

# OFDMA 셀룰러 다중홉 네트워크에서 셀 용량을 증가시키는 효율적인 주파수 재활용 방법

정회원 임 성 국\*, 종신회원 전 한 얼\*, 이재용\*

## Effective Frequency Reuse Scheme for OFDMA Cellular Multihop Networks for Improving Cell Throughput with Low Outage Ratio

Sunggook Lim\* *Regular Member*, HahnEarl Jeon\*, Jai-yong Lee\* *Lifelong Members*

### 요 약

최근 스마트폰 및 태블릿 PC가 차세대 통신단말로 급부상함에 따라 멀티미디어 서비스에 대한 사용자의 요구 또한 급격히 증가하였다. 기존의 통신네트워크사업자는 셀 용량의 증설을 위해 값이 저렴한 중계기의 도입을 적극 검토하고 있다. 그러나 중계기의 도입은 셀 내의 간섭을 심화시키고 이는 사용자 서비스 품질에 악영향을 미치며 서비스 불능(outage) 비율을 증가시키게 된다. 본 논문에서는 중계기를 사용하는 다중홉 셀룰러 네트워크에서 OFDMA에 적합한 효율적인 주파수 재활용 방법을 제안하여 서비스 불능 확률을 감소시키면서 동시에 데이터 수율을 증가시키고자 한다. 또한 동적 전력제어를 통해 추가적인 성능향상을 보장하며, 셀 전체의 데이터 수율과 서비스 불능 비율의 비교를 통해 성능을 검증한다.

**Key Words** : Multihop Cellular Network, OFDMA, Frequency Reuse, Relay

### ABSTRACT

Recently smart phone and tablet PC are regarded as the most valuable mobile devices, so the demand of customers for multimedia supporting has been greatly increased. The network operators are now considering the deployment of relay stations ensuring low installation costs for its service cell to improve the cell capacity. Enhancing the relay stations, however, increases intra-cell interference, which is affecting the quality of service and outage ratio. In this paper, we present MPFR(Multihop Partial Frequency reuse) as the new frequency reuse scheme to increase cell throughput while maintaining low outage ratio for the OFDMA cellular multihop networks. Dynamic power control is also introduced to improve cell capacity. Overall cell throughput and outage ratio are observed by the simulation, and comparison between MPFR and conventional multihop frequency reuse schemes is convincing the performance enhancement.

### I. 서 론

유비쿼터스 컴퓨팅을 기반으로 하는 멀티미디어 서

비스에 대한 사용자들의 요구가 늘어남에 따라 미래의 무선 셀룰러 네트워크들은 높은 데이터 수율(throughput)을 필수불가결하게 지원해야 한다. 이러

\* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2010-(C1090-1011-0006))

\* 연세대학교 전기전자공학과 유비쿼터스 연구실 (big92style@yonsei.ac.kr, hearlj@yonsei.ac.kr, jyl@yonsei.ac.kr)

논문번호 : KICS2010-11-550, 접수일자 : 2010년 11월 23일, 최종논문접수일자: 2010년 12월 10일

한 요구조건들을 만족시키기 위해서 일반적으로 2GHz 이상의 높은 주파수에서 광대역이 사용되고 있다. 그러나 높은 주파수 대역에서의 경로손실은 비 가시거리의 특성을 갖는 무선 환경에서 더욱 심화된다. 이에 따라 기지국의 커버리지는 유효한 품질의 무선 링크보장을 위해 기존보다 줄어들게 된다. 셀룰러 네트워크에서 중계기의 도입은 셀의 외곽(edge)에 위치한 사용자들의 전파성능을 향상시킬 수 있으며 적은 비용으로 고용량의 데이터를 전송할 수 있는 커버리지를 증가시킬 수 있다<sup>[1,2]</sup>. 이는 차세대 네트워크에서 반드시 고려해야 하는 커버리지 축소 현상을 해결할 수 있는 방안이다. 위치별 중계기가 도입된 셀룰러 네트워크를 다중홉 셀룰러 네트워크라고 칭한다.

중계기를 도입함으로써 얻는 이점은 크게 두 가지가 있다. 첫 번째로 기지국의 커버리지 내에 있지만 건물들과 같은 지형지물 때문에 전파가 도달하지 못하는 커버리지 홀에 기지국 대신 중계기를 설치함으로써 적은 비용으로 끊임 없는 서비스를 제공할 수 있다. 셀 외곽에 추가적인 중계기들을 설치하여 기지국의 커버리지를 확장시키는 것도 같은 맥락에서의 중계기의 이점이라고 볼 수 있다. 두 번째로 중계기의 포워딩을 통해 사용자에게 도달하는 전파신호의 세기를 증가시켜 데이터 수율을 증가시키는 효과가 있다. 따라서 현재 산업계에서나 학계에서 차세대 고속 네트워크에 대한 대안으로서 다중홉 셀룰러 네트워크에 대한 관심이 증가하고 있다.

중계기를 통한 다중홉 구성을 위해서는 각 중계기에 추가적인 무선 자원을 할당하고 관리해야 하며, 이는 기존 단일홉 셀룰러 네트워크에서는 고려되지 않았던 새로운 문제가 된다. 그러므로 중계기 도입을 통해 커버리지 확대 및 데이터 수율 향상을 도모하기 위해서는 다중홉 셀룰러 네트워크의 특성을 반영한 효과적인 무선 자원 관리방안이 개발되어야 한다.

다중홉 셀룰러 네트워크에서는 기지국이나 중계기 간의 통신에 사용되는 릴레이 링크와 기지국 혹은 중계기와 사용자 단말 간의 통신에 사용되는 액세스 링크로 무선 채널이 구분된다. 사용자입장에서는 사용자 단말이 직접 액세스 링크를 통해 통신을 하게 되는 중계기 혹은 기지국이 액세스 스테이션이 된다. 기존의 단일홉 셀룰러 네트워크에서는 액세스 스테이션이 기지국 하나만 존재했지만 다중홉 셀룰러 네트워크에는 이러한 액세스 스테이션들이 다수 존재하게 된다. 공간적으로 멀리 떨어져 있는 두 개의 송신노드들은 상대적인 간섭이 작기 때문에 같은 무선 자원을 동시에 사용하여 신호 전송이 가능하다. 이러한 특성을

이용하면 하나의 셀 내에서 존재하는 기지국과 중계기들 사이에서도 무선자원의 재활용이 가능하게 된다. 공간적 특성을 이용한 주파수 재활용을 통해 동시다발적인 신호 전송이 증가할수록 시스템 전체적으로 데이터 수율이 증가할 수 있다. 그러나 액세스 스테이션과 같은 송신노드가 증가함에 따라 커버리지 가장 자리에 위치한 수신노드들은 간섭의 심화현상을 겪게 된다. 주파수 재활용 빈도가 증가할수록 스펙트럼의 효율성이 증가하지만 간섭도 같이 증가하는 경향성 때문에 수신신호의 세기가 상대적으로 작은 외곽지역에 위치한 사용자의 신호대간섭잡음비(Signal to Interference plus Noise Ratio)는 주파수 재활용을 함으로써 전반적으로 감소하며, 이에 따라 데이터 전송이 실패할 확률이 증가하게 된다.

다중홉 셀룰러 네트워크에 공간적 주파수 재활용을 도입하려는 연구는 최근에 활발히 발표되고 있다. H. Hu가 제안한 “Pre-configured and Fixed (PreF)” 주파수 할당방안은 중계기가 이웃 기지국들에 할당된 주파수를 재활용하는 방안으로, 일정한 분포와 밀도로 발생하는 트래픽에만 적합하며 주파수 재활용 계수가 4이기 때문에 낮은 효율성을 갖는다<sup>[3]</sup>. “Relaying system with Reuse Partitioning(RRP)”은 전체 주파수 대역을 세 개의 겹치지 않는 부집합으로 나누는 방안을 제시한다<sup>[4,5]</sup>. 각각의 부집합은 기지국간 통신, 중계기간 통신, 사용자 단말간 통신에 각각 할당되며 부집합의 크기를 조절함으로써 링크별로 불균등한 트래픽 분포에도 능동적인 대처가 가능하다. 그러나 기지국-중계기간 링크와 중계기-사용자단말간 링크에서 서로 다른 주파수 대역을 할당하는 것은 비효율적이다. Guan은 “Soft Frequency Reuse(SFR)”의 개념을 PreF 알고리즘에 적용시켜 기존 PreF보다 성능을 향상시킨 “Modified SFR(MSFR)” 알고리즘을 제안하였다<sup>[6]</sup>. Park과 Bahk은 1,4,7과 같이 서로 다른 주파수 재활용 계수를 이용하여 다양한 중계기간 주파수 재활용 패턴을 이용하는 알고리즘을 제안하였다. 그림 1은 대표적인 다중홉 주파수 재활용 패턴을 나타낸 것이다. Orthogonal reuse의 경우 재활용 계수는 7이

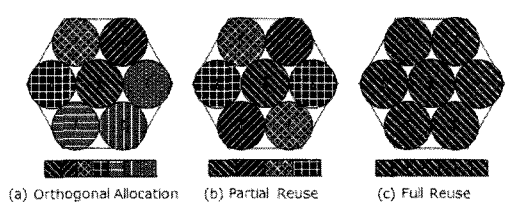


그림 1. 다중홉 주파수 재활용 방법

며 간섭의 영향을 가장 적게 받고, full reuse는 계수가 1로써 스펙트럼 이용 효율은 높으나 간섭이 심화되는 경향을 보인다. 지금까지의 연구들은 서비스 불능 빈도가 낮으면 데이터 수율도 같이 낮고, 데이터 수율을 높이면 그만큼 서비스 불능이 증가하여 서비스 받는 단말의 수가 줄어든다. 따라서 본 논문에서는 MPFR (Multihop Partial Frequency Reuse)을 제안하여 낮은 서비스 불능 비율을 유지하면서도 높은 데이터 수율을 보장하는 방안을 제시하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안하는 알고리즘이 고려하고 있는 시스템 모델에 대해 기술하고, III장에서는 새로운 주파수 재활용 패턴을 제시하고 MPFR의 동작을 과정보로 설명한다. IV장에서는 시뮬레이션을 통해 기존의 다중홉 주파수 재활용 방안들과 성능비교를 하며, 서비스 불능 비율과 데이터 수율과의 관계를 통해 제안한 알고리즘의 성능 향상을 입증한다. 마지막으로 V장에서는 결론과 향후 연구과제에 대해 서술한다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 다수의 육각형 셀로 구성된 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 기반의 2-홉 셀룰러 네트워크를 고려하며 하향링크에서의 자원 관리방안에 대해 연구한다. 2-홉 셀룰러 네트워크의 각 셀의 구조는 그림 2와 같다. 셀 중앙에는 기지국이 위치하며 기지국으로부터 셀 반경의 2/3지점에 고정형 중계기 6개가 설치되어있다. 사용자 단말은 기지국과 직접 연결되어 서비스를 받거나 중계기를 거친 2-hop 연결을 통해 서비스를 받을 수 있으며, 이러한 결정은 중단간 링크의 품질을 계산하여 상대적으로 높은 신호대간섭잡음비를 갖는 경로를 선택하는 SINR-based routing을 통해 정해진다. 신호의 세기만 증폭시켜 재송출하는 기존 중계기와는 달리 본 논문에서 고려하는 스마트 중계기는 decode-and-forward 방식을 사용하여 중계기를 거치

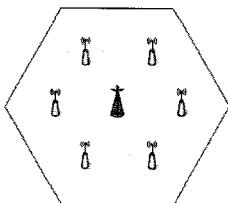


그림 2. 2-홉 셀룰러 네트워크 구조

는 신호의 오류가 증폭되는 것을 방지한다. 기지국과 중계기 그리고 사용자 단말 모두 전방향성 안테나를 사용한다고 가정한다.

송신 전력을  $P_t$ 라고 정의할 때, 수신 신호의 세기  $P_r$ 은 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$P_r = P_t / PL(d)$$

$PL(d)$ 는 거리  $d$ 에 의해 결정되는 경로손실함수이다. 일반적으로 고정형 중계기는 네트워크를 운영하는 사업자에 의해 설치되므로 사전에 기지국과의 위치를 고려하여 건물 옥상과 같은 최적화된 위치에 설치된다. 따라서 기지국-중계기간 릴레이 링크는 가시거리(line-of-sight) 전파환경의 특성을 갖는다. 기지국-사용자단말간 혹은 중계기-사용자단말간 액세스 링크는 사용자 단말의 이동성 때문에 항상 임의의 환경에 놓이게 되므로 비가시거리(non-line-of-sight) 전파환경의 특성을 갖게 된다. 실제 환경과 유사한 채널 환경을 구현하기 위해 다중홉 셀룰러 네트워크를 위한 표준의 하나인 IEEE 802.16j<sup>[11]</sup> 표준화 문서에서 제시한 경로손실모델을 참조한다. Type C 모델은 액세스 링크에, type D 모델은 릴레이 링크에 각각 적용되었다. 또한 OFDMA 프레임도 표준화 문서에 언급된 non-transparent 구조를 따른다. 본 논문에서는 하향링크만을 고려하고 있으며 각 액세스 스테이션들은 할당 받은 부채널의 모든 시간실분을 사용한다고 가정한다.

## III. 제안하는 주파수 재활용 방법 (MPFR)

본 논문에서는 커버리지 외곽에 위치한 사용자 단말의 서비스 불능 확률을 낮추면서 전체적인 데이터 수율을 높이는 다중홉 셀룰러 네트워크에 적합한 주파수 재활용 방안을 제시한다. 커버리지의 외곽은 서비스를 받는 액세스 스테이션으로부터의 거리가 멀기 때문에 일반적으로 수신신호의 세기가 약하며 인접 셀로부터의 간섭의 세기는 가장 강한 위치이므로 신호대간섭잡음비가 낮게 된다. 따라서 셀룰러 네트워크에서 커버리지 외곽에 위치한 사용자 단말은 최소 신호대간섭잡음비 요구사항을 만족시키지 못하게 되어 네트워크의 서비스를 받지 못하는 서비스 불능 상황에 놓일 확률이 높고, 이러한 성능저하는 전체 네트워크 성능의 병목현상을 야기하게 된다.

제안하는 MPFR 알고리즘은 서비스 불능 빈도가 높은 셀 외곽지역을 따로 구분하여 간섭을 회피하기

위한 주파수 할당과 신호대간섭잡음비를 증가시키기 위한 전력제어를 수행하여 시스템 전체적으로 데이터 수율을 높이고 서비스 불능 확률을 낮춰 콜 드롭(call drop)의 가능성을 감소시키고자 한다. 하나의 기지국이 서비스를 담당하던 셀 영역은 중계기를 도입함으로써 각 액세스 스테이션을 중심으로 하는 마이크로셀로 분할된다. 본 논문에서 고려하는 셀 구조에서는 하나의 셀이 7개의 마이크로셀로 분할된다. 마이크로셀은 그림 3에서 보듯 지역적으로 크게 두 부분으로 나뉜다. 마이크로셀  $i$ 의 커버리지 반경을  $d_i$ 라고 할 때, 사용자 단말과 액세스 스테이션까지의 거리가  $\beta d_i$  ( $0 < \beta < 1$ ) 보다 작으면 inner-region, 그렇지 않으면 outer-region에 단말이 위치한다고 판단한다. 여기서  $\beta$ 는 0부터 1사이의 값을 갖는 실수이며 inner-region의 반지름을 결정짓는 역할을 한다. 마이크로셀을 두 개의 region으로 나누는 이유는 셀의 외곽에 위치하는 outer-region에 inner-region과는 다른 주파수 재활용 계수를 할당함으로써 신호간섭을 감소시키고자 하기 때문이다.

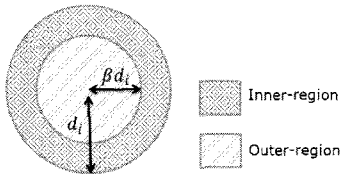


그림 3. 마이크로셀의 구조

### 3.1 $\beta$ 계산

$\beta$ 는 inner-region과 outer-region을 구분 짓는 중요한 파라미터이다. PFR(Partial Frequency Reuse)과 같은 기존 알고리즘들은 셀을 분할할 때

고정된  $\beta$ 를 사용한다. 따라서 사용자 단말의 분포에 상관없이 inner-region과 outer-region은 지리학적으로 고정되게 된다. 이는 특정 region으로 사용자가 집중되어 있을 경우 무선 자원의 효율성이 급격히 감소하는 원인이 된다. MPFR은  $\beta$ 를 사용자 분포밀도에 적응적으로 변화시켜 자원의 효율성을 높이고자 한다. 마이크로셀을 관장하는 액세스 스테이션은 각 사용자들과 자신과의 거리를 신호의 세기로 판단할 수 있다. 이 때 inner-region에 위치한 사용자 단말의 수와 outer-region에 위치한 사용자 단말의 수를 동일하게 유지할 수 있도록  $\beta$ 를 가변적으로 설정한다. 사용자가 셀 간을 이동하거나 전원을 켜고 끄며 따라 바뀌는 분포를 모니터링하여  $\beta$ 가 변화하게 된다. 만약

사용자 단말이 균일하게 분포되어 있으면  $\beta$ 는 대략 0.707이 된다.

### 3.2 대역폭 할당

주파수 재활용을 하지 않을 경우 주파수 대역은 7개의 슬롯으로 나뉘어져 각각의 액세스 스테이션(기지국 1대, 중계기 6대)에 할당된다. MPFR에서는 위와 같이 균등하게 분할된 7개의 슬롯 중 3개는 inner-region에 할당하고 나머지 4개는 outer-region에 할당한다. Inner-region의 주파수 재활용 계수는 1로 설정하여 할당받은 3개의 주파수 대역 슬롯을 모든 액세스 스테이션의 inner-region에서 공유한다. Outer-region은 주파수 재활용 계수를 4로 설정하고, 그림 4에서 보듯이 네 개의 그룹으로 구분지어서 인접한 액세스 스테이션의 outer-region과 동일한 주파수 대역을 사용하지 않도록 각 그룹별로 한 개의 주파수 대역 슬롯을 할당한다. 주파수 재활용 계수가 작을수록 더 많은 액세스 스테이션들과 동일한 주파수 대역을 공유한다는 의미를 갖는다. 결과적으로 inner-region과 outer-region은 3:1의 비율로 주파수 대역을 할당받게 된다. 불균등한 주파수 대역 분배는 inner-region의 간섭의 양이 outer-region보다 많기 때문에 충분한 주파수 대역을 할당하여 이를 보상하고자 하기 때문이다.

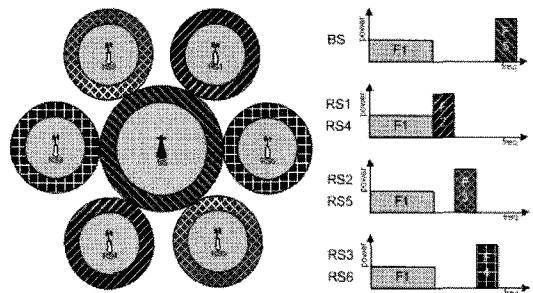


그림 4. 주파수 재활용 패턴

### 3.3 전력 제어

마이크로셀의 inner와 outer에 대한 구분이 이루어진 후 각 region에 대역이 할당된 후에는 추가적으로 전력을 할당해야 한다. 기지국이나 중계기는 사용할 수 있는 최대 송신 전력이 정해져 있기 때문에 inner-region과 outer-region의 특성에 맞게 효율적으로 분배하여 할당해야 한다. Inner-region에 위치한 사용자 단말은 할당받은 주파수 대역이 넓은 대신 주파수 재활용 계수가 낮아 간섭의 영향을 많이 받는다. 반면에 outer-region에 위치한 사용자 단말은 가용한 주파수 대역은 inner-region의 단말보다 좁으나 주파

수 재활용 계수가 높아 간섭의 영향을 적게 받는다. 이렇게 상반되는 특성을 갖는 inner-region과 outer-region에 위치한 단말들은 하나의 셀에 의해 서비스를 받는 것과 유사한 공정성(fairness)을 보장받아야 한다. 본 논문에서는 데이터 수율의 관점에서 공정성을 다음과 같이 정의한다.

$$BW_{N_{edge}|B_i^{in}} \log(1 + \gamma_{N_{edge}|B_i^{in}}(P_{B_i^{in}})) = BW_{N_{edge}|B_i^{out}} \log(1 + \gamma_{N_{edge}|B_i^{out}}(P_{B_i^{out}})) \quad (1)$$

$N_{edge}|B_i^{in}$ ,  $N_{edge}|B_i^{out}$ 는 각각  $i$ 번째 기지국  $B_i$ 의 inner-region과 outer-region의 최외곽에 위치하는 사용자 단말을 의미하고,  $BW_{N_x}$ 와  $\gamma_{N_x}$ 는 단말  $N_x$ 가 할당받은 주파수 대역폭과 신호대간섭잡음비를 지칭한다.  $P_x$ 는 단위 주파수 대역에 할당된 송신 전력 세기이다. 식 (1)은 inner-region과 outer-region의 최외곽 단말간의 데이터 수율이 동일해야 함을 나타내고 있으며, 이를 통해 마이크로셀 내에서의 region간 공정성을 보장할 수 있다. 중계기의 inner-region  $R_j^{in}$ 와 outer-region  $R_j^{out}$ 의 최외곽 단말들인  $N_{edge}|R_j^{in}$ ,  $N_{edge}|R_j^{out}$ 에 대해서도 위 식은 성립해야 한다.

셀 내에 존재하는 단말이 제공받을 수 있는 가장 낮은 성능을 예측하기 위하여 최외곽 지역에서의 성능을 측정한다. 일반적으로 최외곽 단말은 지역적인 위치를 고려하여 액세스 스테이션으로부터 가장 멀리 떨어진 단말로 정의한다. 그러나 주변 지형지물이나 건물들로 인한 다중경로감쇠나 셰이딩과 같은 무선 채널의 특성으로 인해 지리적으로 가까운 곳에 위치한 단말이 상대적으로 먼 거리에 있는 단말보다 열악한 전파환경을 겪을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 셀 내에서 신호대간섭잡음비가 가장 낮은 사용자 단말을 논리적인 최외곽 단말로 아래와 같이 정의한다.

$$N_{edge}|x = \underset{N_k|x}{\operatorname{argmin}} \gamma_{N_k|x} \quad (2)$$

, where  $x \in \{B_i^{in}, B_i^{out}, R_j^{in}, R_j^{out}\}$

액세스 스테이션  $x$ 는 독자적인 전력제어를 통해 식 (1)을 만족시킬 수 있도록 송신 전력값  $P_x$ 를 조절한다. 분산 처리되는 전력제어를 통해 각 액세스 스테이션의 송신 전력이 바뀌게 되면 네트워크내의 사용자 단말에 도달하는 간섭의 세기도 같이 변화하게 된다. 따라서 주기적으로 전력제어 과정을 수행함으로써

변화된 신호대간섭잡음비를 반영하여 동적으로  $P_x$ 를 업데이트할 수 있다.

$I_k$ 를  $k$ 번째 단말에서 측정된 간섭의 크기라고 정의하고,  $g(x, k)$ 는 액세스 스테이션  $x$ 로부터  $k$ 번째 단말까지의 채널이득일 때 식 (1)은,

$$\left( 1 + \frac{P_{B_i^{in}} g(B_i^{in}, N_{edge}|B_i^{in})}{I_{N_{edge}|B_i^{in}} + N_0} \right)^3 = 1 + \frac{P_{B_i^{out}} g(B_i^{out}, N_{edge}|B_i^{out})}{I_{N_{edge}|B_i^{out}} + N_0} \quad (3)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $N_0$ 는 잡음 전력 스펙트럼 밀도(noise power spectral density ratio)이며 간섭의 크기가 상대적으로 매우 클 경우 이 값은 무시될 수 있다. 또한 액세스 스테이션  $x$ 는 송신할 수 있는 최대전력  $\overline{P_x}$ 가 제한되어 있으나 셀룰러 기반의 네트워크에서 데이터 수율을 최대화하기 위하여 가용한 모든 송신 전력을 사용한다고 가정한다. 총 송신 전력의 제한조건을 수식으로 정의하면 식 (4)와 같으며, 여기에 실제 대역할당비율을 적용하면 식 (5)로 정리된다.

$$BW_{N_{edge}|B_i^{in}} P_{B_i^{in}} + BW_{N_{edge}|B_i^{out}} P_{B_i^{out}} = \overline{P_{B_i}} \quad (4)$$

$$3P_{B_i^{in}} + P_{B_i^{out}} = \overline{P_{B_i}} \quad (5)$$

식 (3)과 (5)를 이용하여 기지국  $i$ 는 독자적으로 inner-region과 outer-region에 할당해야 할 송신 전력 세기인  $P_{B_i^{in}}$ 과  $P_{B_i^{out}}$ 를 구할 수 있다. 동일한 과정을 통해 중계기  $j$ 도  $P_{R_j^{in}}$ 과  $P_{R_j^{out}}$ 를 계산할 수 있다.

표 1. 변조 및 코딩 세트 테이블

최소 SINR(dB)	변조방법	Coding rate
-3.46	QPSK	1/12
-1.0	QPSK	1/6
1.73	QPSK	1/3
5.40	QPSK	1/2
10.5	16-QAM	1/2
15.0	64-QAM	1/2
20.0	64-QAM	2/3
28.5	64-QAM	5/6

### 3.4 신호대간섭잡음비 분석\*

MPFR에서 전력제어시 필요한 정보인 채널이득  $g(x, k)$ 와 간섭의 세기  $I_k$ 는 사용자 단말이 측정할 값을 이용하면 된다. 기지국의 inner-region은 동일 셀에 설치된 6개의 중계기의 inner-region 및 주위의 이웃 기지국들 및 해당 기지국에 설치된 중계기들의 inner-region과 주파수 재활용한다. 분석을 위해 이웃 기지국은 2-tier까지 존재한다고 가정하면, 전체 토폴로지는 19개의 셀로 이루어지게 된다. Inner-region의 간섭에 영향을 미치는 기지국과 중계기의 수는 많지만 사용자 단말과 액세스 스테이션 사이의 거리가 가깝기 때문에 경로손실이 약하여 높은 신호 세기를 수신할 수 있다. 기지국의 outer-region은 주파수 재활용을 오직 이웃 기지국의 outer-region과 하기 때문에 중계기의 outer-region에서 측정된 간섭보다 작은 값을 갖는다. 식 (6)은 기지국  $i$ 의 inner-region이나 outer-region에 존재하는 임의의 사용자 단말  $N_k$ 에서 측정되는 신호대간섭잡음비를 수식으로 나타낸 것이다.

중계기의 inner-region은 기지국과 마찬가지로 이웃의 모든 마이크로셀로부터 간섭을 받는다. Outer-region은 기지국의 경우와는 다르게 각 이웃 셀의 두 개의 마이크로셀로부터 간섭을 받는다. 기지국  $i$ 에 설치된 중계기  $j$ 에서의 신호대간섭잡음비는 식 (7)로 표현된다.

## IV. 성능평가

제한한 MPFR의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하

고자 한다. MPFR은 전력제어의 효과를 알아보기 위하여 inner-region과 outer-region의 단위 주파수 대역에 할당된 전력이 1:3로 고정되었을 때와 동적 전력제어를 할 때로 구분지어 시뮬레이션이 수행되었다. 고정된 전력제어를 수행하는 경우  $\beta$ 는 0.707로 변하지 않는다. 토폴로지는 2-tier로 이루어진 19개의 육각형 셀이 wrap-around 구조로 구성되어 있으며 각 셀은 반지름이 1,200미터이다. 경로 손실 모델은 표준편차  $\sigma$ 가 8dB인 log-normal 웨도잉이 고려되었으며 기지국과 중계기의 최대 송신 전력은 각각 20W, 10W이다. 각 액세스 스테이션들은 항상 보낼 데이터가 대기열에 존재한다는 full-buffer 모델을 따르며 AMC (Adaptive Modulation and Coding)를 적용하여 신호대간섭잡음비의 크기에 따라 변조방법을 달리한다. 표 1은 AMC에 사용되는 변조 및 코딩 세트를 테이블로 나타낸 것이다. 시뮬레이션의 물리계층은 IEEE 802.16j 표준을 참고하였다<sup>[14]</sup>. 1024 FFT를 사용하는

OFDMA/TDD 시스템이며 2.3GHZ 주파수에서 8.75MHz의 대역을 사용한다. 각 프레임은 5ms의 타임슬롯을 갖는 42개의 OFDM 심볼로 이루어져 있다.

그림 5는 기존 주파수 재활용 방법들과 MPFR의 서비스 불능 분포를 보여준다. 서비스 불능 비율은 셀 내에 분포된 전체 사용자 단말 중 신호대간섭잡음비가 최소요구사항을 만족하지 못하는 단말이 차지하는 비율로 정의한다. 중계기를 사용하지 않았을 경우에는 셀 외곽지역에 주로 서비스 불능이 발생하는 반면 중계기가 도입된 (b)~(f)의 경우에는 중계기를 포함하는 각 마이크로셀의 외곽지역을 따라 서비스 불능이 주

$$\gamma_{N_k|B_i^{in}} = \frac{P_{B_i^{in}}g(B_i^{in}, N_k|B_i^{in})}{\sum_{\substack{j=1 \\ R_j \in B_i}}^6 P_{R_j^{in}}g(R_j^{in}, N_k|B_i^{in}) + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^{19} \left( P_{B_m^{in}}g(B_m^{in}, N_k|B_i^{in}) + \sum_{\substack{n=1 \\ R_n \in B_m}}^6 P_{R_n^{in}}g(R_n^{in}, N_k|B_i^{in}) \right) + N_0},$$

$$\gamma_{N_k|B_i^{out}} = \frac{P_{B_i^{out}}g(B_i^{out}, N_k|B_i^{out})}{\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^{19} P_{B_m^{out}}g(B_m^{out}, N_k|B_i^{out}) + N_0} \quad (6)$$

$$\gamma_{N_k|R_j^{in}} \Big|_{j=1, \dots, 6} = \frac{P_{R_j^{in}}g(R_j^{in}, N_k|R_j^{in})}{P_{B_i^{in}}g(B_i^{in}, N_k|R_j^{in}) + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq j}}^6 P_{R_n^{in}}g(R_n^{in}, N_k|R_j^{in}) + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^{19} \left( P_{B_m^{in}}g(B_m^{in}, N_k|R_j^{in}) + \sum_{\substack{n=1 \\ R_n \in B_m}}^6 P_{R_n^{in}}g(R_n^{in}, N_k|R_j^{in}) \right) + N_0},$$

$$\gamma_{N_k|R_j^{out}} \Big|_{j=1, \dots, 6} = \frac{P_{R_j^{out}}g(R_j^{out}, N_k|R_j^{out})}{\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i}}^{19} P_{R_j^{out}}g(R_j^{out}, N_k|R_j^{out}) \Big|_{R_j \in B_m} + \sum_{m=1}^{19} P_{R_{j \pm 3}^{out}}g(R_{j \pm 3}^{out}, N_k|R_{j \pm 3}^{out}) \Big|_{R_{j \pm 3} \in B_m} + N_0} \quad (7)$$

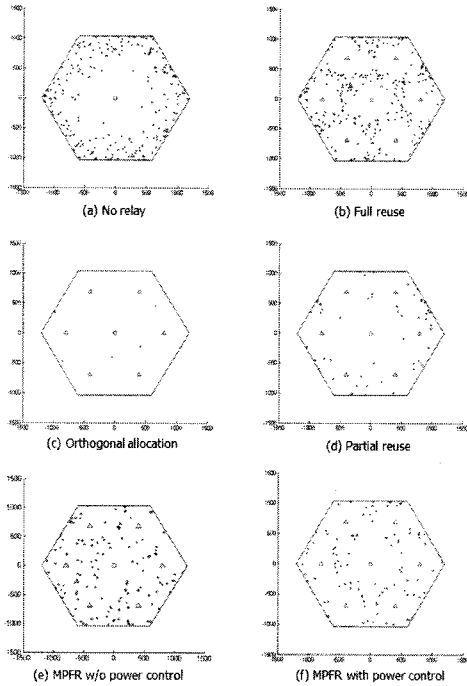


그림 5. 서비스 불능 분포 (단말수=1,000개)

로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 *outer-region*에 대한 고려가 있어야 외곽지역에서 주로 발생하는 서비스 불능 비율을 줄일 수 있다.

셀 내의 단말 수가 증가함에 따른 서비스 불능 비율의 변화는 그림 6에 나타나있다. 단말 수가 증가해도 전체적인 서비스 불능 비율의 변화는 크지 않으며 중계기를 사용하지 않았을 때와 *full reuse* 했을 때의 서비스 불능 비율이 가장 높은 것을 볼 수 있다. 이는 중계기를 사용함에도 모든 대역을 공유하는 *full reuse*의 특성상 간섭이 증가하기 때문이다. *Orthogonal reuse*의 경우는 서비스 불능이 거의 발생하지 않는 데 이는 주파수 대역의 직교성을 이용하여 인접 마이크로셀간의 간섭이 없기 때문이다. 동적 전력제어를 하는 *MPFR*의 경우는 고정 전력을 사용하는 *MPFR*의 경우보다 50% 낮은 서비스 불능 비율을 보장하며 이는 *partial reuse*에 근접한 값을 갖는다.

그림 7은 1,000개의 사용자 단말이 셀에 분포되어 있을 때 신호대간섭잡음비의 누적분포함수를 나타낸다. 서비스 불능 비율의 결과와 유사한 경향을 보이며 주파수 재활용 계수가 높을수록 신호대간섭잡음비도 높아짐을 확인할 수 있다. *MPFR*의 전력제어를 통해서도 신호대간섭잡음비의 이득을 얻을 수 있다. 각 사용자 단말이 서비스 받는 데이터 수율은 그림 8에서

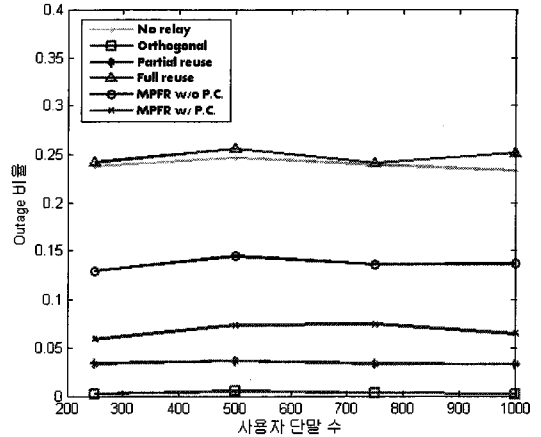


그림 6. 단말 수에 따른 서비스 불능 비율

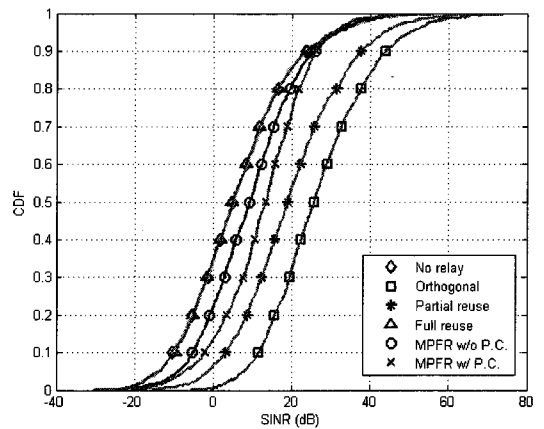


그림 7. 신호대간섭잡음비 누적분포함수(단말수=1,000개)

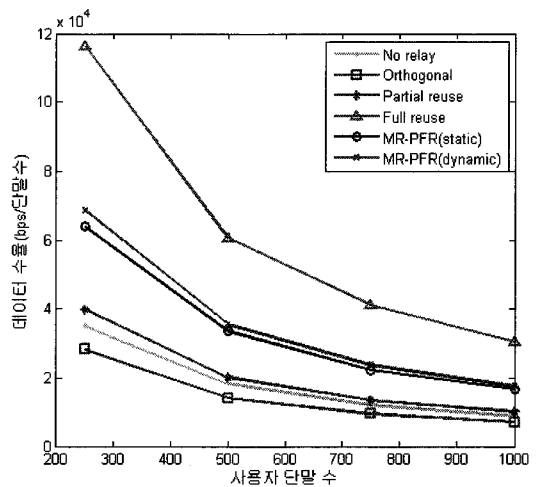


그림 8. 사용자 단말 당 데이터 수율 (bps/단말수)

보듯 신호대간섭잡음비의 경향과 일치하지는 않는다. 주파수 재활용 계수가 높을수록 스펙트럼 이용 효율

이 저하되기 때문에 데이터 수율도 낮아지며 셀 내의 사용자가 증가할수록 이와 같은 감쇠현상은 더욱 심화된다. MPFR은 가장 높은 스펙트럼 이용 효율을 갖는 full reuse 방안 다음으로 높은 데이터 수율을 보장하며, 동적 전력제어를 사용할 때가 조금 더 나은 성능을 보여준다.

그림 9는 셀 전체의 데이터 수율과 서비스 불능 비율과의 관계를 사용자 단말수를 변화시켜가며 확인한 그래프이다. 셀 내의 사용자 수의 변화에도 전체적인 데이터 수율 및 서비스 불능 비율은 변하지 않는다. 기존의 다중홉 주파수 재활용 방안들과 고정된 전력을 할당한 MPFR은 데이터 수율과 서비스 불능 비율 간에 선형적인 상보관계(trade-off)를 보여준다. 이는 데이터 수율을 높이려면 그만큼 서비스 불능 비율을 희생해야 함을 의미한다. 그러나 동적 전력제어를 하는 MPFR의 경우는 선형적 상보관계에서 벗어나 낮은 서비스 불능 비율을 유지하면서도 높은 데이터 수율을 보장해준다. 이로써 주변상황을 반영한 전력제어가 성능의 향상에 많은 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있다.

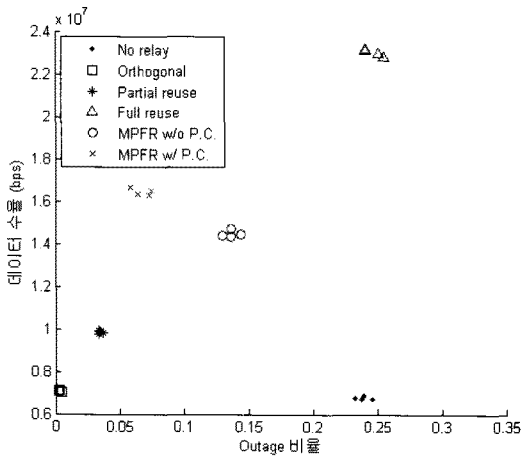


그림 9. 서비스 불능 비율과 데이터 수율 관계

### V. 결 론

본 논문에서는 중계기가 도입된 다중홉 셀룰러 네트워크에서 서비스 불능 빈도를 감소시키면서 데이터 수율을 증가시킬 수 있는 주파수 재활용 방안을 제안하였다. 기존의 다중홉 주파수 재활용 방안들은 데이터 수율과 서비스 불능 비율간에 선형적 상보관계를 갖기 때문에 동시에 성능을 향상시킬 수 없고 하나의

성능을 희생해야 다른 한쪽의 성능을 향상시킬 수 있는 한계가 있었다. 제안한 MPFR은 마이크로셀 구조를 도입한 새로운 주파수 재활용 패턴을 적용하여 간섭을 감쇠시키고 동적 전력제어를 통해 낮은 서비스 불능 비율을 유지하면서도 높은 데이터 수율을 보장한다. 또한 고정형 전력제어와 동적 전력제어의 시뮬레이션 결과를 비교함으로써 동일한 주파수 재활용 패턴에서도 효율적인 전력제어가 성능향상을 위해 필수적임을 증명하였다.

### 참 고 문 헌

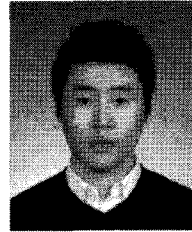
- [1] Sreng V. M., Yanikomeroğlu H., Falconer D. D. "Coverage enhancement through two-hop relaying in cellular radio networks", Proc. IEEE WCNC 2002. Orlando, USA: IEEE Press, 2002.
- [2] R. Pabst et al., "Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio", IEEE Comm. Mag. 42 (9) (2004) 80 - 9.
- [3] H. Hu, H. Yanikomeroğlu, D. Falconer and S.Periyalwar, "Range extension without capacity penalty in cellular networks with digital fixed relays," in Proc. IEEE Global Communications Conf. (GLOBECOM), Dallas, Texas, Nov. 2004, pp.3053-3057.
- [4] T. Liu, M. Rong, P. Li, D. Yu, Y. Xue and E. Schulz, "Radio resource allocation in two-hop cellular relaying network," in Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC), Melbourne, Australia, May 2006, pp.91-95.
- [5] T. Liu, M. Rong, H. Shi, D. Yu, Y. Xue and E. Schulz, "Reuse partitioning in fixed two hop cellular relaying network," in Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf. (WCNC), Las Vegas, NV, April 2006, pp.177-182.
- [6] L. Guan, J. Zhang, J. Li, G. Liu and P. Zhang, "Spectral efficient frequency allocation scheme in multihop cellular network," in Proc. IEEE Vehicular Technology Conf. (VTC), Baltimore, MD, Sep. 2007, pp.1446-1450.
- [7] W. H. Park and S.Bahk, "Resource management policies for fixed relays in cellular networks," in Proc. IEEE GLOBECOM 2006, December 2006, San Francisco, California.



- [8] K. Park and et al. "The Performance of Relay-Enhanced Cellular OFDMA-TDD Network for Mobile Broadband Wireless Services", EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Volume 2009, Article ID 261815, 10 pages.
- [9] L. Wang, Y. Ji, F. Liu, and J. Li, "Performance Improvement through Relay-Channel Partitioning and Reuse in OFDMA Multihop Cellular Networks," in IEEE IWCMC proceedings, pp.177-182, Aug 6-8 2008.
- [10] S. Lee, S. Lim, H. Kim and J. Lee, "Outage reduction through efficient frequency reuse scheme for OFDMA based multihop cellular networks," International Conf. on Information Networking (ICOIN), Busan, Korea, Jan. 2010.
- [11] G. Senarath, W. Tong, P. Zhu et al., "Multi-hop relay system evaluation methodology (channel model and performance metric)", IEEE C802.16j-06/013r3, Feb. 2007, <http://ieee802.org/16/relay/>.
- [12] Y. Xiang, J. Luo and C. Hartmann, "Inter-cell Interference Mitigation through Flexible Resource Reuse in OFDMA based Communication Networks", Proceedings of European Wireless Conference, 2007.
- [13] Hyunduk Jung, Eunhyun Kwon, Inkeun Cho, Sungook Lim and Jaiyong Lee, "Dynamic Resource Allocation in Cellular Radio Networks with Downlink Relaying," ICOIN 2008, Busan Korea
- [14] IEEE Std 802.16j-2009, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. Amendment 1: Multihop Relay Specification"

임 성 국 (Sungook Lim)

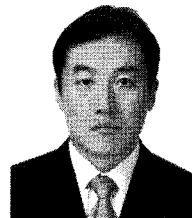
정회원



2005년 2월 연세대학교 전기  
전자공학부  
2008년 3월~현재 연세대학교  
전기전자공학과 석박통합과정  
<관심분야> 차세대 통신망, 릴  
레이 시스템, 자원 관리,  
QoS Management, Wireless  
Multihop Network

전 한 얼 (HahnEarl Jeon)

중신회원



1995년 2월 연세대학교 전자  
공학과  
1997년 8월 연세대학교 전자  
공학과 석사  
2003년 3월 연세대학교 전기전  
자공학과 박사  
2003년 3월~2004년 2월 연세

대학교 차세대방송기술 연구센터 연구교수  
2004년 7월~2008년 2월 방송위원회 연구위원  
2009년 3월~현재 연세대학교 차세대RFID/USN 연  
구센터 연구교수  
<관심분야> QoS Routing, Wireless Sensor  
Network, Wireless Multihop Network

이 재 용 (Jaiyong Lee)

중신회원



1977년 2월 연세대학교 전자  
공학과  
1984년 5월 IOWA State  
University 공학석사  
1987년 5월 IOWA State  
University 공학박사  
1987년 6월~1994년 8월 포항  
공과대학 교수

1994년 5월~현재 연세대학교 전자공학과 교수  
<관심분야> Protocol Design for Wired/Wireless  
QoS Management, Ubiquitous Sensor Network,  
Wireless Multihop Network