

셀룰러 OFDMA 시스템에서 동일 채널 간섭 완화를 위한 대역 분산적 자원 할당 기법

준희원 손준호*, 민태영*, 종신회원 강충구*

Staggered Resource Allocation Scheme for Co-Channel Interference Mitigation in a Cellular OFDMA System

Jun Ho Son*, Tae Young Min* *Associate Members*,
Chung G. Kang* *Lifelong Member*

요약

주파수 재사용도 $K = 1$ 을 사용하는 셀룰러 OFDMA 시스템에서 셀 경계 사용자의 동일 채널 간섭에 의한 수율 저하 문제를 완화하기 위한 대역 분산적 자원 할당 알고리즘을 제안하고, 이에 따른 성능 향상 효과를 분석한다. 본 논문에서 고려한 대역 분산적 자원 할당 알고리즘은 셀 내의 사용자를 경로 감쇄 순서로 내림차순으로 정렬한 후에 각 셀마다 다르게 미리 정해져 있는 자원 할당 영역부터 자원을 할당한다. 셀마다 다른 시간과 공간적인 영역에서 자원 할당을 시작하도록 되어 있으므로 셀 경계의 사용자부터 셀 중앙의 사용자들까지 셀 내 특정 위치의 사용자를 특정 시간대에 배치하여 셀 경계 사용자들이 동시에 같은 자원을 사용하여 간섭이 매우 커지는 경우를 미리 방지하고 셀 내의 사용자들에게 간섭이 평준화되어 고르게 영향을 받도록 한다. 이러한 대역 분산적 자원 할당 방식을 사용하여 셀 경계 사용자의 전송률과 outage 성능이 향상되었음을 확인하였다.

Key Words : Soft Frequency Reuse, Co-Channel Interference, Interference Mitigation, OFDMA

ABSTRACT

We propose the Staggered-zone Resource Allocation (SRA) in order to relax throughput decrease problems by the co-channel interference of the cell boundary users at the cellular OFDMA system using frequency reuse factor $K=1$ and analyze the throughput improvement. The proposed algorithm allocates the resources to the users in compliance with resource allocation rule which is planned in order to minimize co-channel interference between cells without any additional information. The resource allocation method in the SRA lines up the users in pathloss order as descending series, and then allocates from pre-determined resource allocation region where decides differently in each cell. This algorithm prevents the co-channel interferences of the cell boundary user to be caused by using same resource simultaneously and equalizes interference to the users in the cell.

I. 서론

광대역 무선 채널상의 다중 경로에 의해 최대 전송률이 제한되는 것을 극복하기 위해 OFDM 방식이

광대역 이동인터넷 액세스 시스템에 도입 되었으며, 이를 기반으로 한 셀룰러 이동통신 시스템이 구축되고 있다. 하지만 기존 CDMA 방식과 같이 주파수 재사용도 $K = 1$ 의 망 운용을 통해 대역 효율성을 증

* 고려대학교 전자전기공학과 무선정보시스템공학 연구실(sjh3002@korea.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-05-236, 접수일자 : 2008년 5월 23일, 최종논문접수일자 : 2008년 10월 17일

대시키려면 인접한 셀의 동일 채널 사용자로 인한 셀간 간섭(Co-Channel Interference: CCI) 문제를 극복해야 한다. 특히, 적응 변조 및 부호화(adaptive modulation & coding: AMC)를 적용하는 광대역 무선 패킷 시스템에서는 이러한 셀간 간섭으로 인하여 셀 경계에서의 수율이 저하되고 서비스 불능률이 증가하게 되는 주된 원인이 된다. 이러한 CCI에 의한 성능 저하를 해결하기 위하여 부분 주파수 재사용 방식(Fractional Frequency Reuse, FFR)이 연구되어 왔다[1]-[3]. 이와 같은 FFR 방식을 이용하여 IEEE 802.20 MBWA[4]와 3GPP LTE (Long Term Evolution)[5] 등의 표준화에서도 셀 경계에서의 간섭 문제를 해결하기 위한 다양한 접근 방안들이 제시되었다. 한편, FFR의 특별한 형태로 FFR보다 더 높은 효율을 갖기 위하여 셀을 안쪽 영역과 바깥쪽 영역으로 나누어 안쪽영역에서는 모든 주파수 자원을 사용할 수 있도록 만든 Soft Frequency Reuse (SFR) 방식에 대한 연구도 다양하게 이루어졌다[6]-[8].

그러나 이와 같은 FFR이나 SFR 방식은 사용자의 위치를 기반으로 자원을 할당하는 방식으로 CCI를 완화하는 대신 주어진 주파수 대역의 일부를 사용하지 않음으로 인한 대역 효율성의 감소가 있다. 특히, 이러한 위치기반 방식은 셀 내의 사용자의 분포가 균일하다는 가정하에 제안된 방식으로 동일한 영역에 동일한 수의 사용자가 고르게 분포할 경우에 동작할 수 있도록 제안된 방식이다. 그러나 일반적인 경우에 사용자의 수가 무한대가 되지 않는 이상 사용자의 분포는 불균일한 형태를 가지며, 이러한 셀 내에 사용자가 불균일한 분포를 가지게 되면 FFR이나 SFR과 같은 위치 기반 할당 방식은 해당 영역 자원의 낭비 또는 부족 현상을 보이며 전체 수율의 감소로 이어진다.

본 논문에서는 이러한 사용자 분포의 불균형으로 인한 자원 할당의 불균형을 해결하기 위하여 대역 분산적 자원 할당 (Staggered-zone Resource Allocation: SRA) 방식을 제안한다. 제안하는 방법은 상하향링크에서 모두 사용이 가능하며, 다중 셀 환경에서 셀들이 독립적으로 정해진 규칙에 의해 자원을 할당하기 때문에 중앙 제어적인 어떠한 추가적인 메시지도 필요하지 않고, 사용자의 분포나 위치에도 크게 영향을 받지 않는다. 또한 셀내의 모든 사용자가 주어진 모든 자원을 사용하기 때문에 자원의 낭비가 발생하지도 않는다. 특히 상향링크에서 간섭을 효율적으로 제어할 수 있다. 제안하는 SRA 방식은 먼저 전체 셀을 N개의 셀 집합인 클러스터로 구분한다. 클러스

터 내의 셀은 전체 자원을 N개의 시간 영역인 Zone으로 나눈다. 그 후에 셀 내의 사용자를 경로 감쇄 내림 차순으로 배열하여 각 셀마다 이미 다르게 결정되어 있는 시작 영역(start zone)에서부터 자원 할당을 시작한다. 제안된 방법을 통해 클러스터 내의 셀에서는 셀 경계에 있는 사용자가 동일한 시간에 자원을 할당하지 않게 되어 셀 내의 사용자에게 간섭의 영향이 고르게 미치도록 조절하게 되고, 추가적인 복잡도 없이 간섭을 제어하여 효율성을 향상시키게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 동일 채널 간섭 완화를 위한 기법에 대하여 살펴보고, III장에서는 각 방식에 대한 성능을 분석한다. IV장에서는 모의 실험 결과에 따른 성능 분석을 다루며, 마지막으로 V장에서 결론을 맺도록 한다.

II. 동일 채널 간섭 완화를 위한 기법

동일 채널 간섭을 완화하기 위한 방법 중 대표적인 방법으로 IEEE 802.20에서 제안된 FFR과 3GPP LTE에서 제안된 SFR이 있다. 본 절에서는 이러한 방식과 제안하는 SRA 방식에 대하여 알아본다.

2.1 기존에 제안된 동일 채널 간섭 완화 기법

2.1.1 부분 주파수 재사용(FFR)

현재 3GPP2 Ultra Mobile Broadband (UMB)와 규격의 통합을 이룬 IEEE 802.20에서는 CCI를 제어하기 위한 방법으로 FFR 기법을 제안하고 있다. 이는 전체 주파수 대역을 N개의 부대역(subband)으로 나누고 인접한 셀간에 동일한 주파수를 할당하지 않도록 부대역을 분배하는 위치기반 자원 할당 방식이다.

그림 1은 전체 대역을 3개의 부대역으로 분할한 위치 기반 부분 주파수 재사용 방식을 예시하고 있다.

예를 들어, FFR: $K = 2/3$ 의 경우에는 전체 대역을

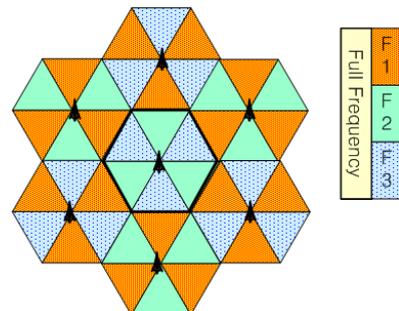


그림 1. 위치기반 부분 주파수 재사용 방식의 예시

3개의 부대역으로 분할하고, 셀을 6개의 구역으로 나누어 이 중에서 2개의 부대역을 6개의 구역에 해당하는 위치에 있는 사용자에게 교대로 자원을 할당하는 방식이다. 이 방법은 인접한 셀에서 마주보는 섹터가 동일한 주파수를 사용하지 않음으로 인하여 셀 경계 사용자의 성능을 높일 수 있는 장점이 있으나, 전체 주파수를 모두 사용하지 않음으로 인한 용량의 감소가 있다.

또한 일정한 영역에 일정한 양의 자원을 할당했으므로 특정 구역에 사용자수가 적고 다른 구역에 사용자가 많이 있게 되는 사용자 분포의 불균형이 있게 되면 자원의 부족 또는 잉여 현상이 발생한다. 이는 해당 위치에 할당된 자원외에 다른 자원을 유동적으로 사용할 수 없는 위치기반 자원 할당의 특성을 나타낸다.

2.1.2 소프트 주파수 재사용(SFR)

3GPP LTE 규격에서는 CCI를 제어하기 위하여 3GPP2 FFR과 유사한 SFR 기법을 제안하고 있다. 이 방식은 그림 2에서 보는 바와 같이 FFR과 동일한 구조와 자원 할당 방식을 갖지만, 셀을 안쪽 셀과 바깥쪽 셀로 구분하여 바깥쪽 셀은 FFR과 유사하게 전체 자원을 분할한 부대역을 할당하고 상대적으로 인접한 셀로부터 간섭의 영향이 적은 안쪽 셀에서는 사용 가능한 모든 대역의 자원을 사용하는 방식이다. SFR이 FFR과 가장 다른 점은 셀 안쪽 영역에서 바깥쪽 영역의 잉여 자원을 빌려서 사용할 수 있다는 점이다. 바깥쪽에 사용자가 적어서 모든 자원을 사용하지 않는 경우 남은 자원을 안쪽 사용자가 사용할 수 있게 되지만, 반대로 바깥쪽 사용자가 많은 경우에는 안쪽의 자원을 빌려오지 못하기 때문에 이 방식도 사용자 분포 불균형에 따른 자원 사용의 효율이 낮아지는 문제를 안고 있다.

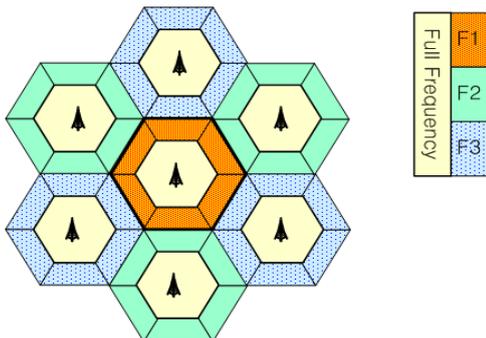


그림 2. 위치기반 소프트 주파수 재사용 방식의 예시

2.2 제안하는 동일 채널 간섭 완화 기법

2.2.1 대역 분산적 자원 할당(Staggered-zone Resource Allocation: SRA)

제안하는 기법은 FFR이나 SFR에서 보인 사용자 분포의 불균형에 따른 자원 효율 감소를 해결하기 위하여 사용자의 분포에 관계없이 할당된 모든 자원을 사용할 수 있도록 하고, 셀내의 사용자를 시간과 공간적으로 구분하여 셀 경계 사용자가 심각한 CCI를 겪는 것을 완화하도록 하는 방식이다. 각 단말은 하향링크의 프리앰블의 수신 세기를 측정하여 피드백하고 기지국은 수신한 프리앰블의 신호세기를 기준으로 이번 프레임에 자원을 할당할 사용자를 경로 감쇄가 큰 사용자부터 내림차순으로 정렬한다. i 번째 셀에서 선택된 사용자가 N 명이 있다고 하면, 이를 다음 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i^{th} \text{ cell_user_index} = [u_{i,1} \ u_{i,2} \ \dots \ u_{i,N}] \quad (1)$$

여기서, 각 사용자 $u_{i,j}$ 의 경로 손실이 $L_{i,j}$ 로 주어졌을 때 $L_{i,1} \geq L_{i,2} \geq \dots \geq L_{i,N}$ 이다. 예를 들어, $u_{i,1}$ 은 i 번째 셀에서 경로 감쇄가 가장 큰 셀 경계 사용자 중의 하나가 될 것이며, $u_{i,N}$ 은 경로 감쇄가 가장 작은 셀 중앙의 사용자에게 해당될 것이다.

한편, 그림 3은 제안하는 시스템의 클러스터 구조 및 프레임 구조를 예시한다. 여기서, 클러스터는 시간 자원을 나누어 사용하는 셀의 집합을 의미하며, 각 셀의 프레임 구조는 시간적 구분 단위인 zone과 주파수 구분 단위인 band로 구분된다. 한 프레임내에서 Zone의 수(Z)는 클러스터 내의 셀의 개수와 동일하며, 각 셀마다 미리 정해져 있는 자원 할당 시작점을 갖는다. Band의 수(L)는 시스템에 따라 다르게 결정되며, 한 사용자는 하나의 zone에서 하나 이상의 band를 할당 받을 수 있다. 스케줄러는 선택된 N명의 사용자를 매 프레임마다 해당 셀에 미리 정해진

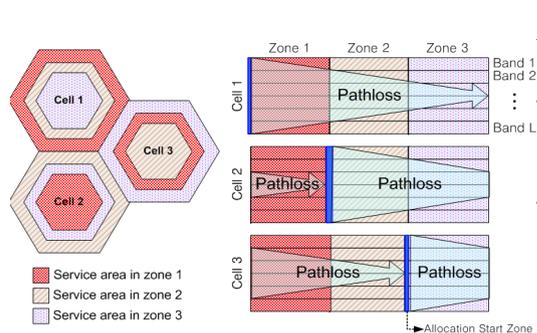


그림 3. 제안하는 SRA Z = 3의 클러스터 및 프레임 구조

자원 할당 영역부터 자원을 할당한다. 그림 3은 3개의 셀이 하나의 클러스터를 구성하고 하나의 프레임에 3개의 zone이 존재하고 ($Z=3$), L 개의 band를 갖는 경우를 예시한 것이다. 시스템 내의 모든 셀에서 다음 (2)와 같이 자원 할당 시작점을 지정한다.

$$allocation_start_zone = (cell_number) \bmod Z \quad (2)$$

그림 4는 $Z=3$ 인 경우 SRA의 자원 할당 방식을 구체적으로 예시한 것이다.

i 번째 셀 내의 사용자 수(N_i)는 셀마다 모두 다를 수 있으며 j 번째 사용자는 전체 L 개의 대역 중에 M_j 개의 대역을 할당 받을 수 있다. 이 경우 i 번째 셀의 j 번째 사용자 $u_{i,j}$ 가 $M_{i,j}$ 개의 자원을 할당 받는다고 하면 $\sum_i M_{i,j} \geq L$ 을 만족하는 j 번째 사용자를 u_{i,L_j} 라 한다. i 번째 셀은 N_i 명의 사용자에 대해 경로 검색이 가장 큰 사용자인 $u_{i,1}$ 부터 시작하여 u_{i,N_i} 까지 순차적으로 각 셀의 자원 할당 시작점부터 자원을 할당한다. 예를 들어 Cell 1의 자원 할당 과정에 대하여 살펴보면 그림 4.(a)의 경우 Cell 1은 자원 할당 시작 영역이 zone 1이므로 사용자 $u_{1,1}$ 부터 u_{1,L_1} 까지 zone 1의 L 개의 band에 할당되고, 그림 4.(2)에서 cell 1은 사용자 $\{u_{1,L_1+1}, \dots, u_{1,2L_1}\}$ 을 zone 2에, 그림 4.(c)는 zone 3 영역에 사용자 $\{u_{1,2L_1+1}, \dots, u_{1,N_1}\}$ 가 할당됨을 보인다. 한편 Cell 2의 경우에는 자원 할당 시작 영역이 zone 2이므로 zone 2에 사용자 $\{u_{2,1}, \dots, u_{2,L_2}\}$ 를 할당하고, zone 3에 사용자 $\{u_{2,L_2+1}, \dots, u_{2,2L_2}\}$ 를 할당한다. 즉, 각 셀의 셀 경계 사용자인 $u_{1,1}$ 은 zone 1, $u_{2,1}$ 은 zone 2, $u_{3,1}$ 은 zone 3에서부터 자원을 할당하게 되어 경로 검색이 가장 큰 셀 경계의 사용자가 시간적으로 다른 zone에서 할당됨으로써 인접한 위치의 셀 경계 사용자가 동일한 시간에 전송하여 서로 간섭을 미치는 것을 회피할 수 있게 한다.

그리고 zone 내에서 자원의 할당은 다음과 같은 절차로 진행된다. 하나의 zone 내에는 L 개의 주파수 대역이 존재하고, 모든 사용자는 수신한 채널 상태를 기반으로 band별로 채널 상태(Channel Quality Indicator: CQI)를 보고한다. 기지국은 $u_{i,1}$ 부터 순차적으로 사용자의 band CQI를 참조하여 가장 채널 상태가 좋은 band를 우선적으로 할당한다. 만약 할당하려는 사용자가 원하는 가장 채널 상태가 좋은 밴드에 할당 가능한 자원이 없을 경우에는 그 다음으로 채널

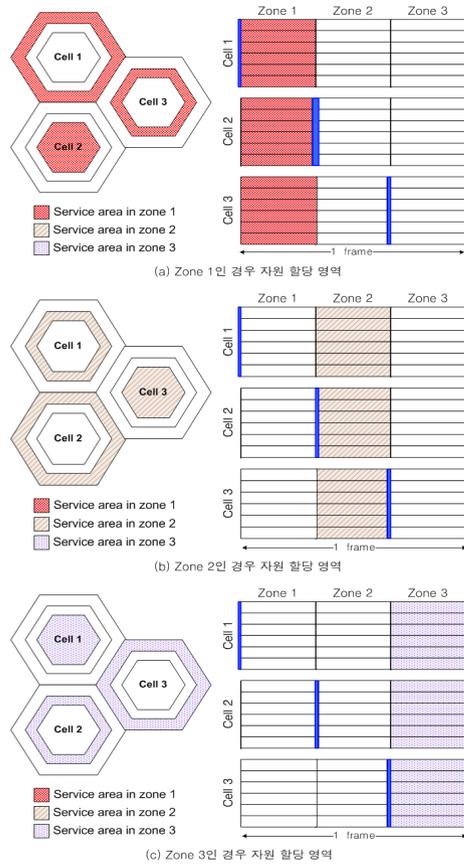


그림 4. SRA 3의 경우 자원 할당 예시

상태가 좋은 밴드에 할당을 한다. 이와 같은 방법으로 여러 사용자를 가능한 채널 상태가 좋은 밴드에 할당을 하고, 만약 해당 zone에 더 이상 할당할 자원이 남아있지 않은 경우에는 그 다음 zone에서 할당을 시작한다.

본 제안방식은 기존 PF등 스케줄링이 제공하던 opportunistic scheduling 이득을 위한 방식과 같이 채널 상태가 좋은 사용자에게 많은 자원을 할당하여 전체 셀 수율을 높이는 목적이 아니라, 전체 셀 영역에 대해 간섭을 균일하게 만들어주며 셀 경계 영역 사용자의 성능을 향상하는데 그 목적이 있다. 제안하는 방식은 셀 내의 사용자 분포가 불균일하더라도 셀마다 정해져있는 자원할당 영역부터 사용자를 채워나가는 방식을 통하여 기존 FFR등의 방식과는 다르게 셀 안쪽에 사용자가 많으면 바깥쪽 사용자에게 할당된 자원을 가져올 수 있고, 셀 바깥쪽에 사용자가 많게 되면 안쪽에 할당되었던 잉여자원을 가져다 사용할 수 있게 된다. 그 결과 자원의 낭비없이 주어

진 모든 자원을 사용할 수 있으며, 셀 부하가 1/3이 하인 경우에는 모든 사용자가 간섭 없이 사용할 수 있으며, 2/3이하인 경우에도 일부의 자원이 인접하지 않은 서로 다른 위치에서 간섭을 미치게 된다.

III. 동일 채널 간섭 완화 기법의 성능 분석

본 장에서는 II장에서 언급된 여러 동일 채널 간섭 완화 기법의 상향링크 성능을 분석하도록 한다. 이때 셀의 구조는 각 할당 방식을 따른다.

3.1 CINR 계산

본 논문에서는 셀의 반경이 R 인 셀을 가정하고 첫번째 tier의 7개 셀에 대한 신호와 간섭에 대한 CINR을 기하학적으로 계산하도록 한다. 그림 5의 예시에서 보는 바와 같이 셀은 Zone의 수(Z)와 같은 layer를 가지며, 기준 셀의 기지국 좌표를 $(0,0)$ 으로 하는 반경 R 인 셀들을 구성하고 해당 주파수를 사용하는 사용자들의 평균 위치로부터 기준 셀의 기지국 까지의 경로 감쇄를 계산한다. 여기서 경로 감쇄 지수는 4로 가정한다. 또한 기준이 되는 단위 거리(r)는 layer1의 한 번의 길이의 절반으로 설정하였다. SRA의 경우 Zone의 수가 3인 셀 모델을 고려하였으며 각 layer에서의 CINR도 다른 값을 갖는다. 또한 FFR과 SFR도 그림 1과 그림 2의 셀 모델을 기준으로 계산하였다. 본 절에서는 계산의 편의를 위하여 상향링크에서 사용자는 셀 내에 균일하게 분포되어 있다고 가정하였고, 평균 경로감쇄는 사용자가 분포할 수 있는 각 i 번째 layer (A_{Ri})내의 한 점 (x,y) 에서 기준 셀의 기지국 $(0,0)$ 까지의 거리에 대한 평균 경로감쇄를 $(1/A_{Ri}) \int_{A_{Ri}} d^4 dx dy$ 으로 구하였다. 단, 이때 모든 layer의 면적이 동일하도록 반지름을 설정하였다($A_{R1} = A_{R2} = A_{R3}$).

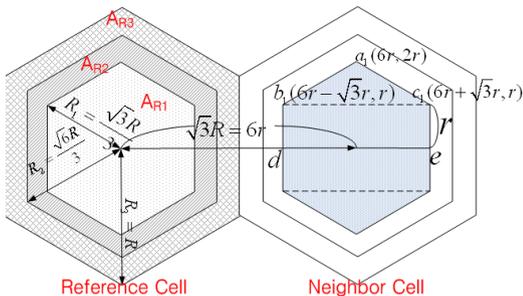


그림 5. SRA Z=3의 경우 셀 분할 모델

3.1.1 FRF K=1인 기존 방식(Integer Frequency Reuse, IFR)의 CINR

셀 내의 모든 사용자의 송신 전력을 P_{Total} 이라고 가정하고, 전력 제어를 하지 않는 경우 모든 사용자는 동일한 송신 전력으로 전송을 한다. 기본적인 CINR 모델은 다음 식(3)과 같다.

$$SINR_k = \frac{S}{I} = \frac{1}{N_{used}} \sum_{s=1}^{N_{used}} \left(\frac{P_s^{(k)} / PL_s^{(k)}}{\sum_{L=k}^{N_{cell}} (P_s^{(L)} / PL_s^{(L)}) + N_0} \right) \quad (3)$$

여기서,

N_{used} 는 전체 부반송파의 수

N_{cell} 은 전체 셀의 수 ($N_{cell} = 7$ 로 가정)

s 는 s 번째 부반송파

L 은 인접한 이웃 셀 index

k 는 기준 셀 index

$P_s^{(k)}, P_s^{(L)}$ 는 각각 k 번째 셀과 L 번째 셀에서 s 번째 부반송파의 송신 전력으로서, 전력제어를 하지 않은 경우 이 두 값은 동일함

$PL_s^{(k)}, PL_s^{(L)}$ 는 각각 k 번째 셀과 L 번째 셀에서 s 번째 부반송파가 겪는 경로손실($PL = d^{-4}$),

N_0 는 thermal noise power를 의미한다.

3.1.2 제안하는 SRA의 CINR

SRA를 사용하는 상향링크 사용자들의 평균 CINR은 다음과 식(4)와 같이 각 셀 계층(tier)에서의 CINR 평균으로 구할 수 있다.

$$SINR_k = \frac{S}{I} = \frac{1}{N_{layer}} \frac{1}{N_{used}} \sum_{r=1}^{N_{layer}} \sum_{s=1}^{N_{used}} \left(\frac{P_s^{(k)} / PL_{r,s}^{(k)}}{\sum_{L=k}^{N_{layer}} \sum_{nl=nl}^{N_{used}} (P_s^{(L)} / PL_{nl,s}^{(L)}) + N_0} \right) \quad (4)$$

여기서,

N_{layer} 는 셀 내 전체 계층의 수를 의미하며, zone의 수와 동일($N_{layer} = 3$),

r 과 nl 은 각각 기준 셀과 이웃 셀에서 s 번째 부반송파가 속하는 계층의 index,

$P_s^{(k)}, P_s^{(L)}$ 는 각각 k 번째 셀과 L 번째 셀에서 s 번째 부반송파의 송신 전력,

$PL_{r,s}^{(k)}, PL_{nl,s}^{(L)}$ 는 각각 k 번째 셀의 r 번째 계층과 L 번째 셀의 nl 번째 계층에서 s 번째 부반송파가 겪는 경로손실,

$N_{co-cell}$ 은 이웃 셀 중에서 동일한 nl 을 사용하는 셀의 수로 다음 (5)와 같이 주어진다.

$$N_{co-cell} = \begin{cases} (N_{cell} - 1) / (N_{layer} - 1) & , N_{layer} > 1 \\ (N_{cell} - 1) & , N_{layer} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

본 논문에서는 zone의 수가 3인 경우(SRA: Z=3)에 대하여 다른 방식과 비교한다.

3.1.3 FFR(Hard FFR)의 CINR

전체 주파수 대역을 N 개의 주파수 대역으로 나누어 이중에 일부를 사용하지 않고, N_{FFR} 개의 주파수만을 사용하는 방식이다. 본 논문에서 고려하는 FFR은 $N=3$ 이고 $N_{FFR}=2$ 인 경우를 고려한다. Hard FFR의 SINR은 다음 식(6)과 같이 계산된다.

$$SINR_k = \frac{S}{I} = \frac{1}{N_{FFR}} \frac{1}{(N_{used} / 3)} \sum_{q=1}^{N_{FFR}} \sum_{s=1}^{N_{used} / 3} \left(\frac{P_s^{(k)} / PL_s^{(k)}}{\sum_{L \neq k} (P_s^{(L)} / PL_s^{(L)}) + N_0} \right) \quad (6)$$

여기서, $P_s^{(k)}, PL_s^{(L)}$ 는 각각 k 번째 셀과 L 번째 셀에 할당된 N_{FFR} 개 주파수 대역 내의 s 번째 부반송파의 송신 전력을 의미하며, 이 경우 각 부반송파의 경로 손실은 $PL_s^{(k)}, PL_s^{(L)}$ 로 나타낸다.

3.1.4 SFR(Soft FFR)의 CINR

셀 중앙에서와 셀 경계에서의 CINR은 각각 다음 식 (7), (8)과 같이 주어진다.

$$SINR_{in,k} = \frac{1}{N_{used}} \left(\frac{\sum_{s=1}^{N_{used} / 3} P_{in,s}^{(k)} / PL_{in,s}^{(k)}}{\sum_{L \neq k} \sum_{s=1}^{N_{used} / 3} (P_{in,s}^{(L)} / PL_{in,s}^{(L)}) + \sum_{L \neq k} \sum_{s=1}^{N_{used} / 3} (P_{out,s}^{(L)} / PL_{out,s}^{(L)}) + N_0} \right) \quad (7)$$

$$SINR_{out,k} = \frac{S}{I} = \frac{1}{(N_{used} / 3)} \sum_{s=1}^{N_{used} / 3} \left(\frac{P_{out,s}^{(k)} / PL_{out,s}^{(k)}}{\sum_{L \neq k} (P_{in,s}^{(L)} / PL_{in,s}^{(L)}) + N_0} \right) \quad (8)$$

여기서,

$P_{in,s}^{(k)}, P_{out,s}^{(k)}$ 는 각각 k 번째 셀의 안쪽 셀(K=1)과 바깥쪽 셀(K=1/3)에서 사용하는 주파수 대역 내의 s 번째 부반송파의 전송 전력을 의미하며, 이 때 해당 부반송파의 경로 감쇄는 $PL_{in,s}^{(k)}, PL_{out,s}^{(k)}$ 로 표시 $P_{in,s}^{(L)}, P_{out,s}^{(L)}$ 는 각각 k 번째 셀을 제외한 L 번째

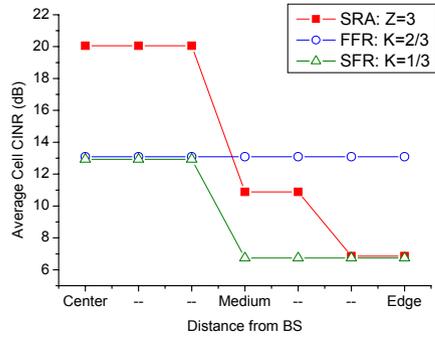


그림 6. 각 방식별 거리에 따른 평균 CINR 계산

셀의 안쪽 셀(K=1)과 바깥쪽 셀(K=1/3)에서 사용하는 주파수 대역 내의 s 번째 부반송파의 전송 전력을 나타내며, 이 때 해당 부반송파의 경로 감쇄는 $PL_{in,s}^{(L)}, PL_{out,s}^{(L)}$ 로 표시된다.

각 동일 채널 완화 기법에서 기준 기지국에 대하여 인접한 모든 셀에서 미치는 평균 간섭에 대하여 해당 계층 별로 계산한 CINR은 그림 6과 같다. 그림 6을 살펴보면 제안하는 SRA방식은 간섭의 완화로 인하여 셀 중앙에서 상당히 높은 CINR을 보이고 있다. 한편, FFR은 1tier에 대하여 셀의 평균 CINR은 동일하며, SFR의 경우는 셀 안쪽 영역과 바깥쪽 영역의 차이가 있다. SFR의 셀 안쪽 영역의 평균 CINR은 FFR의 평균과 비슷하고, 셀 바깥쪽 영역의 평균 CINR은 제안하는 방식의 셀 경계 영역의 CINR과 유사한 계산 결과를 갖는다. 하지만 이 값은 사용된 대역이나 효율성이 고려되지 않은 사용자 위치의 경로감쇄에 따른 CINR값을 표시한 것이다. 다음 소절에서는 계산된 CINR을 이용하여 해당 대역의 효율을 고려한 전송률을 알아보도록 한다.

3.2 Capacity 계산

전송용량의 계산은 Shannon's capacity를 이용하여 계산한다. 전체 대역(B)을 10MHz 한 프레임의 길이(T)를 5ms라고 한다. 또한 한 프레임동안 하향링크 대 상향링크의 비율은 2:1로 하고, 한 프레임은 각 방식에 따라 시간 또는 주파수 단위로 나뉘어 M개의 채널을 구성한다고 가정한다. 따라서 전체 자원 중에 한 개의 채널의 용량은 다음 식 (9)와 같이 표현될 수 있다.

$$C = \left(\frac{BT}{M} \right) \log_2 (1 + SINR) \quad (9)$$

식 (9)에 의해 그림 6에서 계산된 각 layer별 CINR

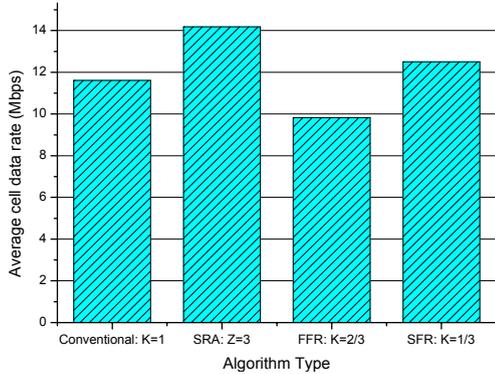


그림 7. 각 방식별 평균 셀 전송률 계산

을 이용하여 각 layer별 용량을 계산하고 그 값을 모든 layer에 대해 평균 셀 전송률을 계산하면 그림 7과 같은 결과를 얻을 수 있다.

계산된 결과를 살펴보면 제안하는 SRA방식이 가장 좋은 성능을 보이며, SFR, 기존 IFR K=1, FFR의 순서로 높은 전송률을 보이고 있다. SFR의 경우에는 기존 K=1보다 다소 우수한 성능을 보이며, FFR의 경우에는 사용 대역이 2/3로 줄어들어 매우 낮은 전송률을 보인다. 앞서 언급한 바와 같이 이 계산 결과는 채널의 영향을 고려하지 않고 평균적인 사용자의 위치에 따른 경로감쇠에 따른 평균적인 CINR을 계산한 것으로 다음 장에서 실제 채널모델과 임의의 사용자 위치를 설정하여 수행한 모의 실험과 그 결과를 비교해보도록 한다.

IV. 모의 실험 결과 및 분석

본 장에서는 동일 채널 간섭 완화 기법에 대한 모의 실험 결과를 살펴보고 분석한다. 시스템 모델은 19개의 기지국이 2점의 정육각형 형태로 배치되어 있는 2tier모델을 가정하며 전체 공간은 가상의 클러스터가 주변에 펼쳐져 있는 것으로 가정하고 모든 단말에는 전송할 패킷이 항상 대기하고 있는 full buffer모델을 가정한다. 19개 셀 내의 단말은 주변의 기지국으로부터의 간섭 정도를 측정하여 기지국으로 보고하고 기지국은 이 값을 바탕으로 단말의 AMC를 결정한다. 채널 페이딩 모델은 ITU-R M.1225 pedestrian B모델을 사용하였고[9], 경로 감쇠는 다음 식(10)의 modified COST231 Hata 모델을 사용한다^[10].

$$\begin{aligned}
 PL(dB) = & (44.9 - 6.55\log_{10}(h_{bs}))\log_{10}(d/1000) \quad (10) \\
 & + 45.5 + (35.46 - 1.1h_{ms})\log_{10}(f) - 13.82\log_{10}(h_{bs}) \\
 & + 0.7h_{ms} + C
 \end{aligned}$$

여기서, 단말과 기지국과의 거리는 $d(m)$, 반송 주파수 $f_c = 2300(Hz)$, 기지국 높이 $h_{bs} = 32(m)$, 단말 높이 $h_{ms} = 1.5(m)$, urban macro모델에서 상수 $C = 3dB$ 로 한다. 모의 실험에 사용된 실험 조건은 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Values
주파수 대역	2.3GHz
시스템 대역폭	10 MHz
단말 전송 전력	23dBm (=200mW)
전체 셀의 수	19
기지국 안테나	omni
프레임 길이	5 ms
전체 서브캐리어 수	768
OFDM 심볼 수 (상향링크)	12
서브채널 당 서브캐리어 수	48
프레임당 서브채널 수	192
스케줄링 방식	Round Robin
채널 모델	Ped-B

모의 실험은 각 방식에 대하여 사용자에게 일정한 양의 자원을 동일하게 할당하고 셀 내 사용자의 분포가 균일한 경우와 셀 내 사용자가 셀 경계 부분으로 몰려있는 불균일 분포의 경우에 대하여 평균 outage와 평균 전송량을 알아보았다. 모의 실험 조건은 5ms의 프레임을 가정하고 3000 프레임동안 사용자의 전송률을 측정하고, 이를 5번 반복하여 평균을 취한 값으로 결과를 얻었다.

그림 6과 그림 7은 각각 셀 내 사용자의 분포가 균일할 경우 평균 outage 확률과 하위 50% 사용자의 sum capacity를 나타내고 있다. 여기서 outage는 전체 사용자에게 대해 평균 전송률이 R_{min} 이하인 사용자의 비율로 계산하였다 ($R_{min} = 20kbps$). 그림 6의 경우를 살펴보면 제안하는 방식은 셀 내의 사용자수가 30명이 될 때까지 outage가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 이는 자원의 유연한 할당이 가능하고 인접한 셀에서 간섭을 미치는 사용자를 일정거리 이상 배치한 결과로 생각할 수 있다. 그러나 사용자 수가 많아지게 되면 한 사용자에게 할당되는 자원의 양이 적어지기 때문에 R_{min} 을 만족하지 못하는 사용자의 수가 늘어난 것으로 보인다. FFR이나 SFR의 경우에는 사용자가 적은 경우에도 outage가 많이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 특히 다른 영역의 남은 자원을 빌려오지 못하는 FFR의 경우에는 매우 큰 outage 확률을 보이고 있다. 그림 7의 경우는 전송률을 기준으로 하위 50% 사용자의 sum capacity를 살펴본 결과이다. 제안하는 SRA 방식이 셀 전체 성능을 올리려는 방

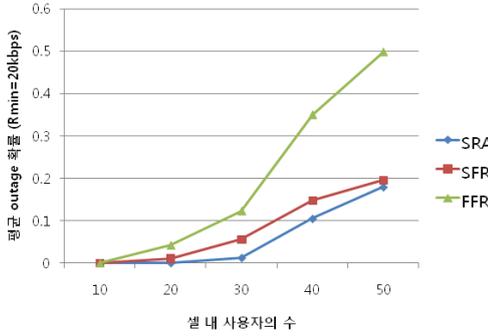


그림 6. 셀 내 사용자 분포가 균일할 경우 평균 outage 확률 (Rmin=20kbps)

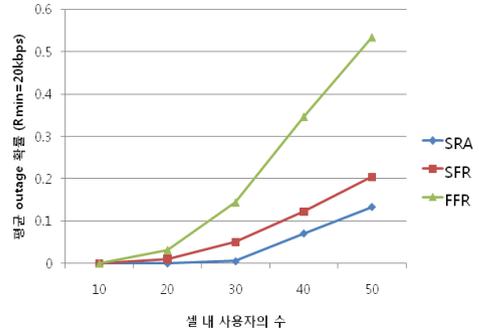


그림 8. 셀 내 사용자 분포가 불균일 할 경우 평균 outage 확률 (Rmin=20kbps)

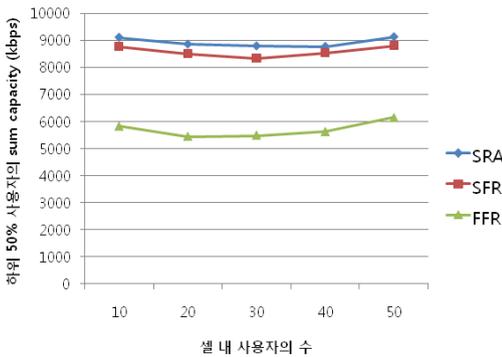


그림 7. 셀 내 사용자 분포가 균일할 경우 하위 50% 사용자의 sum capacity

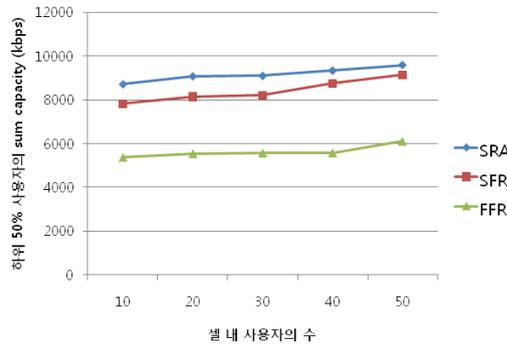


그림 9. 셀 내 사용자 분포가 불균일 할 경우 하위 50% 사용자의 sum capacity

식이 아니라 셀 경계 사용자의 성능 향상을 목적으로 하기 때문에 제안하는 방식이 가장 좋은 성능을 보이고 있으나, SFR과의 성능 차이는 5%정도로 그리 크지 않다. 한편, FFR과는 많은 성능 차이를 보이고 있는데 이는 SRA와 SFR의 특성상 잉여 자원을 다른 영역에서 사용할 수 있는 유연성에 의한 결과로 예상된다. 그림 8과 그림 9는 셀의 안쪽 1/3영역 보다 바깥쪽 2/3영역에 많은 사용자가 몰려있는 불균일한 분포에 대한 모의 실험 결과이다. SFR의 경우에는 바깥쪽에서 사용가능한 자원의 양이 작으므로 제안하는 SRA방식에 비해 하위 50%의 sum capacity는 10%정도 성능 차이를 보였다. outage의 경우도 제안하는 방식은 셀내 사용자의 수가 30명 이하인 경우 거의 outage가 나지 않는 반면 SFR의 경우에는 전체 사용자의 5%정도가 outage가 발생했다. 결론적으로 제안하는 방식은 기존 제안된 방식에 비하여 셀 경계 사용자의 전송률을 증가시키며, 특히 outage 측면에서 상당히 우수한 성능을 보임을 알 수 있었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 셀룰러 OFDMA 시스템에서의 간섭 완화 기법으로서 대역 분산적 자원 할당 방식을 제안하고 기존의 동일 채널 간섭 완화 기법과 성능을 비교 분석하였다. 제안하는 방식을 사용했을 경우 동일 채널 기법 완화 방식을 사용하지 않는 경우 보다 평균 전송률이 향상되고 outage성능이 크게 향상됨을 볼 수 있었다. 이와 같은 동일 채널 간섭 완화 방식을 사용하게 되면 추가적인 제어 절차 없이 OFDMA의 큰 문제점 중에 하나인 셀 경계사용자의 수율 저하를 극복하고 인접한 셀로 미치는 간섭의 양을 조절하여 전체 셀 성능을 향상 시키는 대안이 될 수 있다. 한편, 보다 최적화된 스케줄링과 전력제어가 추가된다면 더 높은 성능을 보일 수 있을 것으로 예상되며, 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

[1] G. Fodor, "Performance Analysis of a Reuse

Partitioning Technique for OFDM Based Evolved UTRA,” *Proc.IEEE IWQoS’06*, pp.112-120, June 2006

[2] Minghai Feng, Lan Chen, and Xiaoming She, “Uplink Adaptive Resource Allocation Mitigating Inter-cell Interference Fluctuation for Future Cellular Systems,” *Proc.IEEE ICC*, pp.5519-5524, June 2007

[3] Ki Tae Kim and Seong Keun Oh, “A Universal Frequency Reuse System in a Mobile Cellular Environment,” *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference*, pp. 2855-2859, April 2007.

[4] MBFDD and MBTDD Wideband Mode: Technology Overview, IEEE standard 802.20 MBWA C802.20-05/68r1, Jan. 2006

[5] Interference Mitigation-Considerations and Results on Frequency Reuse, 3GPP standard TSG RAN WG1, R1-050599, Siemens, June 2005.

[6] Lili LIU, Jianchi ZHU, Xiaofeng TAO, Ying WANG, Ping ZHANG, “A Novel Scheme for OFDMA Based E-UTRA Uplink,” *Proc IEEE WCNC ’07*, pp.1373-1377, Mar. 2007

[7] Xun Yong Zhang, Chen He, Lingge Jiang, and Jing Xu, “Inter-cell interference coordination based on softer frequency reuse in OFDMA cellular systems,” *Proc IEEE Int. Conference Neural Networks and Signal Processing*, pp.270-275, June 2008

[8] Nicola Riato, Federico Serrelli, Andrea Sala, and Antonio Capone, “Interference Mitigation Strategies for WiMAX Networks,” *IEEE ISWCS ’07*, pp.175-179, Oct. 2007

[9] Guidelines for the Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000, Recommendation ITU-R M.1225, 1997

[10] IEEE 802.16m-08_004r2, “Project 802.16m Evaluation Methodology Document (EMD)”, 2008

손 준 호 (Jun Ho Son)

준회원



2000년 8월 경희대학교 전파공학과 졸업
 2003년 2월 경희대학교 전파공학과 석사
 2003년 3월~현재 고려대학교 전파공학과 박사과정
 <관심분야> 광대역 무선 전송 시스템, 이동통신 시스템 모델링 및 분석

민 태 영 (Tae Young Min)

준회원



2006년 2월 고려대학교 전기전자공학부 졸업
 2008년 2월 고려대학교 전파공학과 석사
 2008년 3월~현재 삼성전자 통신연구소 연구원
 <관심분야> 광대역 이동통신 시스템, 멀티 채널 스케줄링

강 충 구 (Chung G. Kang)

중신회원



1987년 6월 Univ. of California (San Diego), 전자공학과 학사
 1989년 6월 Univ. of California (Irvine), 전자 및 컴퓨터 공학과 석사
 1993년 3월 Univ. of California (Irvine), 전자 및 컴퓨터 공학과 박사

1992년 7월~1993년 6월 (미) Aerospace Corp. 연구원
 1993년 3월~1994년 2월 (미) Rockwell International 연구원
 2000년 9월~2001년 8월 (미) Center for Wireless Communication, UCSD 방문 교수
 1994년 3월~현재 고려대학교 전파통신공학과 교수
 2003년 7월~현재 TTA PG05 2.3GHz 휴대인터넷 프로젝트 그룹 부의장/서비스 및 네트워크 실무 반의장
 2005년 1월~2005년 12월 한국통신학회 이동통신연구회 위원장
 2006년 1월~현재 한국통신학회 (상임) 학술이사
 <관심분야> 광대역 무선 전송 기술 및 매체접근 제어 프로토콜 설계/구현, 무선 네트워크(Wireless PAN/LAN/MAN) 제어 프로토콜 설계 및 성능 분석