고 보기는 어렵다. 소속 기지국에서 낮은 CCI를 수신하는 채널을 사용한다고 해서, 멀리 떨어진 사용자의 하향링크 SIR 성능이 언제나 크게 향상되지는 않는다. 따라서 채널을 선택할 때 소속 기지국으로부터 멀리 떨어진 사용자 (혹은 수율 성능이 낮은 사용자) 의 수율 성능을 고려할 필요가 있다.

이를 위해, 선택된 채널들 중에서 수율성능이 낮은 사용자들의 수율성능에 가장 낮은 기여를 하는 채널의 해당 수율성능과 선택되지 않은 채널들 중에서 해당 사용자들의 수율성능에 가장 높은 기여를 하는 채널의 해당 수율성능을 비교하여 후자가 높다면 해당 채널로 교체하여 사용한다. 이 과정 중에 기지국으로 수신되는 CCI 전력이 상대적으로 높은 채널을 사용하는 경우, 소속 기지국 근처에 존재하는 사용자 (혹은 수율성능이 높은 사용자) 의 수율 성능을 심각하게 감소시키는 문제가 발생하는데 이를 완화하기 위해, 선택되지 않은 채널들 중 상대적으로 CCI가 낮은 채널들만을 대상으로 수율 성능을 비교하여 교체를 허용해야 한다.

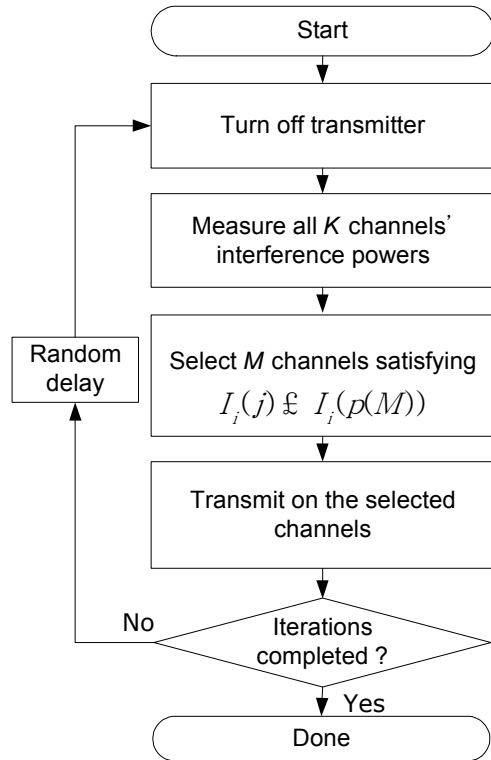


그림 1. 기존 기법의 흐름도
Fig. 1. Flow chart of the conventional scheme.

4.2. 제안 알고리즘

제안 기법은 기존의 주파수 재사용 기법을 통해 선택된 채널들 중 일부만을 교체하여 하위 수율 사용자의 수율 성능을 향상시킨다. 제안 기법은 구체적으로 다음과 같이 동작한다. 기존의 주파수 재사용 기법이 완료되면, 임의로 선택된 프레임 시점에서 기지국 i 는 낮은 수율 사용자들의 성능을 향상시킬 수 있는 채널을 기존 선택 채널들 중 하나와 교환한다. 구체적인 과정은 다음과 같다. \mathcal{A}_i 는 기지국 i 가 선택한 채널들의 집합이라 정의하고, \mathcal{B}_i 는 선택하지 않은 채널들 중 CCI 전력이 상대적으로 낮은 m 개의 채널 집합이라 정의하자. 여기서, $m \leq (K - M)$ 를 만족한다. 이 때, \mathcal{B}_i 에 포함되는 임의의 채널 j 는 다음을 만족한다.

$$j \notin \mathcal{A}_i \text{ 과 } I_i(j) \leq I_i(\varpi_m) \quad (7)$$

여기서 ϖ 는 $I_i(\varpi_1) \leq \dots \leq I_i(\varpi_{(K-M)})$ 를 만족하는 선택되지 않은 채널들에 대한 순열이다.

제안된 기법을 수행하기 위해서는, \mathcal{B}_i 에 존재하는 교체 가능한 채널들로 인한 낮은 수율 사용자들의 수율 성능 변화를 예측할 필요가 있다. 이 수율 성능의

예측을 위해서는 식 (5) 에서 해당 사용자 채널의 하향링크 평균 SIR 값을 측정해야 한다. 이 측정은 다음과 같이 수행할 수 있다. 기지국 i 는 측정하고자 하는 교체 가능채널을 통해 파일럿 신호를 전송하고, 해당 수율성능이 낮은 사용자들은 이를 이용하여 해당 채널의 하향링크 평균 SIR 값을 측정하고 기지국 i 에 보고한다. 이 정보를 이용하여 기지국 i 는 \mathcal{B}_i 에 해당되는 교체 가능 채널들에 대한 낮은 수율 사용자들의 하향링크 수율 성능을 예측할 수 있다. 이를 바탕으로 기지국 i 는 채널 집합 \mathcal{A}_i 와 \mathcal{B}_i 를 다음과 같이 갱신한다. 각각의 채널에 대한 하향링크의 합이

$$\sum_{n \in \mathcal{L}_i} R_{i,n}^{(k^*)} > \sum_{n \in \mathcal{L}_i} R_{i,n}^{(l^*)} \quad (8)$$

를 만족하면, 채널 집합 \mathcal{A}_i 와 \mathcal{B}_i 는 각각,

$$\mathcal{A}_i \leftarrow \mathcal{A}_i \cup \{k^*\}, \mathcal{A}_i \leftarrow \mathcal{A}_i \setminus \{l^*\} \quad (9)$$

$$\mathcal{B}_i \leftarrow \mathcal{B}_i \cup \{l^*\}, \mathcal{B}_i \leftarrow \mathcal{B}_i \setminus \{k^*\} \quad (10)$$

와 같이 갱신된다. 여기서 \mathcal{L}_i 는 기지국 i 에 소속된 수율성능이 낮은 사용자 집합이며, k^* 와 l^* 는 각각

$$k^* = \arg \max_{k \in \mathcal{B}_i} \sum_{n \in \mathcal{L}_i} R_{i,n}^{(k)}, \quad (11)$$

$$l^* = \arg \min_{l \in \mathcal{A}_i} \sum_{n \in \mathcal{L}_i} R_{i,n}^{(l)}, \quad (12)$$

로 정의된다. 또한, 갱신과정 식 (9)와 식 (10)은 m 회 반복되며, 이러한 반복이 완료되면 \mathcal{A}_i 에 존재하는 채널들 중 최대 m 개의 채널들이 \mathcal{B}_i 에 존재하는 채널들과 교체된다. 그 결과,

$$\sum_{n \in \mathcal{L}_i} R_{i,n}^{(k^*)} < \sum_{n \in \mathcal{L}_i} R_{i,n}^{(l^*)} \quad (13)$$

이 만족된다. 위와 같은 갱신과정 식 (9)와 식 (10)이 m 회 반복되면, \mathcal{B}_i 에 존재하는 채널들 중에는 낮은 수율 사용자들의 수율성능을 향상시킬 수 있는 채널이 더 이상 존재하지 않는다.

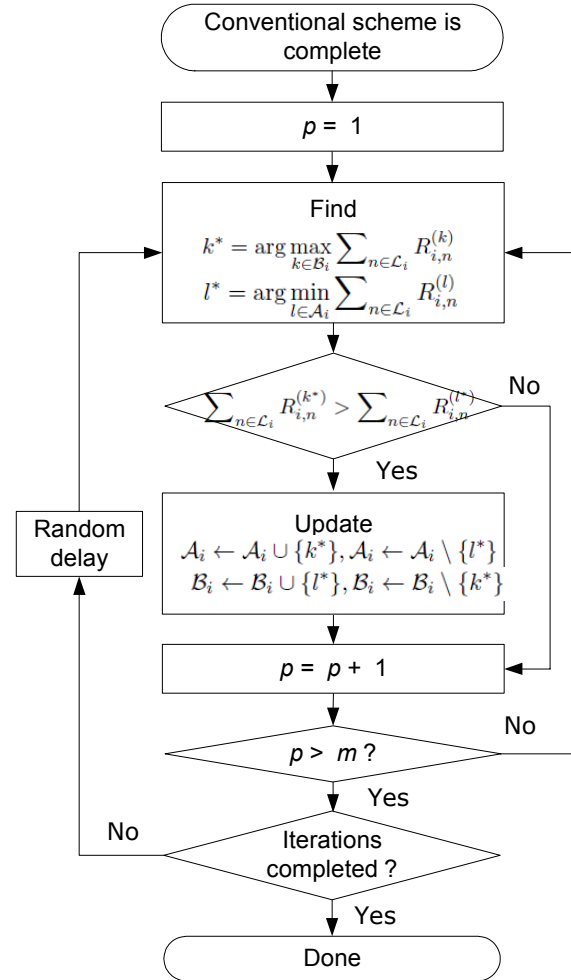


그림 2. 제안된 기법의 흐름도
Fig. 2. Flow chart of the proposed scheme.

이 과정은 모든 기지국이 해당 채널들을 갱신하면 완료되며, 여러 번 반복된다. 이 과정은 상대적으로 CCI값이 높은 채널을 선택하게 되므로 전체 수율 성능의 감소가 발생한다. 채널 갱신으로 인한 전체 수율 성능의 감소를 위해서는 m 값을 줄여야 한다. 구체적으로 식 (7)을 만족하는 \mathcal{B}_i 에 존재하는 교체 가능채널들 중 CCI가 가장 낮은 m 개의 채널들을 선택할 수 있으며, m 값이 작을 경우 선택 가능한 채널들의 CCI 값도 상대적으로 낮다. m 값이 높을 경우에는 좀 더 많은 채널들이 낮은 수율 사용자들의 성능을 높일 수 있는 채널들과 교체될 확률이 증가한다. 따라서 낮은 수율 사용자들의 수율 성능은 향상될 수 있으나, 전체 수율 성능의 감소는 좀 더 심해질 수 있다. m 값이 매우 큰 경우에는 특정 기지국이 낮은 수율 사용자의 수율 성능을 향상시키기 위해 CCI 값이 매우 큰 채널을 선택하는 경우가 발생할 수 있으며, 이 때 인접 기지국들에 소속된 사용자들은 해당채널을 통해 매우 큰

하향링크 CCI 전력을 수신하게 되므로 수율 성능감소가 발생한다. 이는 수율 성능이 낮은 하위수율 사용자들의 수율성능과 전체 수율 성능이 동시에 감소될 가능성을 보여준다. 결론적으로, 전체 수율성능과 하위수율 사용자의 수율성능을 동시에 고려하여 적절한 m 값을 선택해야 한다. 그림 2는 제안 시스템의 흐름도를 보여주고 있다.

V. 모의실험 결과

제안된 기법의 성능 평가를 위해, 각 변이 1000미터인 정사각형 평면에 60개의 기지국이 임의로 분포되어 있다고 가정한다. 또한, 랩어라운드(wrap-around) 구조를 적용하여 평면의 가장자리에 존재하는 기지국의 주변에도 충분한 수의 기지국들이 분포될 수 있도록 한다^[19]. 특별한 언급이 없는 한 720명의 사용자가 존재한다고 가정한다. 이 경우, 기지국당 평균사용자수는 12명이다. 기지국의 전송전력은 24 dBm, 각 채널의 대역폭은 180 kHz로 가정하고, 백색잡음의 전력밀도는 -174 dBm/Hz 로 가정한다^[13]. 기지국과 사용자는 전방향 안테나를 사용한다고 가정하고, 기지국당 전체 채널 개수는 $K = 10$ 으로 가정한다. 이 때, 기지국과 사용자의 거리 d 에 대한 경로감쇄 모델은 다음과 같다.

$$L(d)[dB] = \begin{cases} 39 + 20 \log_{10} d, & 10m < d \leq 45m, \\ -39 + 67 \log_{10} d, & d > 45m. \end{cases} \quad (14)$$

여기서, 기지국과 사용자의 최소거리는 10 m 이다^[20]. 음영손실은 10dB 표준편차를 가지는 대수정규분포를 가진다고 가정하고 역상관성 (de-correlation) 거리는 50미터라 가정한다^[10]. 각 사용자는 링크이득이 가장 큰 기지국을 소속기지국으로 선택한다고 가정한다.

5.1. 제안기법의 수렴

그림 3은 $M = 5$ 과 $m = 3$ 일 때, 반복회수에 따른 하위 10% 수율성능을 가지는 사용자들의 평균 수율 성능을 보여주고 있다. 기지국 i 에 소속된 사용자 n 의 수율은 $\sum_{j \in A_i} R_{i,n}^{(j)}$ 로 정의하였다. 이 경우에서 각각의 선은 임의로 주어진 사용자 및 기지국 분포에 대한 평균 수율 성능을 의미하며, 가로축에서 반복회수 '0'에 해당하는 수율 성능은 기존 주파수 재사용 기법의 수율 성능을 의미한다.

그림 3을 통해, 수 회의 반복을 수행하면 낮은 수율 사용자 성능이 향상되면서 안정화됨을 확인할 수 있다. 따라서 그 다음의 모의실험 결과는 반복회수 5회의 결과를 사용한다. 또한, 평균적인 성능특성을 보기 위하여, 모의실험결과는 100개의 독립적으로 발생시킨 사용자 및 기지국 분포에 대한 평균을 산출하여 정리하였다.

5.2. 교체 가능 채널의 개수

그림 4는 $M = 5$ 일 때 전체 사용자와 낮은 수율성능 사용자의 평균수율 성능을 보여주고 있다. 제안된 기법은 각각 하위 5%, 10%, 30% 수율성능 사용자의 평균수율을 향상시킬 수 있도록 채널을 선택하였다. 또한, 성능비교를 위해 기존의 주파수 재사용 기법과 각 기지국에서 독립적으로 임의의 채널을 선택하는 임의 채널선택 기법의 성능을 추가하였다. 이때, m 은 제안기법에서만 사용하는 매개변수이므로 기존 기법과 임의 기법의 경우 m 값에 관계없이 일정한 성능을 갖는다.

그림 4에서, m 값에 관계없이 제안 기법은 하위수율 사용자의 수율 성능을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 그러나 기존의 IV. 2 장에서 논의한 바와 같이, 적절한 m 값을 선택하지 않으면 상당한 전체 수율 성능 감소가 발생한다. 구체적으로, 낮은 수율 사용자의 성능은 $m = 2$ 혹은 3에서 가장 큰 향상을 얻을 수 있다. 그에 반해, $m = 5$ 일 경우에는 선택되지 않는 5개의 채널들 중에서 갱신 채널을 선택할 수 있다. 즉, 임의의 기지국이 너무 높은 CCI 값을 갖는 채널을 선택하는 경우도 발생할 수 있다. 이러한 채널 선택은 매우 높은 확률로 주변 기지국에 소속된 사용자들의 심각한 성능감소를 발생시킬 수 있으며, 전체 기지국에 대한 전체 수율성능과 낮은 수율 사용자의 수율 성능을 동시에 감소시킨다. IV장에서 논의한 바와 같이 이 문제를 해결하기 위해서, 낮은 CCI 값을 갖는 채널들만 교체가능 채널로 허용할 수 있도록 적절한 m 값을 선택해야 한다.

하위 5%, 10% 수율성능 사용자의 경우 $m = 3$ 에서 가장 높은 성능향상 결과를 얻을 수 있는 것과는 달리, 하위 30% 수율성능 사용자의 $m = 2$ 일 때 가장 높은 성능향상 결과를 얻을 수 있다. 하위 30%의 경우, 각 기지국의 채널 교체 시 고려해야 하는 낮은 수율 사용자들의 수가 상대적으로 많으므로, 임의의 기지국이 채널을 교체하게 되면, 그 주변 기지국에 소속된 많은 수의 낮은 수율 사용자의 성능이 감소될 가능성이 높다. 이 문제를 개선하기 위해서는 교체 가능

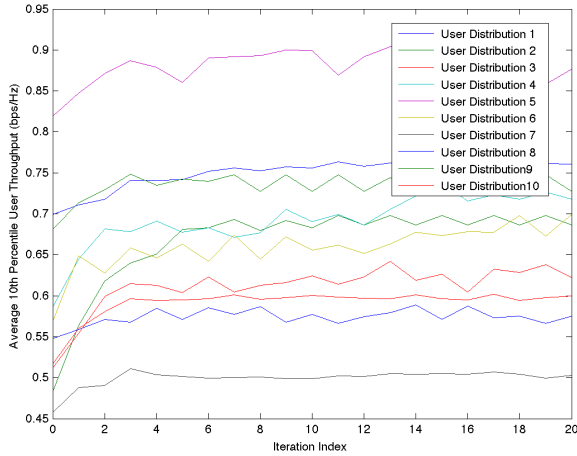


그림 3. 반복 회수에 따른 10% 수율성능을 가진 사용자의 평균 수율 성능 ($M = 5, m = 3$)
 Fig. 3. Average throughput performance of 10th percentile users versus number of iterations for $M = 5$ and $m = 3$.

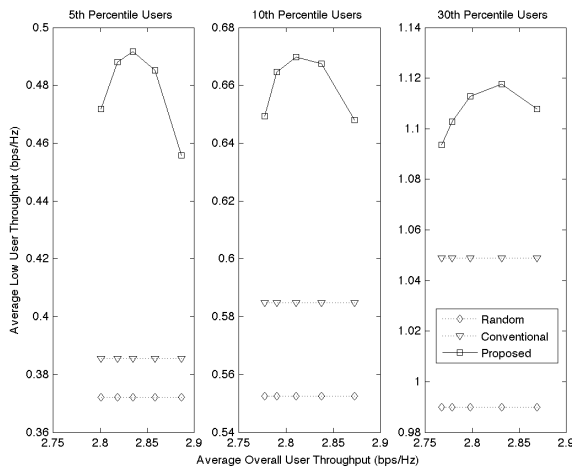


그림 4. 전체 사용자와 하위 수율성능을 가진 사용자의 평균 수율 성능 ($M = 5$)
 Fig. 4. Average throughput performance of all users and low throughput users for $M = 5$.

채널 개수 m 을 줄여야 한다. 이러한 결과를 통해, 전체 사용자 및 낮은 수율 사용자의 수율 성능간의 타협을 위해 적절한 m 값을 사용해야 한다.

5.3. 성능 비교

그림 5는 $M = 5, m = 3$ 인 경우, 전체 사용자 및 낮은 수율 사용자의 평균 수율을 보여주고 있다. 또한, 성능비교를 위해 기존의 주파수 재사용 기법과 각 기지에서 독립적으로 임의의 채널을 선택하는 임의 채널선택 기법의 성능을 추가하였다. 실험결과를 통해, 제안 기법은 하위 10% 수율성능 사용자의 수율 성능을 10% 정도 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

주로 소속 기지국 근처에 있는 사용자의 수율 성능만을 향상시키는 기존 기법과는 달리, 제안된 기법은 전체 수율 성능감소를 일부 허용하는 대신에 낮은 수율 사용자의 성능을 향상시키기 때문이다. 특히 제안된 기법에서 성능을 향상시키려는 해당 사용자들의 수율 성능이 낮을수록 상대적으로 낮은 전체 수율의 성능 감소를 일으키면서 해당사용자들에 대한 큰 수율성능 향상을 달성할 수 있다는 것을 알 수 있다. 하위 5%의 경우, 하위 10%의 경우에 비해 수율 성능을 향상시켜야 하는 사용자들이 소속된 기지국들의 수가 작아지며 상대적으로 매우 작은 수의 기지국들만이 채널을 갱신할 수 있다. 따라서 전체 시스템에서 교체되는 채널 수는 상대적으로 적으며 기존 기법에 의해 선택된 채널들과 제안기법으로 선택된 채널들과의 차이가 작기 때문에 전체 수율 성능감소는 미미하게 된다. 또한, 수율 성능을 향상시켜야 하는 사용자들의 수가 상대적으로 작기 때문에, 해당 기지국들은 이러한 사용자들의 성능을 크게 향상시킬 수 있는 채널을 높은 확률로 찾을 수 있다.

그림 6은 사용채널 개수 M 에 따른 전체 사용자 및 하위 10% 수율 사용자의 평균 수율 성능을 보여주고 있다. 그림 6에서 제안된 기법은 사용채널 개수에 관계없이 하위수율 수율 사용자의 성능을 향상시킨다. 전체 사용자 수율성능은 M 이 증가할수록 증가하는 경향을 보이는데, 이는 소속 기지국 근처에 존재하는 사용자들의 수율성능이 전체 수율성능에 가장 큰 영향을 미치기 때문이다. 이러한 사용자들은 상대적으로 소속 기지국으로부터 수신되는 하향링크 신호의 전력이 간섭전력보다 매우 크므로, M 의 증가로 인한 하향링크 SIR 성능감소가 크지 않으므로, M 에 비례하여 수율성능이 향상된다. 그에 비해, 하위수율 사용자는 M 이 증가하면 수율성능이 처음에는 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보이는데 하위수율 사용자는 상대적으로 소속 기지국과 멀리 떨어져 있으므로, 소속 기지국으로부터 수신되는 하향링크 신호의 전력과 간섭전력의 차이가 그리 크지 않거나 오히려 간섭전력이 더 클 가능성이 높기 때문이다. 따라서 M 이 지속적으로 증가하게 되면 하향링크 SIR 성능의 심각한 감소가 발생하게 되어 수율 성능이 감소된다.

그림 7은 $M = 5$ 일 때 기지국당 평균 사용자수에 따른 전체 사용자와 하위 10% 사용자의 평균 수율 성능을 보여주고 있다. 기존기법 및 임의 선택 기법에 비해 낮은 수율 사용자의 성능이 향상됨을 알 수 있다. 평균 사용자 수가 작을수록 성능향상이 더 증가하는 경향을 보이는데 그 이유는 다음과 같다. 평균 사

용자 수가 작을수록, 성능을 향상시켜야 할 하위 사용자 수도 작아지게 되므로 하위수율 사용자들의 수율 성능을 크게 높일 수 있는 채널로 교체될 가능성이 하위수율 사용자의 수가 많을 때보다 더 클 것이기 때문이다. 낮은 수율 사용자의 성능이 기존 기법 및 임의의 선택 기법에 비해 각각 최대 15%와 22% 정도 향상되었고, 그에 비해 전체 수율 성능은 기존 기법에 비해 3%의 감소만이 발생하였다.

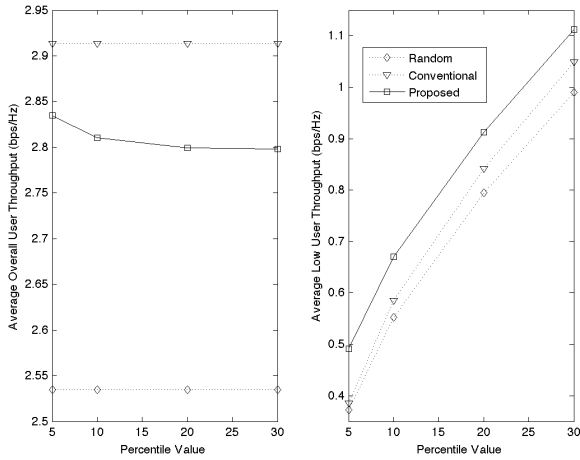


그림 5. 전체 사용자와 하위 수율성능을 가진 사용자의 평균 수율 성능 ($M = 5$, $m = 3$)
Fig. 5. Performance of the average throughputs of all users and the low throughput users for $M = 5$ and $m = 3$.

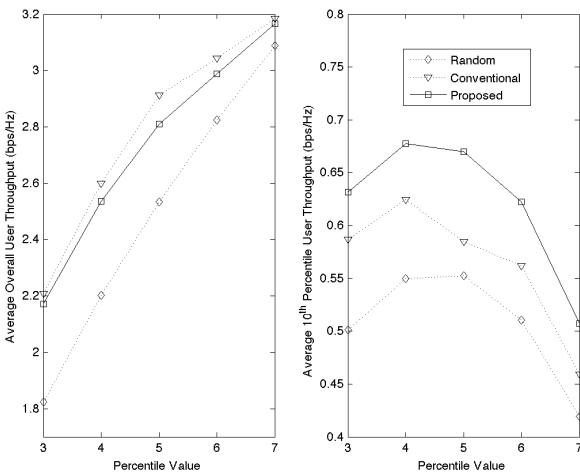


그림 6. 사용되는 채널 개수 M 에 따른 전체 사용자와 하위 10% 수율성능을 가진 사용자의 평균 수율 성능 ($m = 3$)
Fig. 6. Average throughput performances of all users and 10th percentile users versus the number of used channels M for $m = 3$.

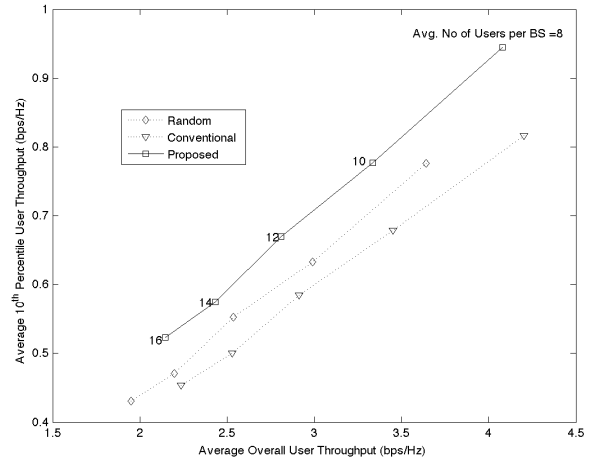


그림 7. 기지국당 평균 사용자 수에 따른 전체 사용자와 하위 10% 수율성능을 가진 사용자의 평균 수율 성능 비교 ($M = 5$, $m = 3$)
Fig. 7. Performance of the average throughputs of all users and the 10th percentile users for $M = 5$ and $m = 3$.

5.4. 동시 채널 갱신

앞선 결과들은 임의의 프레임 시점에서 하나의 기지국만이 채널을 갱신한다는 가정을 사용하였다. 이 경우, 전체 기지국들이 채널을 갱신하기 위해서는 전체 기지국 개수만큼의 프레임 시간이 필요하게 된다. 따라서 전체 기지국의 개수가 증가할수록 채널을 갱신하는 데 걸리는 시간이 증가하므로, 전체 기지국들의 채널갱신에 걸리는 시간을 줄이기 위해서는 복수의 기지국이 동시에 채널을 갱신할 필요가 있다. 동시에 채널을 갱신하게 될 때, 인접한 기지국들은 서로에게 간섭의 영향을 크게 미치게 되므로 적절한 채널을 선택할 수 없게 된다. 그에 반해 상당히 멀리 떨어진 기지국들은 채널 갱신으로 인한 간섭전력의 변화를 무시할 수 있기 때문에 동시 채널 갱신을 허용한다 하더라도 적절한 채널을 선택할 수 있게 된다.

이를 고려하여 수정된 채널 갱신 과정은 다음과 같다. 임의의 기지국이 주어진 프레임 시점에서 채널 갱신 과정을 시작하면, 아직 채널을 갱신하지 않은 기지국들 중 해당 기지국과의 링크 이득이 가장 낮은 $(s - 1)$ 개의 기지국들도 동시에 채널갱신과정을 시작한다. 구체적으로 채널갱신과정을 시작하는 임의의 기지국 i 에 대해 $(s - 1)$ 개의 기지국들 중 하나인 기지국 i' 는

$$\mu_i(i') \leq \mu_i(\omega_{(s-1)})$$

를 만족한다. 여기서, ω 는 $\mu_i(\omega_1) \leq \dots \leq \mu_i(\omega_\eta)$

를 만족하는 순열이며 n 는 아직 채널을 갱신하지 않은 기지국의 수이다.

그림 8은 $M = 5, m = 3$ 일 때, 동시에 채널을 갱신하는 기지국 개수에 따른 전체 사용자와 하위 10% 수율 사용자의 평균 수율성능을 보여주고 있다. 기대한 바와 같이 동시 갱신 기지국 개수 s 가 증가할수록 하위 10% 수율 사용자의 수율성능이 감소되며 제안 기법의 성능이 기존 기법의 성능으로 근접함을 알 수 있다. s 가 작을 경우, 임의의 기지국이 채널을 갱신할 때, 주변기지국에서 수신되는 CCI 전력의 변화가 발생하고 이 변화를 기준으로 인접 기지국들도 채널을 갱신하게 된다. 임의의 기지국의 채널 갱신은 점진적으로 다른 기지국들의 성능에 변화를 미치게 되므로, 기존 기법을 통해 초기에 채널들을 선택하였다 하더라도 갱신과정을 반복하면 기존 기법에서 선택한 채널들과는 상이한 채널들을 선택하게 된다. 그러나 s 가 클 경우, 많은 수의 기지국들이 동시에 채널을 갱신하게 되는데 이는 높은 확률로 주변 기지국들이 동시에 채널을 갱신한다는 의미이다. 이 경우, 채널 갱신 시점에서 주변 기지국들도 아직 채널을 갱신하지 않았기 때문에 CCI 전력의 변화가 발생하지 않고, 대부분의 기지국들은 높은 확률로 채널을 갱신하지 않고 기존기법에서 선택된 채널들을 유지하게 될 것이다. 그 결과, s 가 클 경우, 기존 기법에서 선택한 채널들에서 큰 변화가 없게 되어, 수율 성능이 기존 기법의 수율 성능과 유사하게 된다.

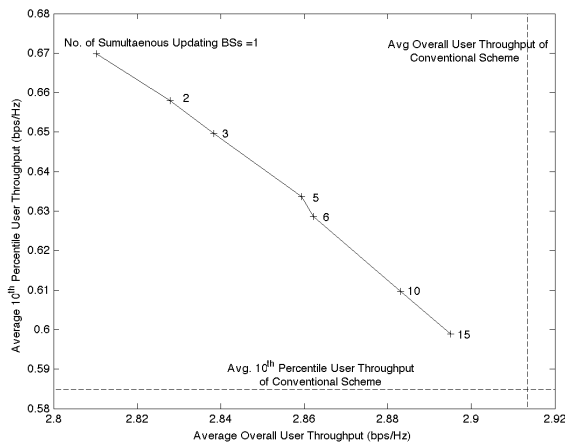


그림 8. 동시에 채널을 갱신하는 기지국 개수에 따른 평균 수율 성능 ($M = 5, m = 3$)
 Fig. 8. Average throughput performance with the number of simultaneous updating basestations for $M = 5$ and $m = 3$.

표 1은 동시 채널 갱신 기지국 수 s 에 따른 기지국 당 평균 교체 채널 개수와 수율 감쇄율을 보여주고 있

다. 기대한 바와 같이 평균 교체 채널 개수는 s 가 증가할수록 (즉, 전체 기지국의 채널 갱신에 걸리는 시간이 감소할수록) 감소하는 경향을 보이며, 수율 감쇄율은 $s = 3$ 일 때를 기점으로 급속히 증가한다. 수율 감쇄율과 채널 갱신 시간을 감안하면 $s = 3$ 일 때 가장 최적의 채널 갱신 시간 및 성능향상을 보여주고 있다.

VI. 결 론

이 논문에서는, 스몰셀 네트워크 환경에서 최선형 서비스 사용자를 위한 분산 주파수 재사용 기법을 제안하였다. 기존의 분산 주파수 재사용 기법은 소속 기지국 근처에 존재하는 사용자의 수율 성능 향상에 유리한 채널만을 선택하는 경향이 있어, 소속 기지국에 멀리 떨어져 있는 최선형 서비스 사용자들을 적절하게 지원 할 수 없는 한계점이 있었다. 이를 해결하기 위해, 제안된 기법에서는 기지국에서 멀리 떨어진 사용자의 성능을 고려한 채널 선택을 수행하였다. 제안된 기법의 효과를 보이기 위해 다양한 채널의 갯수와 채널의 교체 회수를 통해서 각 하위 수율 성능 사용자의 성능향상과 제안된 기법의 전체 성능수율을 모의 실험으로 기존 기법과 함께 분석 하였다. 모의실험을 통해 제안된 기법은 기존기법에 비해 하위 10% 수율 사용자들의 수율성능을 최대 15% 정도 향상시켰으며 전체 수율 성능은 기존 기법과 비교해서 3% 정도 감소했다.

이 논문에서는 스몰셀 네트워크에 있는 모든 사용자들이 고정상태 (stationary condition) 일 때를 가정하고 하위 수율 사용자의 성능변화를 보여주었다. 따라서 추가적으로 사용자들의 이동 및 그로 인한 핸드 오버가 제안된 분산 주파수 재사용 기법의 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 수행할 것이다. 또한, 사용자 이동 시 특정 기지국으로 집중될 경우를 고려하여, 각 기지국의 부하분산에 대한 연구를 수행할 것이다.

표 1. 하위 10% 수율 성능 사용자의 성능 향상을 위해 제안기법을 적용하는 경우 동시 채널 갱신 기지국 수, s 에 따른 기지국 당 평균 교체 채널 개수 및 수율 감쇄율 ($M = 5, m = 3$)

Table 1. Average number of replaced channels per basestation improving the performance of the 10th percentile users for $M = 5$ and $m = 3$.

| s | 1 | 2 | 3 | 5 | 6 | 10 | 15 |
|--------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ave. num. of replaced channels | 1.62 | 1.29 | 1.07 | 0.78 | 0.66 | 0.36 | 0.20 |

| | | | | | | | |
|-------------------------------|---|------|------|------|------|------|-------|
| Throughput reduction rate (%) | 0 | 1.76 | 3.00 | 5.39 | 6.14 | 8.97 | 10.59 |
|-------------------------------|---|------|------|------|------|------|-------|

References

- [1] P. Bender, P. Black, M. Grob, R. Padovani, N. Sindhushayana, and A. Viterbi, "CDMA/HDR: A bandwidth efficient high speed wireless data service for nomadic users," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 38, no. 7, pp. 70-77, July 2000.
- [2] Y. Choi and S. Bahk, "Multichannel wireless scheduling under limited terminal capability," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 2, pp. 611-617, Feb. 2008.
- [3] M. Sternad, T. Ottosson, A. Ahlen, and A. Svensson, "Attaining both coverage and high spectral efficiency with adaptive OFDM downlinks," in *Proc. IEEE Veh. Technology Conf.*, pp. 2486-2490, Orlando, U.S.A., Oct. 2003.
- [4] Y. Xiang, J. Luo, and C. Hartmann, "Inter-cell interference mitigation through flexible radio resource reuse in OFDMA based communication networks," in *Proc. European Wireless*, pp. 1-4, Paris, France, Apr. 2007.
- [5] J. Hoydis, M. Kobayashi, and M. Debbah, "Green small-cell networks," *IEEE Veh. Technology Mag.*, vol. 6, no. 1, pp. 37-43, Mar. 2011.
- [6] Y. Akaiwa and H. Andoh, "Channel segregation-A self-organized dynamic channel allocation method: application to TDMA/FDMA microcellular system," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 11, no. 6, pp. 949-954, Aug. 1993.
- [7] Y. Furuya and Y. Akaiwa "Channel segregation, a distributed adaptive channel allocation scheme for mobile communication systems," *IEICE Trans. Commun.*, vol. 74, no. 6, pp. 1531-1537, June. 1991.
- [8] Y.-Y. Li, M. Macuha, E. Sousa, T. Sato, and M. Nanri, "Cognitive interference management in 3G femtocells," in *Proc. IEEE Personal, Indoor Mobile Radio Commun. (PIMRC)*, pp. 1118-1122, London, U.K., Sep. 2009.
- [9] I. Katzela, "Channel assignment schemes for cellular mobile telecommunication systems: a comprehensive survey," *IEEE Personal Commun.*, vol. 3, no. 3, pp. 10-31, June 1996.
- [10] J. Chuang, "Autonomous adaptive frequency assignment for TDMA portable radio systems," *IEEE Trans. Veh. Technology*, vol. 40, no. 3, pp. 627-635, Aug. 1991.
- [11] J. Ling, D. Chizhik, and R. Valenzuela, "On resource allocation in dense femto-deployments," in *Proc. IEEE Int. Conf. Microwaves, Commun., Antennas Electron. Syst. (COMCAS 2009)*, pp. 1-6, Tel Aviv, Israel, Nov. 2009.
- [12] J. Ellenbeck, C. Hartmann, and L. Berlemann, "Decentralized inter-cell interference coordination by autonomous spectral reuse decisions," in *Proc. European Wireless Conf.*, pp. 1-7, Prague, Czech Republic, June 2008.
- [13] H. Holma and A. Toskala, *LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*, Wiley, 2009.
- [14] Y. Ki and D. Kim, "Packet scheduling algorithms for throughput fairness and coverage enhancement in TDD-OFDMA downlink network," *J. KICS*, vol. 30, no. 7A, pp. 611-619, July. 2005.
- [15] K. Lee, K. Kook, and D. Oh, "Opportunistic packet scheduling method considering QoS requirement in MMR," *J. KICS*, vol. 13, no. 6, pp. 185-296, May 2009.
- [16] Y. Wang, K. I. Perderson, T. B. Sorensen, and P. E. Mogensen, "Carrier load balancing and packet scheduling for multi-carrier systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 5, pp. 1780-1789, May 2010.
- [17] G. Song, "Utility-based resource allocation and scheduling in OFDM-based wireless broadband networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 43, no. 12, pp. 127-134, Dec. 2005.
- [18] Y. Choi and S. Bahk, "Cell-throughput analysis of the proportional fair scheduler in the single-cell environment," *IEEE Trans.*

Veh. Technology, vol. 56, no. 2, pp. 766-778, Mar. 2007.

- [19] J. Zander and S. Kim, *Radio resource management for wireless networks*, Artech House, 2001.
- [20] 3GPP, “*Physical layer aspect for evolved universal terrestrial radio access (UTRA)*,” 3GPP TR 25.814 v7.1.0, 2006.

박 승 영 (Seung Young Park)

1997년 2월 고려대학교 전파공학과 졸업 학사



1999년 2월 고려대학교 통신시스템학과 석사

2002년 8월 고려대학교 전파공학과 박사

2002년 11월~2003년 3월 고려대학교 BK21 정보통신사업단 박사후연구원

2003년 4월~2005년 12월 삼성전자종합기술원 책임연구원

2006년 1월~2007년 2월 미국 퍼듀대학교 박사후연구원

2007년 3월~현재 강원대학교 전자통신공학과 부교수
<관심분야> 이동통신, 다중안테나/다중사용자 통신, 무선자원관리

김 준 영 (Joon Young Kim)



2010년 5월 미국 퍼듀대학교 (Purdue University) 전기컴퓨터공학과 학사

2010년 8월~현재 미국 퍼듀대학교 (Purdue University) 전기컴퓨터공학과 박사 과정

<관심분야> 이동통신, Cognitive Radio 및 Spectrum Management

김 동 회 (Dong Hoi Kim)



1989년 2월 한양대학교 전자통신공학과 학사

1999년 2월 한양대학교 전자통신공학과 석사

2005년 8월 고려대학교 전파공학과 박사

1989년 2월~1997년 2월 삼성 전자 전임연구원

2000년 8월~2005년 8월 한국전자통신연구원 선임연구원

2006년~현재 강원대학교 IT대학 전자통신공학부 교수

<관심분야> 차세대 이동통신 시스템 및 Radio Resource management