차세대 이동통신 망을 위한 다중안테나 기반의 주파수 효율적 데이터 중계 방식

정방철* · 강민석** · 이상욱*** · 전성근****

A Spectrally Efficient Relaying Scheme with Multiple Antennas for Next-Generation Cellular Networks

Bang Chul Jung* · Min Seok Kang** · Sang-Wook Lee*** · Seong-Geun Jeon****

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임 (No. 2010-0011140).

요 약

본 논문에서는 기지국과 중계기와 사용자 단말로 구성되는 셀룰라 망에서 기지국의 다중 안테나를 이용하여 중계기에서 생기는 주파수 비효율성을 극복하는 데이터 중계 방식을 제안한다. 셀룰라 망에서 기지국은 단말이나 중계기에 비하여 많은 수의 안테나를 가지고 있다. 따라서 중계기가 기지국으로부터 수신한 데이터를 단말에게 전송할 때, 동일한 주파수 자원을 이용하여 기지국이 또 다른 단말에게 데이터를 보내게 함으로써 주파수 효율을 증대시킬 수 있는 것이다. 그러나 이러한 과정에서 중계기로부터 데이터를 전송받는 단말이 또 다른 단말에게 데이터를 전송하는 기지국의 신호에 의하여 간섭을 받게 되는데, 본 논문에서는 이러한 간섭을 줄이는 방식으로서 nulling 방식과 pre-whitening 방식의 pre-coding 방식을 제안한다.

ABSTRACT

We propose a spectrally efficient relaying scheme with multiple antennas for cellular networks which consist of base station (BS), relay station (RSs), and mobile stations (MSs). In general, a BS has more antennas than an RS or an MS. By using multiple antennas, a BS can support another MS with the same frequency resource, where an RS transmits data to a specific MS. In this case, the MS receiving data form an RS also receives the interference form the BS because the BS also uses the same frequency resource at the same time. In this paper, we propose nulling and pre-whitening techniques as a pre-coding scheme at the BS for reducing the interference at the MS receiving data from the RS.

키워드

중계기, 다중 안테나, 스케쥴링, MIMO pre-coding, 주파수 효율성

Key word

relay station, multiple antennas, scheduling, MIMO pre-coding, spectral efficiency

* 정회원 : 경상대학교 정보통신공학과 교수 (bcjung@gnu.ac.kr)
** 정회원 : 경상대학교 정보통신공학과
*** 종신회원 : 경상대학교 정보통신공학과 교수
**** 종신회원 : 경상대학교 정보통신공학과 교수 (교신저자)

접수일자 : 2011. 03. 24
심사완료일자 : 2011. 04. 15

I. 서 론

미래 이동통신 망에서는 향상된 데이터 전송률, 확장된 커버리지, 낮은 패킷 지연 시간, 낮은 구축비용 등이 요구된다 [1]. 이러한 요구 조건들을 만족시키기 위하여 현재 대부분의 셀룰라 기반 통신 시스템들이 표준화를 진행하고 있다 [2]-[4]. 특별히 데이터 중계 기술(relaying technology)은 낮은 구축비용으로 커버리지 확장을 가능케하는 핵심요소기술로 간주되어왔다 [5], [6]. 그러나 기존의 half-duplex 중계 방식은 주파수 효율성 (spectral efficiency)면에서 내재적인 손실을 가지고 있다. 하향링크의 경우 기지국 (base station, BS)에서 온 데이터를 복호화 후 다시 중계기(relay station, RS)에서 사용자 단말 (mobile station, MS)까지 데이터가 전달되기 위하여 2번의 데이터 송수신이 필요하고 이는 기존의 기지국에서 직접 사용자 단말로 데이터를 전송하는 방식에 비하여 자원을 2배 사용해야 하는 특징을 가지고 있기 때문이다.

이러한 주파수 효율성 문제를 보완하기 위하여 full-duplex 중계방식이 고려될 수 있다. 셀룰라 하향링크에서 full-duplex 중계 방식은 중계기가 기지국으로부터 데이터를 받으면서 동시에 사용자 단말에게 데이터를 전송하는 방식을 의미하는데, 이러한 full- duplex 중계기는 구현하기가 매우 복잡하고 가격도 매우 비싸다는 것이 알려져 있다 [7].

중계기가 설치된 셀룰라 시스템에서의 주파수 효율을 증가시키기 위해서 제안된 다른 방식은 공간적으로 분리된 다수의 중계기가 동일한 주파수 자원을 이용하여 데이터를 동시에 전송하는 공간재사용 개념을 이용하는 것이다 [8], [9]. 이 방식은 셀내에 다수 중계기가 설치되어 있고 중계기간의 간섭을 고려하여 기지국이 중계기가 동시에 동일한 자원을 사용하여 각 중계기가 서비스하는 영역에 있는 단말에게 데이터를 전송하게 하는 방식이다. 이를 통하여 최대 중계기 개수에 해당하는 사용자 단말을 서비스할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방식의 경우 기지국에서 각 중계기간 간섭 채널을 측정하여 동시에 전송할 사용자 단말의 개수를 결정하거나 스케쥴링해주어야 하는 문제가 있다. 또한 이방식은 셀내에 서로 간섭을 최소화 하는 위치에 중계기가 설치되어야 효과가 극대화 되는데, 일반적으로 중계기가 음영지역이나 셀내 통신 환경에 따라 동적으로 설치되는 특징을 감안하면 그 효과가 줄어드는 단점이 있다.

이동통신 시스템에서 중계기가 갖는 주파수 저효율성 문제를 다룬 또 다른 기술로는 물리계층 네트워크 코딩 기술 (physical-layer network coding, PNC)이 있다 [10]. 물리계층 네트워크 코딩기술은 서로 데이터를 주고 받는 두 단말사이에 중계기가 존재하는 시스템에서 기본의 중계 기술이 4번의 데이터 송수신을 통하여 통신을 수행하는 반면 이 과정을 2번의 데이터 송수신만으로 수행하는 혁신적인 기술로 알려져 있다. 원래 물리계층 네트워크 코딩 기술은 유선 네트워크에서 제안되었던 네트워크 코딩 (network coding, NC)기술 [11]에서 기인한 것으로 네트워크 코딩의 기본 개념을 무선통신 시스템에 접목한 것이다. 하지만 물리계층 네트워크 코딩기술의 경우, 데이터를 송수신 하는 두 단말사이의 데이터 크기와 채널 상황이 다를 때, 그 성능은 급격히 떨어지는 단점이 있다. 또한 이 기술이 실제 이동통신 시스템에 적용되기 위해서는 해결해야할 기술적 이슈가 매우 많다는 점에서 아직 연구가 많이 필요한 상황이다.

최근 표준화가 활발히 진행되고 있는 IEEE 802.16 m 시스템과 3GPP LTE-advanced 시스템에서도 중계기를 시스템 구성요소로 포함하고 기본적으로 중계기는 half-duplex 모드로 동작하는 것으로 간주되고 있다. 현재 표준화가 활발하게 진행중인 IEEE 802.16m 시스템은 시스템 용량 개선 및 커버리지 확장을 위해 중계기를 도입하였으며 기존의 멀티홉 중계기 기술 기반의 IEEE 802.16j 시스템에 대한 호환성을 유지하도록 한다 [12]. IEEE 802.16j 시스템은 제 MAC 계층에서 중계기를 지원하기 위한 프레임 구조를 설계하여 기지국, 다수의 중계기, 다수의 사용자 단말이 통신할 수 있도록 자원을 배분한다 [13].

2009년 2월까지 결정된 IEEE 802.16j 표준 초안 [13]에 따르면 중계기가 단말에게 전송할 시에 사용되는 무선 자원구간에서 기지국은 침묵(silent)하거나 중계기로부터 서비스 받는 단말을 위해 협력 전송하거나 다른 단말에게 서비스를 제공할 수 있도록 허용되어있다. 이렇게 기지국과 중계기가 서로 같거나 다른 단말에게 같은 무선 자원을 사용하여 전송할 때 자원을 재사용하여 시스템 용량을 개선시킬 수 있는 몇 가지 기술이 제안되었다 [14]-[16].

한편 3GPP는 2008년 12월에 확정된 LTE 시스템까지는 중계기 기술을 표준 기술로써 고려하고 있지 않지만, 현재 IMT-Advanced의 채택되기 위해 2010년을 계획으로 표준을 개발중인 LTE-Advanced 시스템에서는 향상된 커버리지를 달성하기 위해 중계기를 주요 특징으로 선정하고 기술 개발을 진행중이다 [17], [18].

LTE-Advanced 시스템은 중계기를 제3계층까지의 기지국의 역할을 담당하며 무선으로 기지국과 연결되는 (무선 백홀링) Type- I 중계기와 제 1계층 또는 제 2계층까지의 중계기의 역할을 수행하는 Type-Ⅱ중계기로 분류한다. LTE-Advanced 표준화에서는 커버리지 확장을 주요 목표로 삼는 Type- I 중계기가 시스템 용량 증대를 목표로 삼는 Type-Ⅱ중계기보다 더 현실적인 방안이라 고려하고 표준을 진행중이다. Type- I 중계기와 기지국 간의 무선 링크인 무선 백홀링은 기지국과 사용자 사이의 통신에서 사용되는 무선 자원을 같이 사용하는 in-band 중계방식이 고려되며, 무선 백홀링에 사용되는 무선 자원은 eNB가 사용하는 무선 자원과 구분되도록 할당되어 무선 백홀링으로 인한 셀 내부의 간섭을 제한한다 [19].

하지만, 중계기와 중계기가 서비스하는 사용자 단말 사이의 액세스 링크와 기존의 기지국과 사용자 단말 사이의 액세스 링크는 각 셀에 주어진 동일한 무선 자원을 공유하도록 설계되어있어 다수의 액세스 링크 사이의 간섭이 발생할 여지가 있다. 이러한 액세스 링크 사이의 간섭 문제를 해결하기 위한 방법으로써 eNB와 중계기가 사용하는 carrier-level FFR을 수행하여 액세스 링크 사이의 간섭을 완화시키는 기술 등이 제안되고 있다 [20].

본 논문에서는 차세대 이동통신 망에서 사용될 수 있는 구현가능하면서도 주파수 효율을 높이는 데이터 중계 방식을 제안한다. 일반적으로 기지국은 중계기 단말이나 사용자 단말에 비하여 높은 복잡도와 공간적인 여유를 가지고 있고 송수신 안테나의 개수도 많다는 점을 이용하여 기지국에서 중계기가 데이터를 전송하는 동일한 주파수 자원을 재사용하되 중계기로부터 데이터를 전송받는 사용자 단말에게 가는 간섭을 효과적으로 제어하는 방식을 제안한다.

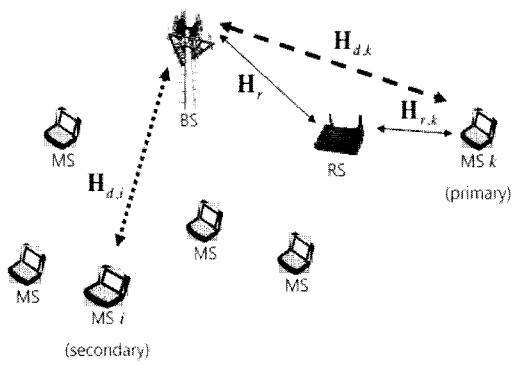

그림 1. 시스템 구조
Fig. 1. System Model

Ⅱ. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하는 시스템 모델을 보여주고 있다. 시스템은 기지국과 1개의 중계기, 다수의 사용자 단말로 구성되고 하향링크만을 고려한다. 상향링크는 이를 통하여 비슷한 방식으로 동작시킬 수 있다. 기지국은 N_{BS} 개의 안테나를 가진다고 가정하고 중계기는 N_{RS} 개, 사용자 단말은 N_{MS} 개의 안테나를 갖는다고 가정한다. 일반적인 셀룰라 망에서는 이들 안테나 개수 사이에 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$N_{BS} \geq N_{RS} \geq N_{MS} \tag{1}$$

그림 1에서 보는바와 같이 k-번째 사용자 단말은 중계기로부터 데이터를 송수신하는 단말이라 가정한다. 기지국에서 중계기까지의 무선채널은 H_r로 표현하고 기지국과 중계기 모두 다중안테나를 가지므로 이 채널은 $N_{RS} \times N_{BS}$ 복소수 행렬로 표현된다. 본 논문에서는 각 안테나 사이의 무선채널변수를 복소 가우시간 분포 (complex Gaussian)를 갖는 독립적 랜덤변수로 가정한다. 물론, 송수신 안테나간에 상관도가 있을 수 있지만 일반적으로 이러한 상관도는 독립적 랜덤변수에 상관도 행렬을 곱하는 형태로 일반화할 수 있으므로, 본 논문에서는 독립적 랜덤변수로 가정하는 것이다. 또한, 기지국과 k-번째 사용자 단말 사이의 무선채널은 $H_{d,k}$ 로 표현하고 이 채널은 $N_{MS} \times N_{BS}$ 복소수 행렬로 표현된다.

본 논문에서는 모든 단말은 동일한 수의 안테나를 가지고 있다. k-번째 사용자 단말은 첫 번째 시간 슬롯에서 기지국에서 자신에게 오는 데이터를 중계기가 수신하고 두 번째 시간 슬롯에서 중계기로부터 신호를 수신하게 된다. 첫 번째 시간 슬롯에 중계기에 수신되는 신호는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$y_{RS,1} = H_r s_k + n_{RS,1} \tag{2}$$

식 (2)에서 s_k 는 k-번째 사용자 단말에게 전송되는 신호를 의미하며 이 신호는 $N_{stream} \times 1$ 복소수 벡터로서 N_{stream} 은 k-번째 사용자 단말에게 전송될 신호열의 개수이며 사용단 단말의 안테나 개수와 동일하다고 가정한다. ($N_{stream} = \min N_{BS}, N_{RS}, N_{MS} = N_{MS}$). $n_{RS,1}$은 첫 번째 슬롯에 중계기의 수신단에서 생기는 백색잡음을 의미하고 이 잡음의 전력은 N_0 라 가정한다. 첫 번째 시간 슬롯에서 기지국에서 중계기로 전송한 k-번째 사용자를 위한 신호는 k-번째 사용자에게도 수신될 수 있지만, 실제 시스템 운영의 편의를 위하여 IEEE 802.16j 시스템에서 제안한 프레임 구조처럼 첫 번째 시간슬롯에서 k-번째 사용자를 무시한다고 가정한다. 따라서 중계기를 통하여 기지국과 통신하는 k-번째 사용자는 2번째 시간 슬롯에서만 중계기를 통하여 데이터를 수신한다. 두 번째 시간 슬롯에서 k-번째 사용자에 수신되는 신호는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$y_{k,2} = H_{r,s} s_k + n_{k,2} \tag{3}$$

위의 식에서 $H_{r,k}$ 는 중계기와 k-번째 단말 사이의 무선 채널을 의미하고 이 채널은 $N_{MS} \times N_{RS}$ 복소수 행렬로 표현된다. 식 (3)에서 $n_{k,2}$는 k-번째 단말의 수신단에서 생기는 백색잡음을 의미한다. 백색잡음의 전력은 모든 단말에서 동일하다고 가정한다. 이동통신 시스템에서는 데이터 프레임의 크기가 정해져 있는 경우가 대부분이므로 기지국에서 중계기로, 중계기에서 단말로 전송되는 데이터 프레임의 시간은 동일하다고 가정한다. 따라서 할당된 주파수 자원의 크기가 동일할 경우 중계기를 통하여 데이터를 수신하는 k-번째 단말사이의 채널용량의 최소값을 2로 나눈 값으로 결정된다.

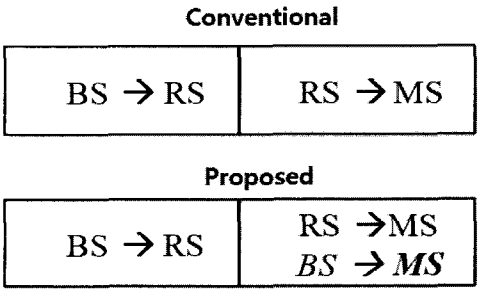

그림 2. 제안된 데이터 중계 방식의 프레임 구조
Fig. 2. Proposed frame structure of data relaying

이는 다음 수식으로 정리할 수 있다.

$$C_k = \min(C_{Bs,RS}, C_{RS,MS_k}) / 2 \tag{4}$$

$$C_{BS,RS} = \log_2 \det I_{N_{MS}} + \frac{1}{N_0} H_r K_s H_r^H \tag{5}$$

$$C_{RS,MS_k} = \log_2 \det I_{N_{MS}} + \frac{1}{N_0} H_{r,k} K_s H_{r,k}^H \tag{6}$$

위의 식에서 C_k 는 중계기를 통하여 통신하는 k-번째 사용자 단말의 최종 데이터 전송률을 뜻하고, $C_{BS,RS}$ 는 기지국과 중계기 사이의 채널 용량, C_{RS,MS_k} 는 중계기와 단말 k사이의 채널 용량을 의미한다. 위의 식에서 K_S 는 신호의 covariance 행렬을 뜻한다. 또한, A^H 는 행렬 A의 Hermitian transpose를 의미한다.

Ⅲ. 제안된 다중안테나 기반의 데이터 중계방식

2장에서 설명된 바와 같이, 중계기를 통하여 데이터를 수신하는 k-번째 사용자 단말의 경우 2번의 데이터 송수신을 통하여 최종적으로 데이터가 전달된다. 첫 번째 시간 슬롯에서 기지국은 중계기로 k-번째 사용자 단말을 위한 데이터를 전송하고 두 번째 시간 슬롯에서 중계기가 k-번째 사용자 단말에게 데이터를 전송하는 것이다. 만약 중계기를 사용하지 않고 기지국이 직접 k-번째 사용자 단말에게 데이터를 전송한다면 사용하는 시간슬롯의 개수를 1개로 줄일 수 있지만 이 경우 낮은

수신 품질로 인하여 데이터 전송률은 급격히 떨어질 것이다.

그림 2은 제안된 데이터 중계방식의 프레임 구조를 보여주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 본 논문에서는 중계기에서 사용자 단말에게 데이터를 전송하는 두 번째 시간 슬롯에서 기지국이 또 다른 사용자 단말에게 데이터를 전송하는 셀룰라 하향링크를 위한 데이터 중계 방식을 제안한다. 제안된 하향링크 데이터 중계방식을 통하여 셀룰라 망에서 half-duplex 방식의 중계기 사용으로 인한 시간 슬롯의 주파수 비효율성 문제를 해결할 수 있다.

그러나 기지국은 일반적으로 단말이나 중계기에 비하여 매우 높은 전력으로 신호를 전송하므로 두 번째 시간 슬롯에서 중계기로부터 데이터를 전송받는 사용자가 기지국으로부터 심한 간섭을 받게 될 것이다. 그러므로 두 번째 시간슬롯에서 기지국이 데이터를 전송할 때 중계기로부터 데이터를 수신하는 사용자를 고려하여 신호를 보낼 필요가 있다. 본 논문에서는 일반적으로 기지국의 안테나 개수가 중계기나 사용자 단말의 안테나 개수보다 많다는 것을 이용하여 중계기로부터 데이터를 전송받는 사용자가 두 번째 시간 슬롯에서 간섭을 전혀 받지 않게 하는 nulling 기반의 pre-coding 방식과 중계기로부터 데이터를 전송받는 사용자가 두 번째 시간 슬롯에서 간섭을 받되 전자 기기에서 자연스럽게 생성되는 안테나간 상관(correlation)이 없는 백색 잡음처럼 간주될 수 있도록 하는 pre-whitening 기반의 pre-coding 방식을 제안한다.

3.1. Nulling 기반의 Pre-coding 기술

제안된 nulling 기반의 pre-coding 기술은 중계기를 이용하여 데이터를 전송 받는 k-번째 사용자 단말이 두 번째 슬롯에서 중계기로부터 데이터를 수신할 때, 기지국이 k-번째 사용자에게 간섭이 미치지 않도록 $H_{d,k}$ 행렬의 null space ($\mathbb{N}(H_{d,k})$)에 신호를 projection하여 새로운 사용자에게 신호를 전달하는 기술이다. 여기서 $H_{d,k}$은 기지국과 k-번째 사용자 단말 사이의 채널 행렬을 의미한다. 행렬 A에 대한 null Space ($\mathbb{N}(A)$)는 다음 수식 $Ax=0$을 만족하는 백터의 집합으로 정의된다 [21]. 행렬 $H_{d,k}$은 $N_{MS}\times N_{BS}(N_{BS}>N_{MS})$ 행렬이므로 선형대수학의 기본 원리에 의하여 행렬 $H_{d,k}$의 null space의 dimension은 $N_{BS}-N_{MS}$이다. 특정 행렬의 null space의 dimension을 $Nullity$라 부른다 [21]. 두 번째 시간 슬롯에서 기지국은 $H_{d,k}$의 null space를 통하여 데이터를 전송해야 하므로 두 번째 시간 슬롯에서 전달할 수 있는 데이터열은 최대 $N_{BS}-N_{MS}$개, 즉 $H_{d,k}$ 행렬의 nullity (N_{Null})로 제한된다.

따라서, 제안된 nulling 기반의 pre-coding 기술은 두 번째 시간 슬롯에서 기지국에서 nulling 행렬 V를 설계하여 두 번째 시간 슬롯에 기지국에서 전송되는 신호가 동일한 주파수 자원을 이용하여 데이터를 수신하고 있는 k-번째 사용자 단말과 기지국 사이의 채널 $H_{d,k}$의 null space에 projection되도록 하는 기술이다. 행렬 V의 구현은 잘 알려진 singular-value- decomposition (SVD)과정 등을 통하여 이루어진다. 제안된 nulling 기반의 pre-coding 기술을 이용하여 두 번째 시간 슬롯에서 기지국과 중계기에서 동시에 데이터를 전송할 경우 k-번째 사용자 단말에 도착하는 수신신호는 다음식으로 표현된다.

$$y_{k,2}^{Nulling}=H_{r,k}s_k+H_{d,k}\cdot Vs_i+n_{k,2}. \quad (7)$$

식 (7)에서 우항의 두 번째 항은 중계기와 동일한 주파수 자원을 이용하여 전송한 기지국으로부터 수신된 신호를 의미하는데, 행렬 V는 채널 행렬 $H_{d,k}$의 nulling matrix이므로 기지국으로부터 수신된 신호는 0이된다. s_i는 i-번째 사용자에게 기지국의 두 번째 시간 슬롯을 이용하여 전송하는 데이터 신호를 가리킨다. 따라서 식 (7)은 다음 식으로 다시 쓸 수 있다.

$$y_{k,2}^{Nulling}=H_{r,k}s_k+n_{k,2}. \quad (8)$$

식 (8)은 식 (3)과 정확히 같다. 이는 제안된 nulling 기반의 pre-coding 기술이 k-번째 사용자 단말에게 아무런 영향을 주지 않으며, k-번째 사용자 입장에서는 기존의 중계기만 전송하는 중계방식과 동일한 데이터 전송률을 제공한다는 것을 의미한다. 앞서 언급한 대로, 기지국은 두 번째 시간 슬롯을 이용하여 다른 사용자에게 데이터를 전송하게 되는데, 기지국이 i-번째 사용자에게 두 번째 시간 슬롯을 이용하여 데이터를 전송한다면 i-번째 사용자의 단말에 수신되는 신호는 다음식으로 표현

된다.

$$y_{k,2}^{Nulling} = H_{d,i} \cdot Vs_i + n_{k,2}. \quad (9)$$

식 (9)에서 $H_{d,i}$ 행렬은 기지국에서 i-번째 사용자 단말까지의 채널을 나타낸다. 행렬 V는 nulling 행렬을 의미하고 $H_{d,i} \cdot V$은 i-번째 사용자 단말의 effective channel이라 부르고 H_e^n로 표기한다. 사실, i-번째 사용자의 두 번째 시간 슬롯에서 k-번째 사용자에게 데이터를 전송하는 중계기의 신호가 간섭으로 수신되지만 본 논문에서는 중계기와 두 번째 시간 슬롯에서 기지국으로부터 데이터를 수신하는 단말 사이의 간섭은 없다고 가정한다. 이 effective channel은 $N_{MS} \times N_{Null}$ 복소수 행렬이 되므로 사용자 i에게 전송할 수 있는 데이터열의 최대 개수는 다음과 같다.

$$N_{stream}^{Nulling} = \min(N_{MS}, N_{Null}) \quad (10)$$

$$= \min(N_{MS}, N_{BS} - N_{MS}). \quad (11)$$

i-번째 사용자 단말에서 두 번째 시간 슬롯을 이용하여 전송되는 데이터 전송량은 다음과 같다.

$$C_i^{Nulling} = \log_2 \det I_{N_{Stream}^{Nulling}} + \frac{1}{N_0} H_e^n K_s (H_e^n)^H. \quad (12)$$

3.2. Pre-Whitening 기반의 Pre-Coding 기술

제안된 pre-whitening 기반의 pre-coding 기술은 중계기를 이용하여 데이터를 전송 받는 k-번째 사용자 단말이 두 번째 슬롯에서 중계기로부터 데이터를 수신할 때, 기지국이 k-번째 사용자에게 간섭이 미칠 때 도착하는 간섭신호가 백색잡음화가 되도록 $H_{d,k}$ 행렬의 pseudo-inverse 행렬을 미리 기지국에 곱해주는 기술이다. 만약 간섭이 백색 잡음화되지 않고 colored 잡음 형태로 k-번째 단말에 수신되면 중계기에서 k-번째 사용자 단말로 가는 신호의 수신에 있어서 더욱 많은 영향을 미치게 된다. 만약, 제안된 pre-whitening 기반의 pre-coding 방식이 적용되어 간섭신호가 백색잡음화되어 k-번째 단말에 수신된다면 중계기에서 단말에게 데이터를 전송할 때, 전송률 선택시 margin의 개념을 도입하여 전송률 선택시 조금 더 보수적으로 운영하면 된다. 또한 이 방식을 통하여 pre-coding 된 간섭은 equalizer 등을 통하여 추가적으로 신호처리 할 필요가 없으므로 제안된 pre-whitening 방식은 앞서 제안한 nulling 기반의 방식과 동일하게 기존 방식에 매우 유연하게 결합될 수 있다. 행렬 A에 대한 pre-whitening 행렬은 다음 수식 $AW = Q \cdot I$을 만족하는 행렬로 정의한다. 위의 식은 기존 행렬의 역행렬 계산 수식과 비슷하지만 행렬 A가 정사각행렬이 아닌 경우에는 Pseudo-Inverse 행렬 계산법에 의하여 pre-whitening 행렬이 결정된다 [21].

여기서 주목해야 할 점은 Q가 단위행렬에 곱해져있다는 점인데, Q값은 시스템에 미리 결정된 간섭 허용치를 의미한다. 이 값은 중계기에서 데이터 전송률을 계산할 때도 고려해야할 추가적인 간섭의 양이다. 위에서 사용한 시스템 간섭 허용치 (Q)는 cognitive radio 시스템에서 간섭 온도 (interference temperature)의 개념과 유사하다. 간섭 온도는 secondary 사용자 단말이 primary 사용자 단말에게 간섭을 줄 때, primary 시스템에서 허용되는 간섭을 허용치를 정의하는 개념이다 [22], [23]. 따라서 중계기는 k-번째 사용자 단말에게 데이터를 전송할 때, 단말의 열잡음 전력이 기존의 N_0가 아니라 $N_0' = N_0 + Q$ 이라고 가정하고 데이터 전송률을 결정해야 한다.

제안된 pre-whitening 기반의 pre-coding 기술은 두 번째 시간 슬롯에서 기지국에서 pre-whitening 행렬 W를 설계하여 두 번째 시간 슬롯에 기지국에서 전송되는 신호가 동일한 주파수 자원을 이용하여 데이터를 수신하고 있는 k-번째 사용자 단말과 기지국 사이의 채널 $H_{d,k}$를 거쳐서 k-번째 사용자 단말에 되었을 때 기존에 존재하던 열잡음과 같은 형태로 수신되게 하는 기술이다. 행렬 W는 앞서 언급한대로 $H_{d,k}$ 채널 행렬의 pseudo-inverse를 구하는 방법을 통해 구현되고 수신 되었을때 수신안테나 당 Q의 전력으로 도착하도록 계산된다. 제안된 pre-whitening 기반의 pre-coding 기술을 이용하여 두 번째 시간 슬롯에서 기지국과 중계기에서 동시에 데이터를 전송할 경우 k-번째 사용자 단말에 도착하는 수신신호는 다음식으로 표현된다.

$$y_{k,2}^{Nulling} = H_{r,k} s_k + H_{d,k} \cdot Ws_i + n_{k,2}. \quad (13)$$

식 (13)에서 우항의 두 번째 항은 중계기와 동일한 주파수 자원을 이용하여 전송한 기지국으로부터 수신된 신호를 의미하는데, 행렬 W는 채널 행렬 $H_{d,k}$의 pseudo-inverse 행렬이므로 기지국으로부터 수신된 신호는 단위 행렬의 행태로 k-번째 개수는 사용자 단말에 수신된다. s_i는 i-번째 사용자에게 기지국이 두 번째 시간 슬롯을 이용하여 전송하는 데이터 신호를 가리킨다. 따라서 식 (13)은 다음 식으로 다시 쓸 수 있다.

$$y_{k,2}^{Nulling} = H_{r,k}s_k + H_{d,k}(H_{d,k}) + \cdot \sqrt{\frac{Q}{P_s}}\, s_i + n_{k,2}$$
$$= H_{r,k}s_k + n_{k,2}^{'} \quad (14)$$

$$n_{k,2}^{'} \in C^{N_{MS}\times 1}(0,(Q+N_0)I)\ . \quad (15)$$

식 (14)은 식 (3)과 열잡음의 covariance matrix에 곱해진 상수를 제외하고 동일하다. 따라서, 제안된 pre-whitening 기반의 중계기술은 기존의 k-번째 사용자 단말에게 Q만큼의 추가적인 잡음을 일으킨다. Q의 값은 시스템 운영과 다양한 여건을 고려하여 결정한다. Q의 값이 크면 기지국이 두 번째 시간 슬롯을 이용하여 추가적으로 데이터를 전송하는 단말에게 전력을 크게 할당할 수 있으므로 추가적인 데이터 전송률이 증가하지만 중계기를 통하여 데이터를 수신하는 k-번째 사용자에게 큰 간섭을 일으켜 k-번째 사용자의 데이터 전송률은 줄어든다. 반대로, Q의 값이 작으면 기지국이 두 번째 시간 슬롯을 이용하여 추가적으로 데이터를 전송하는 단말에게 전력을 크게 할당할 수 없으므로 추가적인 데이터 전송률은 감소하지만 중계기를 통하여 데이터를 수신하는 k-번째 사용자 단말은 작은 간섭만 수신되므로 k-번째 사용자의 데이터 전송률은 거의 기존 방식과 동일하게 유지될 것이다. 제안된 pre-whitening 기반의 pre-coding 방식을 적용했을 때 k-번째 사용자 단말의 데이터 전송률은 다음과 같다.

$$C_k^{whitening} = \min(C_{BS,RS}, C_{RS,MS_k}^{whitening})/2 \quad (16)$$

$$C_{BS,RS} = \log_2 \det I_{N_{MS}} + \frac{1}{N_0} H_r K_s H_r^H \quad (17)$$

$$C_{RS,MS_k}^{whitening} = \log_2 \det I_{N_{MS}} + \frac{1}{Q+N_0} H_{r,k} K_s H_{r,k}^H \quad (18)$$

앞서 언급한 대로, 기지국은 두 번째 시간 슬롯을 이용하여 다른 사용자에게 데이터를 전송하게 되는데, 기지국이 i-번째 사용자에게 두 번째 시간 슬롯을 이용하여 데이터를 전송한다면 i-번째 사용자 단말에 수신되는 신호는 다음 식으로 표현된다.

$$y_{i,2}^{whitening} = H_{d,i} \cdot Ws_i + n_{i,2}\ . \quad (19)$$

식 (19)에서 $H_{d,i}$ 행렬은 기지국에서 i-번째 사용자 단말까지의 채널을 나타낸다. 행렬 W는 pre-whitening 행렬을 의미하고 $H_{d,i} \cdot W$은 i-번째 사용자 단말의 effective channel이라 부르고 H_e^w로 표기한다. 이 effec-tive channel은 pre-whitening 행렬의 특성을 고려할 때, $N_{MS} \times N_{MS}$ 복소수 행렬이 되므로 사용자 i에게 전송할 수 있는 데이터열의 최대 개수는 N_{MS}와 같다. 따라서 i-번째 사용자 단말에게 두 번째 시간 슬롯을 이용하여 전송되는 데이터 전송량은 다음과 같다.

$$C_i^{whitening} = \log_2 \det I_{N_{MS}} + \frac{1}{N_0} H_e^w K_s (H_e^w)^H. \quad (20)$$

3.3. 제안된 중계방식과 다중 사용자 다이버시티

본 논문에서는 중계기를 통하여 데이터를 수신하는 사용자 단말이 두 번째 시간 슬롯에서 중계기로부터 신호를 수신할 때, 기지국이 또 다른 사용자에게 데이터를 전송하게 하는 셀룰라 망의 하향링크를 위한 주파수 효율적 데이터 중계 방식을 제안하였다. 제안된 중계 방식에서는 두 번째 시간 슬롯에서 중계기를 통하여 데이터를 전송받는 사용자가 기지국으로부터 받는 간섭신호를 원천적으로 없애는 nulling 기반의 pre-coding 방식과 기지국으로부터의 간섭신호가 열잡음과 같은 특성을 갖게 하여 사용자 단말에서 추가적인 equalizer 등이 필요 없도록 만드는 pre- whitening 기반의 pre-coding 방식을 제안하였다.

그러나, 제안된 nulling 또는 pre-whitening 기반의 pre-coding 방식은 중계기를 통하여 데이터를 수신하는 사용자 단말에게 간접을 줄이기 위하여 두 번째 시간 슬롯에서 기지국으로부터 추가적으로 신호를 수신하는 사용자에게는 자신의 본래 채널이 아니라 pre -coding 행렬로 인하여 변형된 채널 행렬 (effective chan-nel)을 통

하여 데이터를 수신하게 된다. 본 논문에서는 두 번째 시간 슬롯에서 기지국으로 추가적으로 데이터를 수신하는 사용자들이 사용자 다이버시티 효과를 얻을 수 있도록 하는 opportunistic 스케줄링 방식도 제안한다. 즉, 두 번째 시간 슬롯에서 기지국으로부터 신호를 수신할 수 있는 단말들은 자신의 본래 채널을 기지국으로 피드백하고 기지국은 자신이 간섭을 일으킬 k-번째 사용자를 위하여 nulling 또는 pre-whitening 방식에 의하여 pre-coding 행렬을 설계한 후, 설계된 pre-coding이 적용된 effective channel 행렬을 바탕으로 각 사용자들의 채널 용량을 계산한다.

이 때 각 사용자 단말의 채널 용량은 사용된 pre-coding 방식에 따라 식 (12) 또는 (20)에 의하여 계산된다. 기지국은 두 번째 시간 슬롯에서 채널 용량이 가장 높은 사용자 단말을 선택하여 그 단말에게 데이터를 전송한다. 이를 통하여 기지국은 k-번째 사용자 단말과 동시에 동일한 주파수 자원을 이용하여 데이터를 수신할 사용자를 결정하는 것이다. 다음 장에서는 사용자의 수가 증가할수록 제안된 중계방식이 다중 사용자 다이버시티 효과도 얻을 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 보인다.

Ⅳ. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 2장에서 설명된 시스템 상에서 제안된 다중안테나 기반의 데이터 중계방식의 성능을 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

4.1. 시뮬레이션 환경

본 논문의 모든 시뮬레이션은 2장에서 설명된 셀룰러 시스템을 기반으로 수행된다. MIMO 채널 H_r, $H_{r,k}$, $H_{d,k}$, $H_{d,i}$는 각각 $(N_{RS}\times N_{BS})$, $(N_{MS}\times N_{BS})$, $(N_{MS}\times N_{BS})$, $(N_{MS}\times N_{BS})$의 크기를 갖는 독립적인 Rayleigh 페이딩 채널 행렬로 생성된다. 실제 셀룰라 시스템에서는 기지국, 중계기, 단말 사이의 거리가 동일하지 않으므로 거리에 대한 효과를 반영하기 위해 각 MIMO 채널의 평균 채널 이득값을 ρ_r, $\rho_{r,k}$, $\rho_{d,k}$, $\rho_{d,i}$로 설정한다.

4.2. 시뮬레이션 결과

그림 3는 i-번째 사용자 단말와 기지국 사이의 평균 채널 이득값 $\rho_{d,i}$의 변화에 따른 시스템 성능을 나타낸다. 평균 채널 이득값 $\rho_{d,i}$이 커진다는 것은 i-번째 사용자 단말와 기지국 사이의 거리가 줄어들고 있음을 나타낸다고 할 수 있다. 기존 기술 및 제안 기술의 시스템 성능은 에러고딕 채널 용량으로써 다음과 같이 정의된다.

$$E[C^{conv}] = E[C_k] \tag{21}$$

$$E[C^{Nulling}] = E[C_k + C_i^{Nulling}] \tag{22}$$

$$E[C^{whitening}] = E[C_k^{whitening} + C_i^{whitening}] \tag{23}$$

기지국과 중계기는 4개의 송・수신 안테나를 지닌다고 가정하였으며, 단말기들은 2개의 수신 안테나를 지닌다고 가정한다. 기지국으로부터 직접적으로 데이터를 수신하게 되는 k-번째 사용자 단말의 개수는 1개로 가정하나, pre-whitening 기술이 적용될 때에는 2개라고 가정한다.

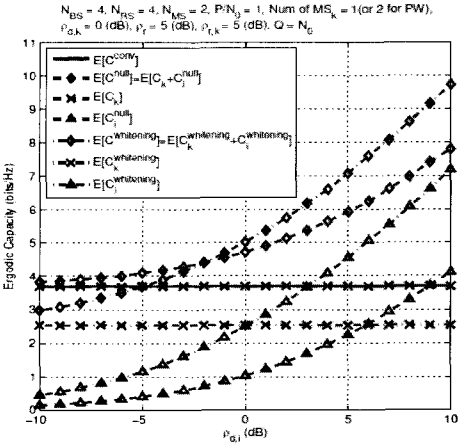

그림 3. 기지국과 i-번째 사용자 단말간의 평균 채널 이득 값 $\rho_{d,i}$의 변화에 따른 제안 기술 및 기존 기술의 성능

Fig.3. Performance of the proposed scheme according to channel gains

또한, pre-whitening 기술을 사용할 때에 i-번째 사용자 단말에서 사전에 정의된 Q값은 $Q=N_0$와 같이 백색 열잡음과 같은 정도의 크지로 가정된다. 제안된 기술들과 비교대상이 되는 기존 기술(conventional scheme)은 중계기가 k-번째 사용자 단말에게 전송할 때 기지국이 침묵(silent)하는 기술을 의미한다.

먼저 그림 3에서 기지국과 i-번째 사용자 단말 사이의 데이터 전송이 없는 기존 기술의 성능은 $\rho_{d,i}$의 변화에 무관하게 일정한 값을 보임을 알 수 있다. 반면 제안도니 nulling 기반의 pre-coding 기술의 성능 C_{Null}은 $\rho_{d,i}$의 증가에 따라 증가됨을 볼 수 있다. Nulling 기반의 성능 C^{Null}은 중계기와 k-번째 사용자 단말 사이의 성능 C_k와 기지국과 i-번째 사용자 단말 사이의 성능 $C_i^{Nulling}$의 합으로 결정된다. Nulling 기반의 pre-coding을 사용할 시에는 기지국이 i-번째 사용자 단말에게 전송할 시에 k-번째 사용자 단말에게 인가되는 간섭이 없기 때문에 그 채널 용량은 기존 기술의 성능과 동일하게 획득됨을 확인할 수 있다.

한편, nulling 기반의 pre-coding을 사용할 때에는 기존 기술에서는 수행되지 않았던 기지국과 i-번째 사용자 단말간의 전송이 수행되므로 C_i^{null}의 채널용량이 존재하며 그 평균 성능이 그림 3에 주어져있다. Nulling 기반의 기술의 $C^{Nulling}=C^k+C_i^{Null}C_{conv}+C_i^{Null}$와 같은 관계로 인해 $C^{Nulling}>C_{conv}$와 같은 특징을 갖는다.

같은 그림에서 pre-whitening 기반의 pre-coding을 사용할 시의 성능 $C^{whitening}$을 확인할 수 있다. $C^{whitening}$ sms $C_k^{whitening}+C_i^{whitening}$의 합으로 표현이 가능하다. pre-whitening 기반의 기술을 사용할의 중계기와 k-번째 사용자 단말 사이의 채널 용량 $C_k^{whitening}$는 $C_{conv}=C_k$보다 평균적으로 절대적으로 작은 값을 갖는다. 이는 pre-whitening 기반의 기술은 k-번째 사용자 단말에서 $Q=N_0$ 만큼의 백색 간섭을 허용하고, 이 간섭으로 인해 기존에 간섭이 전혀 없었을 때의 채널 용량 C_{conv}보다 작은 채널 용량값을 획득하기 때문이다. 반면, 기지국과 i-번째 사용자 단말 사이의 채널 용량 $C_i^{whitening}$는 nulling 기반의 기술의 성능 C_i^{Null}보다 더 높은 성능을 보임을 관찰할 수 있다.

이는 Pre-whitening 기반의 pre-coding을 사용하는 기술은 nulling 기반의 기술과는 달리 간섭을 제어하기 위해서 다중 안테나로 인해 생성된 자유도(degrees-of-freedom)를 소비하지 않았으므로 $N_{BS}=4$, $N_{MS}=2$ 환경에서 동시에 두 개의 단말기 까지 동시에 전송이 가능해졌기 때문에 발생한 결과이다.

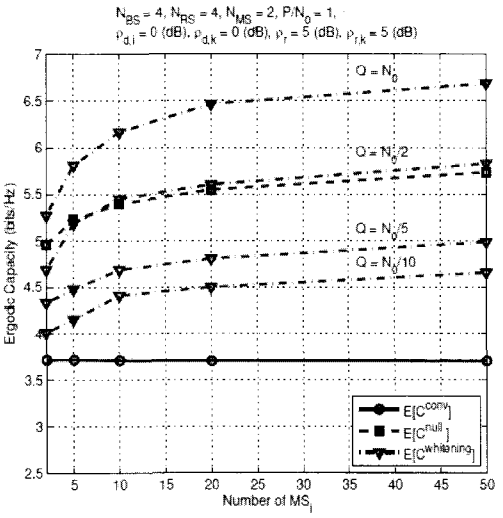

그림 4. i-번째 사용자 단말의 개수의 변화에 따른 기존 및 제안 기술의 시스템 성능
Fig. 4. Performance of the proposed scheme according to number of users in a cell

Nulling 기술의 성능 C^{Null}과 pre-whitening 기술의 성능 $C^{whitening}$을 -2 dB 이하의 낮은 $\rho_{d,i}$값에 대해서는 pre-whitening 기술의 성능이 월등하게 앞서가는 것을 볼 수 있다. 중계기와 k-번째 사용자 단말간의 채널 용량은 pre-whitening 기술이 월등히 작은 값을 갖기 때문에 $\rho_{d,i}$값이 낮아서 기지국과 i-번째 사용자 단말간의 채널 용량이 작아지는 영역에서는 nulling 기술의 성능이 앞선다. 하지만 $\rho_{d,i}$값이 커서 $C_i^{whitening}$가 C_i^{Null}를 크게 앞설 때에는 pre- whitening 기술이 중계기와 k-번째 사용자 단말간의 채널 용량의 차이를 극복하여 전체적으로 더 높은 성능을 보인다. 그림 4은 i-번째 사용자 단말의 개수의 변화에 따른 기존 및 제안 기술의 시스템 성능을 보여준다. i-번째 사용자 단말의 개수가 증가될수록 기지국은 nulling 및 pre-whitening 기술을 적용하여 전송을 수행 할 i-번째 사용자 단말을 선택할 때 다수의 i-번째 사용자 단말와의 순간 채널을 고려하여 기회적인 스케줄링(Opportunistic scheduling)을

수행한다.

다중안테나 $N_{BS}=N_{RS}=4, N_{MS}=2$ 환경에서 기지국은 i-번째 사용자 단말을 선택함에 있어 nulling을 수행했을 때에는 $N_{BS}-N_{MS}=2$의 자유도를 갖고 있으며, pre-whitening을 수행할 때에는 $N_{BS}=4$의 자유도를 갖는다. 본 시뮬레이션에서는 nulling을 수행할 때에는 하나의 i-번째 사용자 단말에게 서비스를 제공하며, pre-whitening을 수행할 때에는 두 개의 i-번째 사용자 단말의 개수와 독립적인 성능을 보이는 기존 기술 외의 nulling 및 pre- whitening의 제안 기술들의 성능은 i-번째 사용자 단말의 개수가 증가함에 따라 증가하며 기존 기술보다는 모든 경우에 대해 높은 성능을 보인다.

Nulling 기술의 성능은 $Q=N_0/2$일 때의 pre-whitening 기술의 성능과 비슷한 성능을 보인다. k-번째 사용자 단말에서 허용 가능한 간섭량인 Q가 줄어들수록 pre- whitening 기술의 성능이 감소하는 것을 볼 수 있다. 다양한 환경에 대해 약 10개 이상의 i-번째 사용자 단말에 대해서는 다중 사용자 다이버시티의 효과가 명확하게 얻어짐을 확인할 수 있다. 실제 셀룰라 시스템에서는 중계기로부터 서비스 받지 아니하는 i-번째 사용자 단말와 같은 단말기가 10개 이상 존재한다는 가정이 비현실적이지 않으므로 제안된 기술들이 다중 사용자 다이버시티의 효과를 실제로 볼 수 있는 기술임을 알 수 있다.

다시 한번 강조하자면, nulling과 pre-whitening 기반의 두 pre-coding 기술은 모두 단말기 측에 간섭 제어에 대한 어떠한 부담도 주지 않는다는 점에서 실용적인 기술이다.

V. 결 론

본 논문에서는 half-duplex 중계기의 주파수 비효율적 단점을 극복하기 위하여 중계기가 사용자 단말에게 데이터를 전송할 때, 기지국이 또 다른 사용자에게 동일한 주파수 자원을 이용하여 데이터를 전송하게 하는 기술을 제안했다. 동일한 자원을 이용하므로 중계기를 통하여 데이터를 수신하는 단말에게 간섭을 일으킬 수 있으므로 이러한 간섭을 줄이기 위하여 기지국에서 또 다른 사용자에게 데이터를 전송할 때 pre-coding을 적용한다.

시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 방식이 기존의 방식에 비하여 매우 큰 데이터 전송률을 제공하는 것을 보여주었다. 제안된 중계 방식을 차세대 이동통신 시스템에 활용하여 시스템의 주파수 효율을 증가시킬 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

[1] R. Tafazolli, *Technologies for the wireless future; Wireless World Research Forum (WWRF)*, john Wiley & sons, 2005.

[2] 3GPP, *radio aess (E-UTRAN); overall des cription; stage2*, 3GPP TS 36.300, V8.5.0, May 2008.

[3] 3GPP, *Requirements for furher advance ments for E-UTRA (LTE-Advanced)*, 3GPP TR 32.913, V8.0.0, June 2008.

[4] IEEE, *IEEE 802.16m system requirements*, IEEE 802.16m-07/02r4, Oct. 2007

[5] T. W. Ban, W. Choi, B. C. Jung, and D. K. Sung, "A Cooperative Phase Steering Scheme in Multi-Relay Node Environments," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, Vol. 8, No. 1, pp. 72-77, Jan. 2009.

[6] T. W. Ban, B. C. Jung, W. Choi, and D. K. Sung, "Performance Analysis of Two Relay Selection Schemes for Cooperative Diversity," *IEEE PIMRC'07*, Sept. 2007.

[7] B. Rankov and A. Wittneben, "Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels," *IEEE Journal on Select. Areas Communi.* , Vol. 25, No. 2, pp. 379- 389, Feb. 2007.

[8] O. Oyman, "Opportunistic scheduling and spectrum reuse in relay-based cellular OFDMA networks," IEEE GLOBECOM 2007, Nov. 2007.

[9] O. Munoz, A. Augustin, and J. Vidal, "Cellular capacity gains of cooperative MIMO transmission in the downlink," *IEEE International Zurich Seminar on Communications*, pp. 22-26, Feb. 2004.

[10] S. Zhang, S. Liew, and P. P.Lam, "Physical-Layer Network Coding," *in Proc. of ACM MobiCom 2006,* Sep. 2006.

[11] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. R. Li, and R. W. Yeung, "Network Information Flow," *IEEE Trans. Inform. Theory,* Vol. 46, No. 4, pp. 1204-1216, July 2000.

[12] IEEE 802.16m, "Relay frame structure with legacy support," *IEEE 802.16m- 08/161,* March, 2008.

[13] IEEE, *Draft Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems - Multihop Relay Specification, IEEE P802.16j/D9,* Feb., 2009.

[14] IEEE, "Radio Resource Reuse in access zone and relay zone," *IEEE C80216j- 07/140r1,* Jan., 2007.

[15] IEEE, "Relay-Station Power Control and Channel Reuse," *IEEE C80216j-06/216r1,* Nov., 2006.

[16] IEEE, "Relay Frequency Reuse Scheme," *IEEE C80216m-09/0462r1,* March, 2009.

[17] 3GPP, "Text proposal on type 1 relaying," *3GPP R1-091112,* Feb., 2009.

[18] David Astely, et al., "LTE: The Ev olution of Mobile Broadband," *IEEE Communications Magazine,* vol. 27, no. 4, April, 2009.

[19] 3GPP, "Resource Allocation and Downlink Control Channel Structure for Relay Backhaul Link," *3GPP R1-091194,* March, 2009.

[20] 3GPP, "Carrier Aggregation in Hetero geneous Networks," *3GPP R1-090357,* Jan, 2009.

[21] G. Strang, *Linear algebra and its applications,* 3rd edition, Thomson Learning, 1988.

[22] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.,* vol. 23, pp. 201- 220, Feb. 2005

[23] Tae Won Ban, Wan Choi, Bang Chul Jung and Dan Keun Sung, "Multi-User Diversity in a Spectrum Sharing System," *IEEE Trans. on Wireless Communications,* vol. 8, no. 1, Jan. 2009.

저자소개

정방철(Bang Chul Jung)

2002년 2월 아주대학교 전자공학부 학사
2004년 8월 KAIST 전기 및 전자공학과 석사
2008년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 박사
2008년 3월 ~ 2009년 8월 KAIST IT 융합연구소 팀장
2009년 9월 ~ 2010년 2월 KAIST IT 융합연구소 연구교수
2009년 3월 ~ 현재 경상대학교 정보통신공학과 조교수
※관심분야 : 이동통신, 신호처리, 협력 및 중계통신, Cognitive Radios, Compressed Sensing, 차세대이동통신시스템

강민석(Min Seok Kang)

2006년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 학사
2008년 2월 KAIST 전기 및 전자공학과 석사
2008년 1월 ~ 2011년 5월 KAIST IT융합연구소 연구원
2011년 6월 ~ 2011년 7월 경상대학교 정보통신공학과 무선통신연구실 연구원
※관심분야 : 이동통신, 신호처리, 협력 및 중계통신

이상욱(Sang-Wook Lee)

1977년 부산대학교 전자공학과 학사
1988년 부경대학교 전자공학과 공학석사
2000년 부경대학교 대학원 전자공학과 공학박사
1995년 ~ 현재 경상대학교 정보통신공학과 교수
해양산업연구소 연구원
※ 관심분야 : 신호처리

전성근(Seong Geun Jeon)

1970년 항공대학교 통신공학과 학사
1982년 건국대학교 전자공학과 공학석사
1996년 경상대학교 대학원 전자공학과 공학박사
1995년~현재 경상대학교 정보통신공학과 교수
해양산업연구소 연구원
※관심분야 : 전기장 및 마이크로파회로설계