

OFDM-TDD 기반 이동 릴레이 시스템을 위한 다중 셀 분산형 릴레이 전력 제어 방법

Distributed Relay Power Control Scheme for Multi-cell OFDM-TDD Based Mobile Relay System

조영민*, 박정훈*, 황승계*, 김동구*

Young-Min Cho*, Jeong-Hun Park*, Seung-Gye Hwang*, and Dong-Ku Kim*

요 약

본 논문에서는 이동성을 갖춘 릴레이를 도입한 다중 셀 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)-TDD (Time Division Duplex) 시스템에서 각 셀의 수율을 개별적으로 최대화시키기 위한 분산형 이동 릴레이 전력 제어 방식 (Distributed Mobile Relay Power Control; DMRPC)을 제안한다. DMRPC 방식을 사용한 릴레이 시스템에서는 서로 다른 셀 간 협력과 그에 따른 시그널링 오버헤드 없이 각 셀에서 개별적으로 릴레이의 전력 레벨을 제어한다. DMRPC 방식을 사용한 시스템이 전력 제어 없이 릴레이를 사용한 최대 전력 릴레이 시스템과, 릴레이를 사용하지 않은 기존 시스템에 비하여 향상된 셀 수율 성능을 보이는 것을 모의 실험을 통하여 검증한다. 또한, 최대 전력 릴레이 시스템이 기존 시스템에 비해 셀 외곽 지역 평균 수율 성능이 떨어지는 반면, DMRPC 방식을 사용하면 기존 시스템에 거의 근접한 셀 외곽 지역 평균 수율 성능을 얻을 수 있는 것을 보인다.

Abstract

In this paper, a distributed mobile relay power control (DMRPC) scheme for maximizing individual cell throughput is proposed for mobile relay aided multi-cell orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)-time division duplex (TDD) system. In the system with DMRPC, the power levels of relay's are controlled by individual cell without cell cooperation and signalling overhead. It is demonstrated by numerical simulation that DMRPC provides the better cell throughput performance than either the full power relay aided system or conventional system without relay does. Moreover, it is also shown that relay aided systems with DMRPC, and the conventional system have almost identical cell edge throughput, while full power relay aided systems show worse performance in cell edge throughput.

Key words : IEEE 802.16j, Mobile Relay, Relay Power Control, OFDM, DMRPC

I. 서 론

IEEE 802.16j Mobile Multihop Relay (MMR)은 기존의 802.16e 시스템에 이동성을 갖춘 릴레이를 추가하

* 연세대학교 전기전자공학과 이동통신연구실(Mobile Communication Lab., Electrical and Electronics Eng., Yonsei University)

· 제1저자 (First Author) : 조영민

· 접수일자 : 2011년 6월 21일

· 심사(수정)일자 : 2011년 6월 21일(수정일자 : 2011년 8월 12일)

· 게재일자 : 2011년 8월 30일

여 전체적인 셀 수율 및 외곽 지역 수율을 높이는 방안들을 연구할 목적으로 시작된 Task group 이다[1]. 시스템 내에 릴레이를 도입한 후 적절한 자원 관리 기법을 동원하여 셀 외곽지역과 셀 내의 음영지역에서의 성능을 보장하면서, 셀 수율 성능을 증가시키기 위한 연구들이 진행되었다[2]. 하지만, 주파수 자원을 적절하게 분배해주는 문제 이외에, 각 릴레이의 전력을 직접적으로 제어하는 경우에 관한 연구는 활발하지 않았다. 특히, 같은 셀 내에서 기지국과 릴레이가 공동된 주파수 대역을 사용하여 별도의 사용자를 서비스하는 경우의 연구는 거의 전무하다시피 하다. [2]에서는 Non-transparent (NTR) 구조를 사용할 때, 직접 링크(Direct link)와 릴레이 링크의 두 번째 홉 전송이 동시에 이루어지면서 발생하는 셀 내부 간섭을 해결하기 위해, 간단한 on-off 전력 제어 방식을 제안하였다. 하지만, 위 연구는 모든 셀의 모든 릴레이의 전력을 동시에 고려하는 방식이다. 이 때, 셀 당 릴레이의 숫자가 증가할수록, 전력 집합을 비교하기 위한 계산량이 기하급수적으로 증가하게 되는 문제점이 발생하므로 실제로 구현하기가 어렵다. 따라서 문제 정형화와 최적화 문제 해법을 사용해서 이론적으로 접근하여 릴레이의 전력 레벨 단계를 늘리면서, 전력 집합을 비교할 때 계산량을 줄일 수 있는 방식을 연구할 필요가 있다.

본 논문에서는 한 프레임 내에서 기지국과 릴레이가 사용자를 한 명씩 선택하고, 선택된 사용자에게 기지국 또는 릴레이가 사용할 수 있는 모든 부반송파를 할당해 주는 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)-TDD (Time Division Duplex) 기반의 시스템 모델에서 기지국 전력이 고정되어 있을 때, 분산형 방식의 릴레이 전력 제어 방식 (Distributed Mobile Relay Power Control: DMRPC) 에 대해서 논의한다. 릴레이는 decode-and-forward (DF) [2] 방식으로 동작한다. 분산형 방식은 크게 두 가지 의미를 지닌다. 첫째로, 각 셀 내의 릴레이들이 자신이 속한 셀의 기지국으로부터 받은 정보를 활용해서 스스로 자기 전력을 제어한다는 의미이다. 둘째로는, 릴레이 자신이 다른 셀의 사용자들에 미치는 간섭 효과를 고려하지 않고, 자신이 속해 있는 셀의 평균 수율만 고려해서 이를 최대화 하도록 전력을 결정한다는 의미이다.

이는 셀 내부에서 기지국 직접 링크와 릴레이 링크 사이에 발생하는 간섭을 우선적으로 제어하는데 주안점을 두고 있다. 분산형 방식은 서로 다른 셀 간의 협력이나 정보 교환을 위한 시그널링 오버헤드가 필요하지 않으므로 실제적인 상황에서 구현 가능성이 높다. 그리고 [2]에 비해서, 비교하는 전력 레벨 단계가 늘어나서 세분화된 전력 조절이 가능하다는 장점이 있다. 그러면서도 각 릴레이가 같은 셀의 다른 릴레이에 관여하지 않고, 독립적인 분산형 방식으로 동작하므로 릴레이 개수가 증가함에 따른 계산량에 대한 부담도 [2]에 비해 적다. 분산형 시나리오에 맞도록 문제를 정형화하여 개별 셀 수율을 최대화할 수 있는 릴레이의 전력을 결정하는 방법을 알아보고, 모의실험을 통해서 셀 수율 및 셀 외곽 지역 수율의 두 가지 척도에서 분산형 전력 제어 방식의 효용성에 대해서 검증한다.

II. 시스템 모델

2-1 OFDM-TDD 프레임 구조

본 논문에서는 릴레이가 도입된 다중 셀 OFDM-TDD 시스템을 가정한다. 이 시스템은 802.16j 표준 모델[4]에 기반을 두고 있지만 릴레이의 전력을 제어하는 방법을 효과적으로 개발하기 위한 간략화된 모델이다. 본 논문에서는 하향 링크만을 고려한다. 그림 1에 시스템의 하향 링크 프레임 구조가 잘 나타나 있다. 프리앰블 구간 및 DL-MAP 등의 제어 채널은 생략하고 데이터 전송용 구간만 표시하였다.

기지국에서 전송하는 프레임을 기지국 부 프레임, 릴레이에서 전송하는 프레임을 릴레이 부 프레임이라고 부르기로 한다. 기지국 부 프레임은 시간축에서 하향 링크 접속 영역 구간(DL access zone) 과 하향 링크 릴레이 영역 구간(DL relay zone) 으로 나누어진다. DL access zone은 기지국과 사용자간 직접 링크 전송이 발생하는 구간이다. DL relay zone은 다중 홉 전송과정에서 기지국에서 릴레이까지의 첫 번째 홉 전송이 발생하는 구간이다. 릴레이 부 프레임에서 DL access zone은 릴레이가 기지국으로부터 받은 데

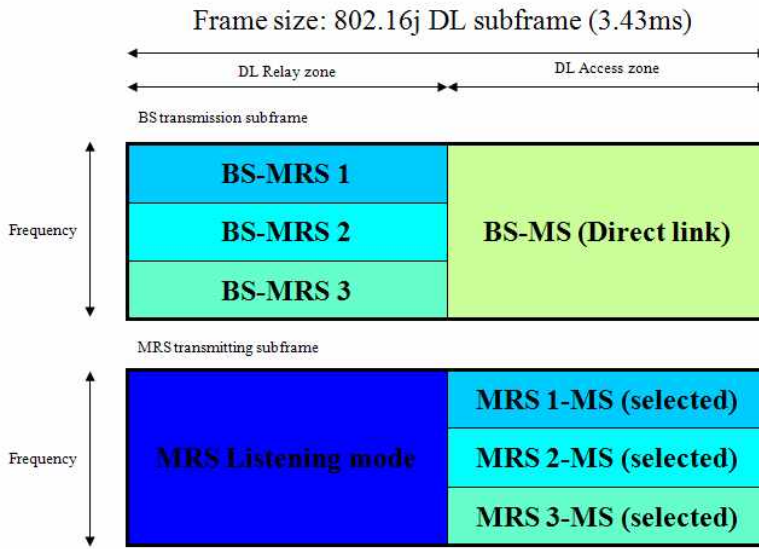


그림 1. OFDM-TDD 프레임 구조
Fig. 1. OFDM-TDD frame structure

이터를 사용자에게 재전송하는 구간이다. n 번째 기지국 부 프레임의 DL relay zone에서 기지국으로부터 어떤 릴레이에 데이터를 전송하는 경우, 그 릴레이는 n 번째 릴레이 부 프레임의 DL access zone에서 사용자에게 데이터를 최종적으로 전송한다고 가정한다. 그림 1에서 보는 바와 같이 릴레이로부터 사용자까지 두 번째 홉 전송과 기지국에서 사용자까지 직접 링크 전송은 같은 DL access zone 구간에서 일어나므로, 두 링크 간에 셀 내부 간섭이 발생한다.

기지국 부 프레임의 DL access zone에서는 모든 부반송파가 직접 링크에 연결된 하나의 사용자 데이터 전송에 사용된다고 가정한다. DL relay zone에서 부반송파를 할당하는 방법은 다음과 같다. 셀 하나당 릴레이의 개수를 R 이라고 할 때, 전체 대역을 동일한 R 개의 부채널로 나눈다. 이 때, 각 부채널은 인접한 부반송파의 집합으로 구성되어 있으며, 한 부채널을 구성하는 부반송파의 수는 모두 동일하다고 가정한다. 그리고 각 릴레이별로 하나씩의 부채널을 사용한다. n 번째 기지국 부 프레임의 DL relay zone에서 r 번째 릴레이가 $s(r)$ 번째 부채널을 통해서 데이터를 전송받은 경우, 이 릴레이는 n 번째 릴레이 부 프레임의 DL access zone에서도 같은 $s(r)$ 번째 부채널을 통해 사용자에게 데이터를 전달한다. 편의를 위해, 릴레이가 자신과 같은 index의 부채널을 할당받는다고 가정한다($r = s(r)$). 그러므로 릴레이 링크 사용자는 같

은 번호를 부여받은 인접 셀의 릴레이로부터 간섭을 받는다. 한 프레임 내에서 하나의 릴레이는 사용자 한 명씩이 스케줄링되므로, 한 릴레이가 부여받은 부채널의 부반송파는 모두 그 릴레이에 스케줄링된 사용자 데이터 전송에 사용된다.

2-2 기지국 및 릴레이의 사용자 스케줄링

매 프레임마다, 기지국은 직접 링크와 각 릴레이 링크에 한 명씩의 사용자를 스케줄링한다. 사용자 스케줄링 단계에서는 모든 릴레이의 전력이 최대 전력 한계 p_{full} 로 맞추어져 있다고 가정한다. 사용자들은 기지국과 릴레이들이 사용하는 고유의 프리앰블들의 패턴을 이용하여, 기지국과 릴레이들로부터 전송된 각각의 신호의 크기와 인접 셀로부터의 간섭량을 측정 후 기지국 및 릴레이들에 보고한다. 기지국은 각 사용자들로부터 보고 받은 정보를 활용하여 직접 링크로 서비스 받는 사용자와 각 릴레이로부터 서비스 받을 사용자를 결정하게 된다. 먼저, 각 기지국은 자신이 커버하는 셀 내의 각 사용자들이 한 명씩 직접 링크에 연결된다고 가정했을 때의 전송률을 측정한다. 현재 프레임에서 셀 하나당 사용자 수가 K 명이라고 가정할 때, 주어진 스케줄링 기준에 따라 K 개의 우선순위 중, 최우선 순위의 사용자를 직접 링크에 연결한다. 여기서 스케줄링 기준으로

Proportional fairness (PF)[5] 기준을 사용한다.

이어서, 기지국에서는 셀 내의 사용자들 가운데 직접 링크로 연결된 사용자를 제외한 나머지 $K-1$ 명의 사용자들이 한 명씩 첫 번째 릴레이 링크에 연결되었을 때 서비스 받을 수 있는 전송률을 측정한다. 이 때, 전송률은 첫 번째 홉, 두 번째 홉의 전송률이 모두 반영된 end-to-end 전송률이며 DF 릴레이의 전송률 규칙을 따른다[2]. PF 기준에 따라 최우선 순위의 사용자를 선택하여 첫 번째 릴레이 링크에 연결한다. 두 번째 릴레이 링크에 연결될 사용자들을 결정할 때는 마찬가지로 직접 링크 및 첫 번째 릴레이 링크에 연결된 사용자를 제외한 $K-2$ 명의 사용자들 가운데 한 사용자를 연결한다. 나머지 릴레이에 사용자를 연결하는 방법도 유사하다. 각 릴레이들에 사용자를 할당하는 순서는 셀 내에서 릴레이의 인덱스 순서를 그대로 따른다고 가정한다. 최종적으로 현재 프레임에서 링크별로 사용자가 모두 선택되면, K 명 사용자 가운데 총 $R+1$ 명의 사용자가 선택된다.

현재 프레임의 스케줄링이 완료되면, 기지국은 기지국 부 프레임의 DL relay zone에서 릴레이들에 데이터를 전송하면서 각 릴레이에 연결된 사용자 및 직접 링크에 연결된 사용자 인덱스를 동시에 전송한다. 이 정보를 활용하여 각 릴레이는 자기 전력을 제어할 수 있다. 개략적으로 말해서, 각 릴레이는 그 릴레이에 연결된 사용자의 두 번째 홉 전송률과 그 릴레이가 직접 링크 사용자에게 주는 간섭을 동시에 고려하여 자기 전력을 제어한다. 자세한 전력 제어 방식은 다음 장에서 논의하기로 한다.

III. 분산형 릴레이 전력 제어 방법

다중 셀 환경에서, 각 셀의 사용자가 인접 셀의 기지국 및 릴레이로부터 간섭을 받게 된다. 그리고 릴레이는 같은 셀의 직접 링크 사용자에게 간섭을 주게 되고, 릴레이 링크 사용자는 속해 있는 셀의 기지국으로부터 간섭을 받는다. 이 때, 모든 셀의 평균 전송률의 합을 최대화할 수 있도록 각 셀 릴레이의 전력을 결정하는 문제를 생각해 보자. 이 문제가 적용되는 시나리오는 모든 셀을 관장하는 Central controller

가 존재하여, 각 셀에서 기지국 및 릴레이로부터 서비스 받는 사용자들이 기지국 및 해당 릴레이로부터 받는 신호의 SINR 정보가 기지국간에 자유로이 교환될 수 있다는 가정을 필요로 한다. 이 경우 시그널링에 따른 많은 오버헤드가 필요하게 되어 실제적인 구현이 어렵다. 따라서 셀 간의 정보를 공유하지 않고, 릴레이의 전력을 결정하는 방식을 고려할 필요가 있다.

간단한 방법으로, 각 릴레이가 자기 전력을 제어할 때, 그 릴레이가 다른 셀의 사용자들에 영향을 주게 되는 간섭의 크기를 고려하지 않고, 자기 셀의 전송률만을 최대화하도록 전력을 결정해 주는 방식을 고려하자. 한 셀의 전송률은 직접 링크로 서비스 받는 사용자의 전송률과 릴레이 링크로 서비스 받는 사용자들의 전송률의 합과 같다. 기지국 전력이 고정되어 있으므로, 첫 번째 홉 전송률은 고정되어 있고, 릴레이에서 조절 가능한 전송률은 두 번째 홉 전송률이다. 그러므로 릴레이 입장에서 한 셀의 전송률을 나타내는 효용 함수를 써보면, 직접 링크 사용자의 전송률과 릴레이 링크 사용자의 두 번째 홉 전송률의 합이 된다. 또한, 같은 셀의 릴레이들은 서로 다른 대역을 사용하기 때문에 서로 영향을 미치지 않는다. 따라서 릴레이들의 전력을 결정하는 문제는 각 릴레이별로 완전히 분리된 문제로 모델링 된다. c 번째 셀의 전송률을 최대화하기 위한 이 셀의 r 번째 릴레이의 전력을 결정하는 문제는 다음과 같은 최적화 문제로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 p_{c,r}^* &= \operatorname{argmax}(U_{c,r} + U_{c,d}) & (1) \\
 U_{c,r} &= W_r \log_2(1 + \alpha p_{c,r}) \\
 U_{c,d} &= W_d \log_2\left(1 + \frac{1}{\beta + \gamma p_{c,r}}\right) \\
 p_{c,r} &\geq 0, p_{c,r} \leq P_{full}
 \end{aligned}$$

여기서, $U_{c,r}$ 은 c 번째 셀의 r 번째 릴레이 링크에 연결된 사용자가 받는 두 번째 홉 전송률이며, U_d 는 c 번째 셀의 직접 링크에 연결된 사용자가 받는 전송률이다. 전송률은 샤논의 전송 용량 공식[3]에, 직접 링크 및 릴레이 링크 하나의 대역폭 크기 W_d , W_r 를 곱한 값으로 결정되며, 단위는 (bps)이다. 이 때,

$W_r = \frac{W_d}{R}$ 이다. 그리고 α , β , γ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{G_{c,r}|h_{c,r}|^2}{P_{c,d}G_{c,d}|h_{c,d}|^2 + \sum_{c' \neq c} P_{c',d}G_{c',d}|h_{c',d}|^2 + \sum_{c' \neq c} p_{c',r}G_{c',r}|h_{c',r}|^2 + \sigma^2} \\ \beta &= \frac{\sum_{c' \neq c} P_{c',d}G_{c',d}|h_{c,d}|^2 + \sum_{c' \neq c} p_{c',r}G_{c',r}|h_{c,r}|^2 + \sigma^2}{P_{c,d}G_{c,d}|h_{c,d}|^2} \\ \gamma &= \frac{G_{c,r}|h_{c,r}|^2}{P_{c,d}G_{c,d}|h_{c,d}|^2} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $P_{c,d}$ 와 $p_{c,r}$ 는 각각 c 번째 셀 기지국의 전력, c 번째 셀 기지국내의 r 번째 릴레이의 전력을 의미한다. $G_{c,d}$ 와 $G_{c,r}$ 는 각각 c 번째 셀 기지국과 직접 링크 사용자 간 Long term 페이딩 채널, c 번째 셀 기지국내의 r 번째 릴레이와 사용자의 Long term 페이딩 채널을 의미한다. h 들은 Short term 페이딩 채널을 의미하며 표시 방법은 Long term 페이딩 채널과 유사하다. c' 는 현재 다루고 있는 c 번째 셀을 제외한 다른 모든 기지국들을 표시한다. 직접 링크 전송시 발생하는 잡음과, 두 번째 홉 전송시 발생하는 잡음의 크기는 모두 σ^2 로서 같다고 가정한다. 정리하면, 즉, α 는 릴레이 r 에 선택된 사용자의 채널 이득 대비 간섭 비율이며, β 와 γ 는 직접 링크에 선택된 사용자가 받는 채널 이득 대비 간섭 비율의 역수에 관련된 항이 된다.

(1)의 목적함수에서 알 수 있는 바와 같이 릴레이의 전력을 조절하는 것은 직접 링크에 연결된 사용자와 릴레이 링크 사용자에게 동시에 영향을 주게 된다. 전력을 줄이면 직접 링크에 작용하는 간섭의 양이 줄어들어 대신, 릴레이 링크의 두 번째 홉의 전송률이 줄어든다. 반대로 전력을 크게 하면, 릴레이 링크의 두 번째 홉의 전송률이 증가하고, 직접 링크에 작용하는 간섭의 양이 증가한다. 따라서 릴레이의 전력이 증가하더라도 셀의 전송률이 무조건 높아진다는 보장은 없다.

위 최적화 문제의 해를 결정하는 방법은 다음과 같다. 먼저 $p_{c,r}$ 의 범위를 정한다. $p_{c,r}$ 의 최대값은 다음과 같이 정해진다. DF 릴레이의 특성상 첫 번째 홉 전송률 이상으로 두 번째 홉 전송률을 높이는 것은

end-to-end 전송률을 향상 시키지 않고, 같은 셀의 기지국 링크 사용자와 다른 셀의 사용자들에 주는 간섭량만 늘어나게 된다. 따라서 두 번째 홉 전송률이 첫 번째 홉 전송률 이하가 되도록 다음과 같이 $p_{c,r}$ 의 최대값을 정한다.

$$p_{\max} = \min \left[p_{full}, \frac{2 \frac{R_{1-hop}}{W_r} - 1}{\alpha} \right] \quad (3)$$

최적화 문제 (1)의 효용 함수는 $[0, p_{\max}]$ 구간 내에서 연속 함수이므로 반드시 최대값을 갖는다. 연속 함수에서 최대값은 정의된 구간의 양 끝과, 구간 내에서 함수의 미분값을 0으로 만드는 지점이다. 따라서 (1)의 효용 함수의 미분값을 0으로 하는 $p_{c,r}$ 값과 0, 그리고, P_{\max} 이렇게 세 가지 경우가 최적 $p_{c,r}^*$ 의 후보군이 된다. 후보군 집합의 각각의 후보를 대입하여 (1)의 효용 함수의 값을 계산하여 크기를 비교해 본 후, 함수값을 최대화시키는 후보를 $p_{c,r}^*$ 로 결정한다. 함수의 미분값을 0으로 만드는 지점은 다음과 같이 결정된다.

$$p'_{sol} = \frac{\sqrt{\frac{\gamma}{\alpha} - \beta} - \beta}{\gamma} \quad (4)$$

위에서, 결정되는 값은 허용된 전력 범위 내에 있어야 하므로, 최적해는 다음과 같이 제한되어야 한다.

$$p_{sol} = [p'_{sol}]_0^{P_{\max}} \quad (5)$$

최적 $p_{c,r}^*$ 의 후보군은 $P_{set} = [0, p_{sol}, P_{\max}]$ 과 같다. (4)에서 p'_{sol} 가 P_{\max} 보다 큰 경우에는, 후보군 집합의 크기가 2가 되며, On-off 전력 제어 방식과 동등하다.

IV. 모의실험 결과

4-1 모의실험 환경

시스템의 대역폭은 10MHz 라고 가정한다. 19개의 셀로 구성된 하나의 클러스터를 기본으로 하며, 기본 클러스터 내에 있는 릴레이들의 위치와 전력을 복사한 6개의 클러스터가 기본 클러스터를 둘러싸고 있는 랩-어라운드 구조를 사용한다. 셀 반경은 1km 이고, 셀 외곽 지역은 중심으로부터 반경 0.6km부터 셀 경계 사이의 지역으로 정의한다. 모의실험을 시작할 때, 최초 분포하는 셀 당 사용자 수를 K 로 표시하며, K 는 5에서 30까지의 값을 갖는다. 사용자는 기본 클러스터 내를 자유롭게 이동할 수 있으며, 셀 간 핸드 오버는 완벽하다고 가정한다. 따라서 매 프레임마다 셀 당 사용자 개수는 달라진다. 릴레이는 셀 내의 외곽 지역에서만 움직인다. 그리고 최초 분포한 셀 내에서만 이동하므로 셀 당 릴레이의 개수 R 은 프레임에 걸쳐서 항상 일정하게 유지된다. 여기서 R 은 1에서 3까지의 값을 갖는다. 본 논문에서는 채널 추정이 완벽하다고 가정하므로, 이동 노드들의 속도 증가에 의한 채널 추정 지연 현상은 발생하지 않는다. 릴레이가 움직이면, 사용자들이 선택적으로 릴레이를 통해 더 좋은 전송률을 제공받을 수 있는 가능성이 높아지므로, 고정 릴레이에 비해 이득이 있는 시스템이라고 볼 수 있다. Long term 페이딩 채널 모델은 802.16j의 Type E와 Type F-NLOS 모델을 따르고 있으며[6], 세도잉의 표준 편차는 Type E모델의 경우 8dB, Type F-NLOS모델의 경우 3.1dB이다. 모든 셀 기지국의 전력 $P_{c,a}$ 은 20W로 고정되고, 릴레이의 대 전력 한계 p_{full} 은 5W이며, 백색가우시안잡음의 전력 밀도는 -174dBm/Hz이다. 전력 제어를 하지 않고 릴레이를 사용하는 경우 모든 릴레이의 전력은 p_{full} 로 고정되며 이 시스템을 p_{full} 릴레이 시스템으로 명명한다. 그리고 릴레이를 사용하지 않은 시스템을 기존 시스템으로 표시하기로 한다. Short term 페이딩은 Typical urban (TU) [7] 채널을 사용하고, 각 탭은 jakes' model에 따라 매 프레임마다 변한다. 이 때, 릴레이 및 사용자의 이동 속도는 TU 채널모델에서 가정하고 있는 42km/hr이다. 모든 실험에서 사용자의 요구 조건은 전송률 512kbps이고, 평균 전송률이 512kbps 미만인 경우 아웃티지 (outage)가 발생한 것

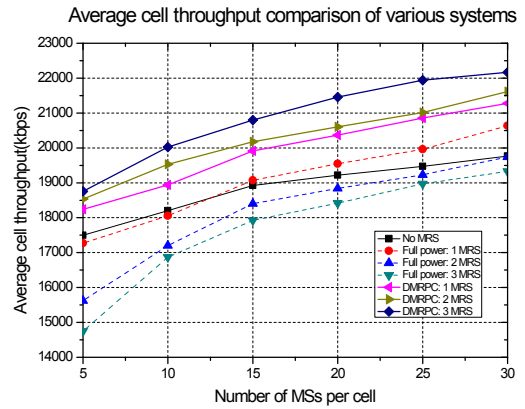


그림 2. 여러 가지 시스템의 평균 셀 수율 비교
Fig. 2. Average cell throughput comparison of various system

으로 간주하여 전송률 측정에서 제외한다.

4-2 평균 셀 수율(throughput) 성능

그림 2는 릴레이를 사용하지 않는 기존 시스템과, p_{full} 릴레이 시스템 및 DMRPC 방식을 사용한 시스템의 K 의 변화에 따른 셀 수율 성능을 보여주고 있다. p_{full} 릴레이 시스템의 셀 수율은 점선으로 표시되어 있고, 기존 시스템과 DMRPC 방식의 셀 수율은 실선으로 표시되어 있다. p_{full} 릴레이 시스템의 경우, $R=1$ 일 때를 제외하고 모든 K 에서 기존 시스템에 비해 성능이 저하된다. 이는 릴레이를 도입하면서 DL relay zone이 추가되어 DL access zone의 길이가 기존 시스템에 비해 줄어들었기 때문이다. 아울러, 기지국과 릴레이 링크 간 셀 내부 간섭과 인접 셀의 릴레이로부터 발생하는 간섭량이 증가한 데 원인이 있다. 그리고 R 이 증가할수록 p_{full} 릴레이 시스템의 셀 수율 성능이 떨어지는 것으로 나타났다. 이것은 다음과 같은 이유로 설명할 수 있다. R 이 증가하면 한 프레임 내에서 할당할 수 있는 사용자의 수가 늘어나는 반면, 릴레이 링크 사용자 한 명이 점유하는 대역폭의 크기가 감소한다. 릴레이 하나가 셀의 직접 링크 사용자와 인접 셀에 일으키는 간섭의 양은 줄어들지만, 릴레이들의 개수가 증가함에 따라 간섭의 요인이 많아진다. 즉, 모든 셀 관점에서 보았을 때, 릴레이로부터 간섭을 받는 영역이 넓어지므로 전체적인 간섭 레벨은 높아진다. 정리하면, 릴레이를 도입

해서 한 프레임 당 서비스할 수 있는 사용자의 수가 늘어나는 장점이 있더라도, 늘어난 간섭량에 따른 악영향이 더 크게 작용한 것으로 해석할 수 있다.

DMRPC 방식을 사용하면 모든 셀 당 사용자 수에서 p_{full} 릴레이 시스템과 기존 시스템에 비해 셀 수율이 증가한다. 먼저, p_{full} 릴레이 시스템과 DMRPC 방식을 비교해보면, $K=25$, $R=3$ 일 때, DMRPC 방식의 셀 수율은 p_{full} 릴레이 시스템에 대비하여 약 3,000kbps 상승한 것으로 관찰되었으며, 이는 성능이 16% 상승한 것에 해당한다. $K=25$, $R=1$ 일 때 DMRPC 방식의 셀 수율 성능이 p_{full} 릴레이 시스템에 대비해서 약 2,000kbps 상승한 것으로 관찰되었고, 이는 약 11% 상승한 것에 해당한다.

DMRPC 방식을 사용하면 기존 시스템에 비해서도 셀 수율 성능이 향상되었다. $R=3$ 일 때, DMRPC 방식의 셀 수율은 기존 시스템에 대비하여 약 2,500kbps 상승한 것으로 관찰되었으며, 이는 성능이 약 13% 상승한 것에 해당한다. 따라서 기존 시스템에 릴레이를 도입하는 경우는 DMRPC 방식과 같은 추가적인 전력 제어 알고리즘을 사용해야 기존 시스템에 비해서 좋은 성능을 얻을 수 있다.

4-3 셀 외곽 지역의 평균 수율 성능

그림 3은 기존 시스템과, p_{full} 릴레이 시스템 및 DMRPC 방식을 사용한 시스템의 K 의 변화에 따른 셀 외곽 지역 평균 수율 성능을 보여주고 있다. p_{full} 릴레이 시스템을 사용하는 경우, R 이 증가할수록 셀 외곽 지역 평균 수율 성능은 감소한다. 이는 다음과 같은 이유로 설명할 수 있다. 릴레이 링크로 서비스를 받는 사용자의 약 90%는 셀 외곽 지역에 위치하기 때문에 R 이 증가할수록 셀 외곽 지역 수율이 높아질 것으로 예상할 수도 있다. 하지만, 하나의 릴레이가 사용하는 대역의 크기가 줄어들고 기지국이 릴레이 링크 사용자 전체에 일으키는 간섭량은 동일하기 때문에, 실제적인 외곽 지역 수율 성능의 증가의 효과는 크지 않다. 그리고 셀 외곽 지역에 위치한 사용자 가운데 직접 링크로 서비스를 받는 사용자는 셀 외곽 지역의 릴레이로부터 크게 간섭을 받게 된다. 결과적으로, 기존 시스템에 비해서 외곽 지역 평균

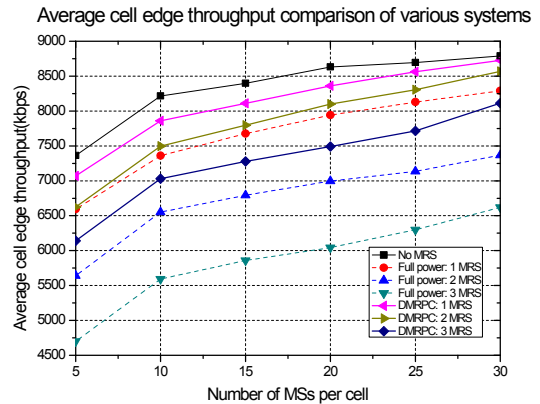


그림 3. 여러 가지 시스템의 셀 외곽 지역 평균 수율 비교
Fig. 3. Average cell edge throughput comparison of various system

수율은 크게 감소하는 것으로 나타났다.

DMRPC 방식의 경우, $K=30$, $R=1$ 일 때, 셀 외곽 지역 평균 수율이 p_{full} 릴레이 시스템에 비해 약 500kbps 정도 상승하였으며, 이는 약 6% 향상한 것에 해당된다. 여러 가지 K , R 에서, p_{full} 릴레이 시스템에 대비한 DMRPC 방식의 평균 셀 수율 및 셀 외곽 지역 평균 수율의 증가율이 그림 4에 잘 나타나 있다. R 이 증가할수록, p_{full} 릴레이 시스템에 대비한 DMRPC 방식의 평균 셀 수율 및 셀 외곽 지역 평균 수율 성능 증가율이 높은 것을 알 수 있다. 이는 R 이 증가하면서 릴레이들의 전력을 결정할 때 경우의 수가 많아지므로, 릴레이의 개수 증가에 따른 효과를 극대화 시킬 수 있기 때문이다.

한편, DMRPC 방식을 사용하더라도 기존 시스템에 비해 여전히 셀 외곽 지역 수율이 약 100kbps 정도 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 다음과 같은 원인으로 설명할 수 있다. 먼저, 어떤 릴레이의 전력을 줄이면 그 릴레이 링크로 서비스 받는 사용자의 전송률이 줄어들게 되는데, 릴레이 링크의 사용자의 90%는 셀 외곽 지역에 위치하므로 이는 셀 외곽 지역 수율이 떨어지는 직접적인 원인이 된다. 반대로 릴레이의 전력을 증가시키는 경우, 그 릴레이에 인접하면서 기지국 직접 링크로 서비스 받는 셀 외곽 지역 사용자가 받는 간섭량이 커지므로 이것 또한 셀 외곽 지역 수율이 떨어지는 직접적인 원인이 된다. 즉, 전력 제어를 해 주면서 릴레이를 사용할 때, 전력을 증가시키는 경우와 감소시키는 경우 모두 셀 외곽 지역 사용

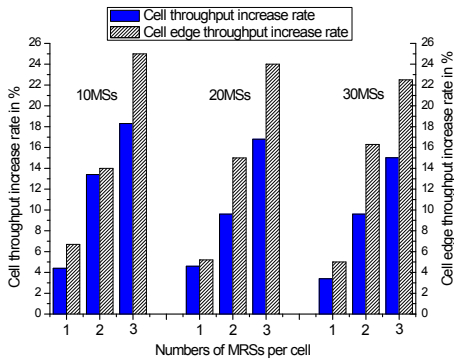


그림 4. 여러 셀 당 사용자 수 환경에서, 최대 전력 릴레이 (p_{full} 릴레이)에 대비한 DMRPC 방식의 평균 셀 수율, 셀 외곽 지역 평균 수율 증가율

Fig. 4. Cell throughput and cell edge throughput increasing rate by DMRPC relative to full power MRS aided system in various number of MSs per cell

자의 수율을 떨어뜨리는 요인이 된다. DMRPC 방식이 원래 셀 외곽 지역이 아닌 셀 내의 모든 지역의 평균 수율을 향상시키기 위한 것으로, DMRPC 방식을 사용해서 셀 외곽 지역의 수율이 낮아진다고 하더라도 이는 당연한 현상일 수 있다.

$R=1$ 인 경우는 $R \geq 2$ 인 경우에 비해 릴레이들이 셀 외곽 지역의 직접 링크 사용자에게 일으키는 간섭과 인접 셀의 외곽 지역에 일으키는 간섭의 영향이 적어지므로, 기존 시스템에 근접한 셀 외곽 지역 수율을 얻을 수 있다. 일례로, $K=25$, $R=1$ 일 때, DMRPC 방식을 사용하면, 셀 외곽 지역의 수율이 기존 시스템에 비해 200kbps 이 감소하였고, 이는 성능이 약 2.2% 감소한 것에 해당한다. $K=25$, $R=1$ 일 때, 셀 수율 성능이 11% 증가한 것에 비교해 보면, 셀 외곽 지역 수율 성능의 감소율이 크지 않다. 그림 5에서 다양한 K , R 에서, DMRPC 방식의 기존 시스템에 대비한 셀 수율의 증가율과 셀 외곽 지역 수율의 감소율을 비교하였다. $K=10$, $R \geq 2$ 일 때는 셀 수율 증가율보다, 셀 외곽 지역 수율의 감소율이 더 높다. 다른 K 일 때는 셀 수율 증가율이 셀 외곽 지역 수율의 감소율을 상회하는 것으로 나타나 있다. 특히, $K=30$, $R=1$ 명일 때는 감소율이 거의 0%에 가깝다. 따라서 전적으로 셀 수율을 높여야 할 상황에서 R 을 증가시키고, 반대로 셀 외곽 수율을 기존 시스템과 비슷한 수준으로 유지하면서, 셀 수율

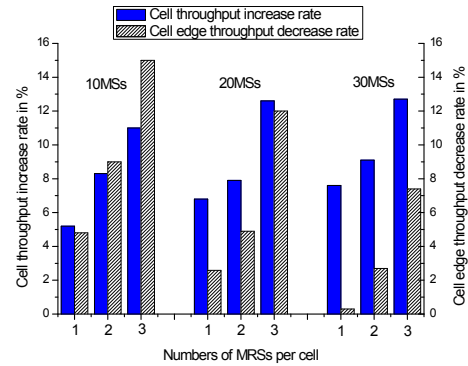


그림 5. 여러 셀 당 사용자 수 환경에서, 기존 시스템에 대비한 DMRPC 방식의 평균 셀 수율 증가율, 셀 외곽 지역 평균 수율 감소율

Fig. 5. Cell throughput increasing rate and cell edge throughput decreasing rate by DMRPC relative to conventional system in various number of MSs in a cell

을 높여야 할 때는 R 을 1로 고정시키는 등, 선택적으로 릴레이의 개수를 바꾸어서 시스템을 운용할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 이동성을 갖춘 OFDM-TDD 시스템에서 릴레이의 전력을 제어 하는 방법에 대하여 연구하였다. 셀 수율 성능을 증가시키는데 주안점을 두었으며, 다중 셀 환경에서 릴레이들이, 자신이 다른 셀의 사용자에게 미치는 영향을 고려하지 않고 개별적으로 자기 셀 수율을 최대화 하는 방식으로 동작하는 분산형 방식을 취하였다. DMRPC 방식을 사용했을 때, p_{full} 릴레이 시스템과 기존 시스템에 비해 셀 수율 성능이 증가하는 것을 확인하였다. 그리고 DMRPC 방식을 사용할 때, 셀 당 릴레이의 개수를 증가시킴에 따라 셀 수율 성능이 증가하는 것도 알 수 있었다. 셀 외곽 지역 수율 성능 측면에서는 DMRPC 방식을 사용했을 때, 전반적으로 기존 시스템 보다 성능이 좋지 않았다. 그러나 셀 당 릴레이의 개수가 하나이면서 사용자 수가 25명 이상으로 많아지면, DMRPC 방식을 사용해서 기존 시스템의 셀 외곽 지역 수율 성능에 근접하는 성능을 얻을 수 있음을 보였다. 기존 시스템에 대비한 DMRPC 방식의 셀

수율 성능 증가율과 셀 외곽 지역 수율 성능의 감소율을 비교하여, 선택적으로 셀 당 릴레이의 개수를 조절하여 셀 외곽 지역 수율을 어느 정도 보장하면서 셀 수율을 증가시키는 방안도 고려해 보았다. 향후 릴레이를 도입해서 셀 수율, 셀 외곽 지역 수율을 기존 시스템보다 모두 높이는 방식에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 이를 위해서 릴레이의 전력을 제어하는 방법 이외에, 기지국의 전력을 동시에 제어하는 방법, 프레임 구조를 새로 설계하는 방법 등 다각적인 접근이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 LG전자의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

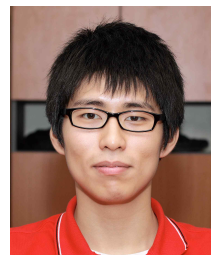
- [1] <http://www.ieee802.org/16/relay>
- [2] D. W. Byun, Y. M. Cho and D. K. Kim, "Resource allocation and power control for mobile relay in TDD-OFDMA downlink," *ICCIT 2008*, Nov. 2008.
- [3] T. M. Cover, *Elements of Information Theory*, 2nd Edition, *Wiley-Interscience Press*, 2006
- [4] IEEE 802.16j-06/026r4, Baseline Document for Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks.
- [5] Y. M. Ki, E. S. Kim, S. I. Woo, and D. K. Kim, "Downlink fair scheduling and waterfilling power control in TDD-OFDM/OFDMA cellular networks," *CIC 2004*, Oct. 2004.
- [6] IEEE 802.16j-06/013r3, Multi-hop relay system evaluation methodology (channel model and performance metric).
- [7] Y. M. Ki and D. K. Kim, "Packet scheduling algorithms for throughput fairness and coverage enhancement in TDD-OFDMA downlink network," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E88-B, No. 11, Nov. 2005, pp. 4402-4405.

조 영 민 (曹榮敏)



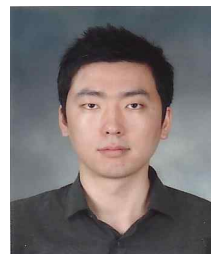
2007년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2007년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 석, 박사 통합과정
관심분야 : 4세대 이동통신 시스템, Cooperative MIMO Relay 기술, 압축 센싱 (Compressive Sensing),

박 정 훈 (朴正勛)



2010년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2010년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
관심분야 : 통신 신호처리 시스템, Interference Alignment, Cooperative MIMO 기술, 압축 센싱 (Compressive Sensing)

황 승 계 (黃陞溪)



2008년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2008년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 석, 박사 통합과정
관심분야 : 통신 신호처리 시스템, Limited feedback relay, Cooperative MIMO 기술, 압축 센싱 (Compressive Sensing)

김 동 구 (金東九)



1983년 2월 : 한국항공대학교 통신공학과 (공학사)
1985년 U.S.C. Dept. of Electrical Engineering 석사
1992년 U.S.C. Dept. of Electrical Engineering 박사
1994년~현재 연세대학교 공과대학 전기전자공학과 교수

관심분야 : 4세대 이동통신, 협력 MIMO 기술, 간섭 정렬 (Interference Alignment), 압축 센싱 (Compressed Sensing), 차세대 에너지 효율 무선 시스템 기술