

중계기를 사용하는 다중 사용자 OFDMA 시스템을 위한 효율적인 인지 협력 통신 기법

정희원 강민규*, 상영진*, 준회원 고병훈*, 종신회원 김광순*^o

Efficient Cognitive and Cooperative Communication Scheme for Multiuser OFDMA Systems using Relays

Mingyu Kang*, Young-Jin Sang* *Regular Members*,
Byung Hoon Ko* *Associate Member*, Kwang Soon Kim*^o *Lifelong Member*

요약

본 논문에서는 무선 중계기를 사용하는 다중 사용자 OFDMA 시스템에서 주파수 효율성을 향상시키기 위한 효율적인 인지 협력 통신 기법을 고려하였다. 먼저 인지 기술을 통한 효율적인 주파수 재사용으로 하향 링크의 처리율 (throughput)을 높일 수 있는 프레임 구조를 제안하였다. 그리고 주파수 재사용시 중계기로부터의 간섭 제거를 위한 선부호화 (precoding) 기법으로서 비교적 낮은 복잡도로 구현하기 쉬운 THP (Tomlinson-Harashima precoding)가 사용될 때, 각 사용자들이 겪는 양자화된 채널값의 오류에 따른 링크의 유효 신호대 잡음비를 수학적으로 유도하여, 이를 바탕으로 기지국이 효과적으로 적응 전송률 제어 (adaptive rate control)를 수행할 수 있도록 하였다. 시스템 레벨 모의실험을 통하여 본 논문에서 제안하는 인지 협력 통신 기법이 수행될 경우 추가적으로 발생하는 왜곡량을 함께 고려한 전체적인 시스템의 주파수 효율성이 향상됨을 보였다.

Key Words : THP, OFDMA, Cognitive Radio, Relays, LDPC Code

ABSTRACT

In this paper, we investigate the cognitive and cooperative communication scheme to improve the spectral efficiency in multiuser OFDMA systems using wireless relays. First, we propose the frame structure in which the efficient frequency reuse scheme with the cognitive technique is performed to increase the system throughput. And in the case where the THP (Tomlinson-Harashima precoding) is used for the elimination of interference from the relay, we derive the effective signal to noise ratio of the link largely affected by the channel quantization error. From the system level simulation results, it is shown that the proposed cognitive and cooperative communication scheme increases the overall system performance including the feedback overhead.

I. 서론

차세대 광대역 무선 통신 기술로서 각광을 받고 있는 직교 주파수 분할 다중 접속 방식 (orthogonal frequency division multiple access, OFDMA)은

높은 주파수 효율을 제공하며, 간단한 채널 등화기를 이용하여 주파수 선택적 감쇄 채널을 다수의 직교 주파수 비선택적 채널들로 해석할 수 있게 해줌으로써 자원 할당 및 적응 변조와 부호화 (adaptive modulation and coding, AMC) 적용 측면에서의 높

※ 이 논문은 정부 (교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2006-311-D00689).

* 연세대학교 전기전자공학과 ({kangys8, yjmich, letsko21, ks.kim}@yonsei.ac.kr) (^o : 교신저자)

논문번호 : KICS2008-10-438, 접수일자 : 2008년 10월 6일, 최종논문접수일자 : 2009년 2월 13일

은 유연성을 갖는 등 여러 장점들을 가지고 있다^[14]. 또한 OFDMA 시스템에서 셀 안에 다수의 무선 중계기를 추가 운용하여 협력 통신 기술 (cooperative communication technique)을 수행할 경우 다양성 이득 (diversity gain)을 통하여 음영 현상 (shadowing effect)을 극복하거나 전송 신호의 도달 범위를 확대하여 셀 경계에 있는 사용자들에게도 높은 전송률을 안정적으로 제공하는 등 전체적인 시스템의 용량 증대를 얻을 수 있다^[4,6]. 하지만 무선 중계기를 사용하는 OFDMA 시스템에서 지금까지 제안된 대부분의 무선 자원 관리 방법들은 기지국 및 중계기로부터 각 사용자에게 전송되는 신호들의 충돌을 방지하는 방향으로의 무선 자원 할당을 고려하고 있으며, 이러한 주파수 사용은 여전히 주파수 사용의 효율성 측면에서 많은 부족함을 가지고 있다.

한정된 무선 자원 사용의 효율성 및 유용성을 극대화시킬 수 있는 방법으로 최근에 인지 협력 통신 기술 (cognitive and cooperative communication technique)이 많은 주목을 받고 있다. 인지 협력 통신 기술은 임의의 송신 객체가 동일한 주파수 및 시간 대역을 먼저 할당 받은 객체가 전송하게 될 신호를 미리 알고 있을 경우 간섭의 영향을 최소화하면서 다른 수신 객체에게 새로운 정보를 전송하는 기술이다. 예를 들어 [7]에서는 더티 페이퍼 코딩 (dirty paper coding, DPC)을 사용할 경우 추가적인 전력 소모 없이 간섭의 영향이 없는 경우와 동일한 성능을 얻을 수 있음을 보였다. 이러한 인지 협력 기술을 이용하여 무선 자원을 재사용함으로써 가용 주파수 대역을 넓혀주고, 통신 시스템이 제공할 수 있는 용량을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 무선 중계기를 사용하는 다중 사용자 OFDMA 시스템에서 인지 협력 기술을 사용하여 시스템의 주파수 효율성 (spectral efficiency)을 향상시킬 수 있는 방법에 대하여 고려하였다. 먼저 인지를 통한 효율적인 주파수 재사용으로 하향 링크의 처리율 (throughput)을 높일 수 있는 프레임 구조를 제안한다. 스케줄링을 수행하는 기지국은 각 무선 중계기가 해당 사용자들에게 전송하게 될 신호에 대하여 미리 알고 있으므로 사용자들로부터의 궤환 (feedback)을 통하여 상응하는 채널에 대한 정보만 추가적으로 얻을 수 있다면 인지 협력 통신 기술을 이용하여 같은 주파수 및 시간 대역을 재사용함으로써 간섭의 영향을 최소화하며 셀 내부의 다른 사용자에게 새로운 정보를 추가로 전송하여 시스템의 처리율을 향상시킬 수

있다. 그리고 주파수 재사용시 중계기로부터의 간섭 제거를 위한 선부호화 (precoding) 기법으로 비교적 낮은 복잡도로 구현하기 쉬운 THP (Tomlinson-Harashima precoding)^{[8],[14]}가 사용될 때, 각 사용자들이 궤환하는 양자화 된 채널값의 오류 (channel quantization error)에 따른 링크의 유효 신호대 잡음비 (effective signal to noise ratio, ESNR)를 수학적으로 유도하여, 이를 바탕으로 기지국이 효과적으로 적응 전송률 제어 (adaptive rate control)를 수행할 수 있도록 하였다. 본 논문에서는 링크 레벨 성능을 최대화시키기 위하여 MMSE (minimum mean square error) 추정 (estimation) 기반의 THP 송수신 기법^[13]을 사용하였으며, 또한 LDPC (low density parity check) 코드가 THP와 함께 사용될 때 수신단에서 신호 복조를 위한 로그 우도비 (log likelihood ratio, LLR) 계산시 확장된 소프트 디맵퍼 (Expanded Soft Demapper)^[14]를 사용하는 경우를 고려하였다. 모의실험을 통하여 인지 협력 통신 기술이 수행될 경우 채널의 양자화 오류에 따른 하향 링크 성능의 악화 영향에 대해 분석하고, 추가적으로 발생하는 궤환량 (feedback overhead)을 함께 고려한 전체적인 시스템의 주파수 효율성이 본 논문에서 제안한 인지 협력 통신 기법을 수행함으로써 더욱 향상됨을 보인다.

본 논문에서 다룬 내용의 일부 초기 결과는 [15]에서 발표되었다. 본 논문에서는 [15]에서 제안한 기법 및 분석한 채널 양자화 오류에 따른 링크 레벨 성능 분석을 보완하고, 시스템 환경 변수에 따른 전체 시스템 성능을 심층 분석한다.

II. 시스템 모형 및 제안하는 프레임 구조

이번 장에서는 본 논문에서 사용한 시스템 모형과 필요한 가정들에 대하여 언급한다. 먼저 다중 사용자 OFDMA 시스템에서의 송수신 신호들에 대한 정의를 하고, 이어서 무선 중계기를 이용한 셀룰러 시스템 모형과 기존의 프레임 구조 및 제안하는 프레임 구조에 대하여 언급한다.

2.1 다중 사용자 OFDMA 시스템 모형

본 논문에서는 기지국과 K 명의 사용자가 존재하는 다중 사용자 OFDMA 시스템을 고려하였다. 부반송파 (subcarrier)의 개수는 N_s 개로 이루어졌으며, 한 OFDMA 심볼의 길이는 T 이다. 한 부채널 (subchannel)은 N_c 개의 부반송파로 이루어져 있으

며, 이 때 한 OFDMA 심볼은 N_B 개의 부채널로 이루어지게 된다. k 번째 사용자의 n 번째 부반송파에서의 수신 신호 $y_{k,n}$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_{k,n} = D_k^{-\eta/2} h_{k,n} x_n + w_{k,n}. \quad (1)$$

x_n 은 n 번째 부반송파에서의 송신 신호이며, $w_{k,n}$ 은 서로 독립이며 평균이 0이고 분산이 P_W 인 복소 가우시안 (complex Gaussian) 랜덤 변수이다. D_k 는 기지국과 k 번째 사용자와의 거리를 의미하며, η 는 경로 감쇄 지수 (path loss exponent)를 나타내며 본 논문에서는 4로 가정하였다. 또한 사용자들은 셀 안에 단위 면적당 균등하게 분포한다고 가정한다. $h_{k,n}$ 은 k 번째 사용자의 n 번째 부반송파에서의 감쇄 채널을 나타내며 서로 다른 사용자의 채널은 서로 독립이라 가정한다. 본 연구에서는 블록 페이딩 채널 모델을 사용하여 $N_{OFDM}T$ 동안의 시간동안 각 감쇄 채널은 변하지 않는다고 가정한다. 이 때 N_{OFDM} 은 채널의 일관 시간 (coherence time)을 반영하여 정해지는 정수값이다. ρ_B 는 셀 경계에서의 평균 신호 대 잡음비 (signal to noise ratio, SNR)을 나타내며, 셀 경계에서의 평균 수신 전력이 P_S 일 때 $\rho_B = P_S/P_W$ 이다. 여기서 D_B 가 셀 반경을 나타낼 때 k 번째 사용자의 평균 수신 SNR은 $\rho_k = \rho_B(D_B/D_k)^\eta$ 로 주어진다. 기지국과 중계기, 중계기와 사용자간의 송수신 신호 및 채널에 대한 정의는 위와 유사하게 할 수 있으므로 생략한다.

2.2 중계기를 이용하는 셀룰러 시스템 모형 및 제안하는 프레임 구조

셀의 내부에는 기지국과의 거리가 D_R 인 총 N_R (≥ 3) 개의 무선 고정 중계기가 기지국을 중심으로 하는 정 N_R 각형의 각 꼭지점에 위치하고 있으며, 각 사용자는 다음 식을 이용하여 각 부채널마다 기지국으로부터 또는 중계기를 거쳐 전송 받을 수 있는 최대 전송률 ($R_{k,n}$)에 해당하는 변조 및 부호화 (modulation and coding scheme, MCS) 옵션을 기지국으로 궤환한다.

$$R_{k,n} = \max \left[R_{k,n}^{B \rightarrow M}, \max \left\{ \min \left(\alpha R_{r,n}^{B \rightarrow R}, (1-\alpha) R_{k,n}^{R \rightarrow M} \right) \right\} \right]. \quad (2)$$

여기서 $R_{k,n}^{B \rightarrow M}$ 는 k 번째 사용자가 n 번째 부채널에서 기지국으로부터 받을 수 있는 최대 전송률을

의미하며, $R_{r,n}^{B \rightarrow R}$ 는 r 번째 중계기가 기지국으로부터 받을 수 있는 최대 전송률을 나타낸다. 또한 $R_{k,n}^{R \rightarrow M}$ 는 k 번째 사용자가 n 번째 부채널에서 r 번째 중계기로부터 받을 수 있는 최대 전송률이며, α 와 $1-\alpha$ 는 전체 프레임에서 첫 번째 부프레임 (subframe)과 두 번째 부프레임이 각각 차지하는 시간의 비율을 의미한다.

본 논문에서 기지국은 비례 공정 스케줄링 (proportional fair scheduling, PFS)^[16]을 이용하여 각 부채널을 사용자에게 할당한다고 가정하며, 이 때 n 번째 부채널에 할당된 사용자 k_n^* 는 다음과 같이 주어진다.

$$k_n^* = \underset{k}{\operatorname{argmax}} \left(R_{k,n} / \bar{R}_k \right). \quad (3)$$

여기서 \bar{R}_k 는 k 번째 사용자의 평균 전송률이며, 스케줄링 시점 t 에서 평균 전송률 $\bar{R}_k(t)$ 는 다음의 식을 이용하여 구한다.

$$\bar{R}_k(t) = \left(1 - \frac{1}{T_W} \right) \bar{R}_k(t-1) + \frac{1}{T_W} \sum_{n \in C_k(t)} R_{k,n}(t). \quad (4)$$

여기서 T_W 는 평균 전송률을 계산하는데 사용되는 윈도우 사이즈를 나타내며, $C_k(t)$ 는 스케줄링 시점 t 에서 k 번째 사용자에게 할당된 부채널들의 집합을 의미한다.

본 논문에서는 지금까지 언급한 기존의 중계기를 사용하는 다중 사용자 OFDMA 시스템에서 그림 1과 같이 중계기가 사용자들에게 신호를 전송하는 시간 및 주파수 대역에서 기지국이 인지 협력 통신 기술을 이용하여 다른 사용자들에게 추가적으로 새

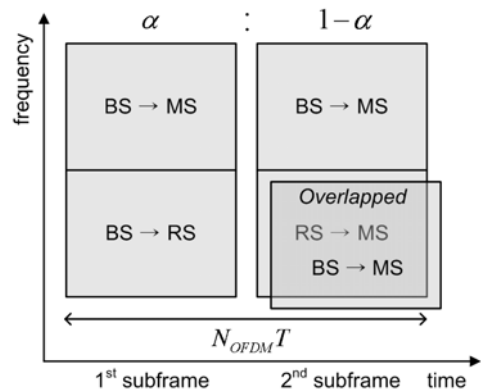


그림 1. 제안하는 프레임 구조

로운 신호를 전송하는 프레임 구조를 제안한다. 기지국은 두 번째 부프레임에서 각 중계기가 해당 사용자에게 전송하는 신호에 대하여 미리 알고 있으므로 동일한 대역을 다른 사용자들에게 추가로 할당하고 DPC 또는 THP 등의 인지 기술을 이용하여 중계기로부터의 간섭의 영향을 효과적으로 제거하며 새로운 신호를 전송할 수 있다. 이 경우 기존에 중계기로부터 신호를 전송받던 사용자들에게 간섭의 영향을 미쳐 성능의 열화가 발생할 수도 있으나, 이는 거리에 따른 간섭 신호의 감쇄로 인하여 시스템의 성능에 큰 영향을 미치지 못하게 된다.

III. THP의 링크 레벨 성능

THP는 Tomlinson^[8]과 Harashima^{[9][10]}에 의해 처음 제안되었으며, 초기에는 시간 영역에서 인접 신호간의 간섭 (inter-symbol interference)의 영향을 송신단에서 미리 제거하기 위한 용도로 많은 연구가 진행되어왔다. 또한 최근에는 이러한 THP를 다중 안테나 시스템에 적용하여 부채널들간의 간섭을 송신단에서 미리 제거하여 송신함으로써 전력의 효율성을 도모하는 기법들이 제안되었다^{[11][12]}. 본 장에서는 THP가 무선 중계기를 사용하는 다중 사용자 OFDMA 시스템에서 인지 협력 통신 기법에 사용될 때의 링크 레벨 성능에 대하여 분석한다. 각 사용자로부터 케환된 양자화된 채널 정보를 이용하여 THP를 수행할 경우의 ESNR을 유도하여 기지국이 효과적인 자원 할당 및 적응 변조와 부호화 전송을 할 수 있도록 한다.

다음과 같은 수신 신호 Y 를 고려하자.

$$Y = h_1 X_1 + h_2 X_2 + w. \quad (5)$$

여기서 X_1 은 송신 신호이고, X_2 는 간섭 신호이며, h_1 과 h_2 는 각각 상응하는 무선 감쇄 채널을 나타낸다. w 는 잡음을 나타낸다. 이때 간섭의 영향을 제거하기 위하여 THP를 사용할 경우 수신 신호 Y 는 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} Y &= h_1 \bar{X}_1 + h_2 X_2 + w \\ &= h_1 \text{Mod}\left(X_1 - \frac{h_2}{h_1} X_2\right) + h_2 X_2 + w \\ &= h_1 \left(M(X_1) - \frac{h_2}{h_1} X_2 \right) + h_2 X_2 + w \\ &= h_1 M(X_1) + w. \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\text{Mod}(x)$ 는 평균 전력 제한 조건을 만족시키기 위한 모듈로 (modulo) 연산을 나타내며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Mod}(x) = x - \left\lfloor \frac{\text{Re}(x)}{\tau} + \frac{1}{2} \right\rfloor \tau - j \left\lfloor \frac{\text{Im}(x)}{\tau} + \frac{1}{2} \right\rfloor \tau. \quad (7)$$

여기서 $\lfloor x \rfloor$ 는 x 보다 작거나 같은 정수를 나타내며, τ 는 복조 차수 (modulation order)에 따라 결정되는 상수이다. 또한 $M(x)$ 는 모듈로 연산을 거쳐 생성되는 송신 신호에 간섭 신호를 더한 값으로 성상도 (constellation) 상에서 다른 영역의 x 에 해당하는 값이다. 그림 2를 참고하면 QPSK를 사용하고, $h_1 = h_2 = 1$ 일 때 앞에서 언급한 THP 관련 심볼들의 관계를 확인할 수 있다.

모듈로 연산 후의 최종 송신 신호 \bar{X}_1 은 성상도 상에서 제한되는 경계 내에서 균등 분포 (uniform distribution)와 거의 유사하게 나타나게 되며, 이에 따라 M-QAM 신호를 송신할 경우 간섭이 없는 경우 대비 약 $M/(M-1)$ 의 상대적인 전력 손실이 발생하게 된다. 또한 THP를 사용하는 경우 수신단에서의 신호 복조시 모듈로 연산에 의한 디코딩 오류에 의해 링크 성능의 손실이 추가적으로 발생하게 된다. 본 논문에서 기지국 또는 중계기는 LDPC (low density parity check) 부호를 사용하여 신호를 전송한다고 가정한다. 간섭의 영향이 거의 없을 시 비교적 큰 잡음에 의해 잘못된 모듈로 연산으로부터 오류가 발생하는 경우의 로그 우도비 값의 신뢰도를 높이기 위하여 확장된 소프트 디맵퍼

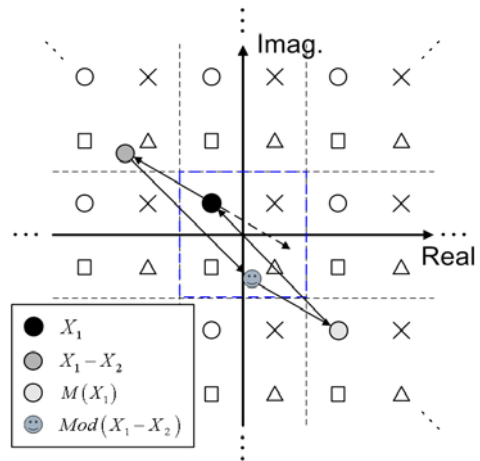


그림 2. THP 관련 심볼들의 성상도 (QPSK)

(Expanded Soft Demapper)^[14]를 사용한다.

본 논문에서는 MMSE (minimum mean square error) 추정 기법의 THP^[13]를 사용한다. 이 기법을 사용할 경우 송신단에서는 간섭 신호에 특정 상수 β 를 곱한 후 본래 보내기로 한 송신 신호에 빼어 모듈로 연산을 거친 후 송신하게 되면, 수신단에서는 수신 신호에 채널 보상 후 β 를 곱하여 정보를 추정하게 된다. β 는 수신 신호에서 유효한 잡음의 평균 전력을 감소시키는 방향으로 정해지게 되며, 송수신단에서 h_1 과 h_2 를 완벽히 추정하여 알고 있을 때 다음과 같이 주어진다.

$$\beta = \frac{P_1}{P_1 + P_W / |h_1|^2}. \quad (8)$$

여기서 P_1 과 P_W 는 최종 송신 신호 \bar{X}_1 과 잡음의 평균 전력을 나타낸다.

표 1은 본 논문에서 시스템 레벨 성능 평가에 사용할 각 MCS 옵션에 따른 THP 사용시 목표 패킷 오류율 (packet error rate, PER) 10^{-2} 을 만족시키기 위해 추가적으로 필요한 평균 송신 전력 (A_{dB})을 실험을 통해 얻어 정리한 것이다. 실험을 위하여 $N_s = 1024$, 그리고 샘플링 간격 T_s 는 $0.1\mu s$ 라고 가정하였으며, 각 사용자의 채널은 ‘ITU-R Pedestrian A’ 모델을 사용하였다. 또한 채널 상태가 변하지 않는다고 가정한 24개의 OFDMA 심볼 중 32개의 부반송파로 이루어진 한 부채널을 연속적으로 사용하여 총 768개의 QAM 심볼로 한 개의 패킷이 구성된다고 가정하였다. 각 MCS 옵션 별 다른 값을 갖는 A_{dB} 를 고려하여 다음과 같이 ESNR을 구할 수 있다.

$$ESNR = \frac{|h_1|^2 P_1}{P_W 10^{0.1 A_{dB}}}. \quad (9)$$

표 1. THP 사용시 목표 PER을 만족시키기 위해 추가적으로 필요한 평균 송신 전력 [dB]

Modulation	Code rate	A_{dB} at target PER= 10^{-2}
QPSK	1/3	2.66 dB
QPSK	1/2	2.17 dB
QPSK	3/4	1.87 dB
16QAM	1/2	0.90 dB
16QAM	2/3	0.70 dB
64QAM	1/2	0.66 dB
64QAM	2/3	0.48 dB
64QAM	3/4	0.40 dB

이제 실제 환경을 반영하여 각 사용자들이 완벽하게 추정된 채널을 양자화하여 기지국에 케환하고 이를 이용하여 기지국이 THP를 사용하는 경우에 채널 양자화 오류로 인한 링크 레벨 성능 악화 현상 및 그에 따른 ESNR에 대해 분석한다. 이 경우 송신 신호 \bar{X}_1 은 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \bar{X}_1 &= Mod\left(X_1 - \beta_T \frac{Q(h_2)}{Q(h_1)} X_2\right) \\ &= M(X_1) - \beta_T \frac{Q(h_2)}{Q(h_1)} X_2. \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $Q(x)$ 는 x 를 양자화한 값이며, β_T 는 (8)에서 h_1 대신 $Q(h_1)$ 을 대입한 값이다. $M(X_1)$ 을 추정하기 위하여 수신 신호 Y 에 채널 보상 후 $\beta_R (= \beta)$ 을 곱하여 주면 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} M(\bar{X}_1) &= \beta_R \frac{Y}{h_1} \\ &= \beta_R \left(\bar{X}_1 + \frac{w}{h_1} \right) + \beta_R \frac{h_2}{h_1} X_2. \end{aligned} \quad (11)$$

h_1 과 h_2 가 주어질 때 $M(X_1)$ 과 $M(\bar{X}_1)$ 의 차이의 제곱의 기댓값 즉 잡음 및 채널 양자화 오류에 따른 유효 잡음의 평균 전력은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} &E\left[|M(X_1) - M(\bar{X}_1)|^2\right] \\ &= E\left[\left|(1 - \beta_R)\bar{X}_1 - \beta_R \frac{w}{h_1} + X_2 \left(\beta_T \frac{Q(h_2)}{Q(h_1)} - \beta_R \frac{h_2}{h_1} \right)\right|^2\right] \\ &= (1 - \beta_R)^2 P_1 + \beta_R^2 \frac{P_W}{|h_1|^2} + P_2 \left| \beta_T \frac{Q(h_2)}{Q(h_1)} - \beta_R \frac{h_2}{h_1} \right|^2 \\ &\quad + 2(1 - \beta_R) E\left[Re\left\{ \bar{X}_1^* X_2 \left(\beta_T \frac{Q(h_2)}{Q(h_1)} - \beta_R \frac{h_2}{h_1} \right) \right\} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 \bar{X}_1 은 h_1 과 h_2 가 주어질 때 간섭 신호 X_2 를 이용하여 모듈로 연산을 통해 출력된 신호이기 때문에 \bar{X}_1 과 X_2 의 상관값 (correlation)을 유도하기가 쉽지 않으므로 유효 잡음의 상환을 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} &E\left[|M(X_1) - M(\bar{X}_1)|^2\right] \\ &\leq (1 - \beta_R)^2 P_1 + \beta_R^2 \frac{P_W}{|h_1|^2} + P_2 \left| \beta_T \frac{Q(h_2)}{Q(h_1)} - \beta_R \frac{h_2}{h_1} \right|^2 \\ &\quad + 2(1 - \beta_R) \sqrt{P_1 P_2} \left| \beta_T \frac{Q(h_2)}{Q(h_1)} - \beta_R \frac{h_2}{h_1} \right|. \end{aligned} \quad (13)$$

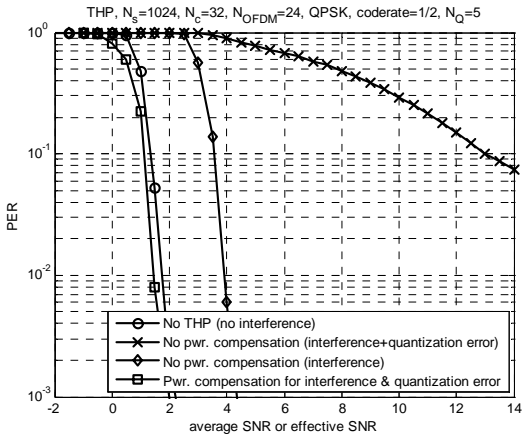


그림 3. 양자화된 채널값을 이용한 THP의 전력 보상 여부에 따른 PER 성능

따라서 양자화된 채널 정보들을 바탕으로 THP를 사용한 경우 실제 채널값과 양자화된 값과의 차이로 인하여 발생하게 되는 추가적인 전력 손실의 상한 (P_Q^{Upper})과 유효 SNR의 하한 ($ESNR_Q^{Lower}$)은 다음과 같이 각각 구할 수 있다.

$$P_Q^{Upper} = |h_1|^2 P_2 \left| \beta_T \frac{Q(h_2)}{Q(h_1)} - \beta_R \frac{h_2}{h_1} \right|^2 + 2|h_1|^2 (1 - \beta_R) \sqrt{P_1 P_2} \left| \beta_T \frac{Q(h_2)}{Q(h_1)} - \beta_R \frac{h_2}{h_1} \right|. \quad (14)$$

$$ESNR_Q^{Lower} = \frac{|h_1|^2 P_1}{(P_W + P_Q^{Upper}) 10^{0.1 A_{dB}}}. \quad (15)$$

그림 3은 양자화되어 변환된 채널 정보를 기반으로 하여 THP를 사용하였을 때 전력 보상 여부에 따른 PER 성능을 비교한 것이다. QPSK를 사용하고 부호율은 1/2인 경우를 관찰하였으며, 나머지 실험 환경은 표 1에서의 그것과 동일하다. 채널 값을 양자화하기 위한 부호 벡터 (code vector)를 찾기 위하여 LBG 알고리즘^[17]을 사용하였다. 먼저 양자화된 채널값을 이용하여 THP를 수행할 때 전력 보상을 하지 않는 경우에는 제거되지 않은 간섭과 채널 양자화 오류로 인하여 링크의 성능이 크게 악화되는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 완벽한 채널 정보를 이용하여 THP를 수행할 때 전력 보상을 하지 않는 경우에는 제거되지 않은 간섭의 영향으로 인하여 표 1에서 나타내었듯이 목표 PER (10^{-2})을 기준으로 $A_{dB} = 2.17\text{dB}$ 의 전력 손실이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 간섭과 채널 양

자화 오류에 따른 성능 악화 현상이 발생하는 경우 $ESNR_Q^{Lower}$ 을 만족시키도록 송신 전력을 보상해 준 결과 간섭이 없는 경우의 PER 성능보다 약간 향상되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 하지만 목표 PER을 기준으로 성능의 차이가 크지 않은 것을 확인할 수 있으며, 이를 통하여 본 논문에서 유도한 $ESNR_Q^{Lower}$ 이 실제 유효 SNR에 가까운 값을 나타내는 것을 증명할 수 있다. 따라서 $ESNR_Q^{Lower}$ 를 이용하여 기지국이 효과적인 자원 할당 및 적응 변조와 부호화 전송을 할 수 있다.

IV. 시스템 레벨 모의 실험

본 논문에서는 시스템의 주파수 효율성 (S)을 아래와 같이 정의한다.

$$S = \frac{C_{DL} W_{DL}}{W_{DL} + W_{UL}} \quad [\text{bps/Hz}]. \quad (16)$$

여기서 C_{DL} 은 각 자원 할당 기법을 통해 얻을 수 있는 하향 링크의 채널 용량을 나타내고, W_{DL} 은 하향 링크의 주파수 대역 크기를 나타내며 N_s/T 로 주어진다. W_{UL} 은 케환에 필요한 상향 링크의 주파수 대역 크기를 나타내며 $F/(C_{UL} N_{OFDM} T)$ 로 주어진다. 여기서 C_{UL} 은 상향 링크의 평균 채널 용량을 나타내며, 본 논문에서는 다음과 같이 사용자가 기지국에 전송할 수 있는 평균 채널 용량으로 가정한다.

$$C_{UL} = E[\log_2(1 + \rho_k)]. \quad (17)$$

또한 F 는 시스템 전체의 평균 케환량을 나타내며 THP를 사용하지 않는 경우에는 다음과 같이 주어진다.

$$F_R = N_B K(N_M + \lceil \log_2(N_R + 1) \rceil) \quad [\text{bits}]. \quad (18)$$

여기서 N_M 은 MCS 옵션을 나타내는 데 필요한 비트수이며, $\lceil \log_2(N_R + 1) \rceil$ 은 기지국으로부터 직접 전송 받을 것인지 아니면 어떤 중계기를 거쳐서 전송 받을지를 알려주는데 필요한 비트수이다. $\lceil x \rceil$ 은 x 보다 크거나 같은 정수이다. 한편, THP를 사용할 경우에는 평균 케환량이 다음과 같이 주어진다.

$$F_R^{THP} = F_R + E[N_B^{THP}]((K-1)N_M + 2N_Q) \quad [\text{bits}]. \quad (19)$$

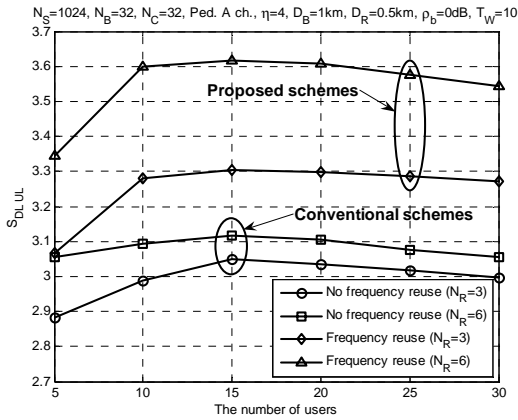


그림 4. 사용자 수에 따른 주파수 효율성

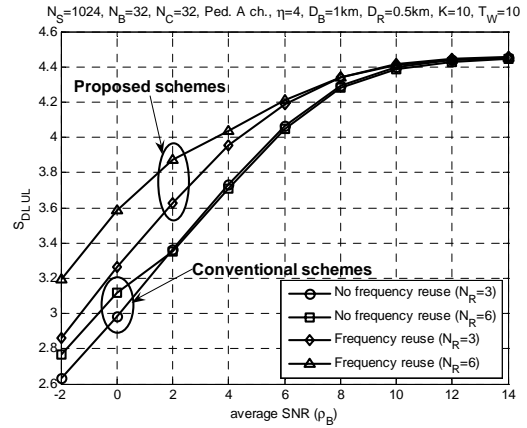


그림 6. 셀 경계의 평균 SNR에 따른 주파수 효율성

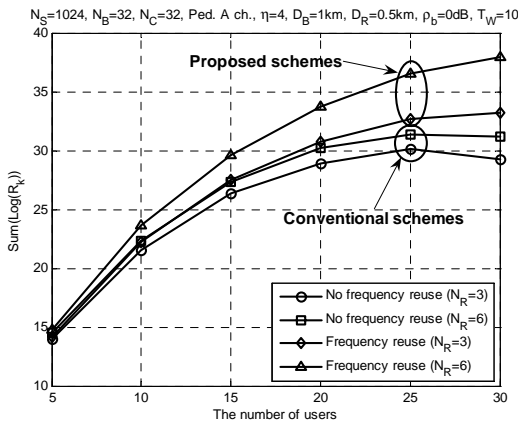


그림 5. 사용자 수에 따른 비례적 공정성

여기서 $E[N_B^{THP}]$ 는 THP를 사용하게 될 평균 부채널의 수이며, $N_Q (=5)$ 는 한 부채널의 채널값을 양자화하는데 필요한 비트수이다. 즉 THP를 사용하게 될 부채널에 먼저 할당되었던 사용자를 제외한 나머지 사용자들이 THP를 통하여 전송받을 수 있는 MCS 옵션을 케환하고, 이를 바탕으로 기지국에 의해 선택된 사용자는 THP에 필요한 채널 정보를 양자화하여 보고한다.

그림 4와 5는 무선 중계기를 이용하는 OFDMA 셀룰러 시스템에서 기존의 자원 할당 방식과 여기에 본 논문에서 제안하는 인지 협력 통신 기술이 함께 사용되었을 때 사용자의 수에 따른 주파수 효율성 (S) 및 비례적 공정성 ($\sum_k \log R_k$)을 각각 나타낸 것이다. 중계기의 수는 3개, 6개인 경우를 각각 고려하였으며, 실험을 위하여 $\alpha=1/2$, $D_B=1$

km, $D_R=0.5$ km, $T_W=10$, $N_{OFDM}=48$ 그리고 $\rho_B=0$ dB라고 가정하였고, 나머지 실험 환경은 앞의 실험들에서의 그것과 동일하다고 가정하였다. 먼저 그림 4에서는 사용자의 수가 증가할수록 다중 사용자 다양성 이득 (multiuser diversity gain)에 의해 하향 링크의 성능이 향상되는 반면, 케환량의 증가에 따라 요구되는 상향 링크 주파수 대역의 증가로 인해 각 기법의 경우 최적의 사용자 수에서 주파수 효율성 S 가 최대값을 갖게 되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 동일한 실험 환경에서 제안한 기법을 사용하는 경우 효율적인 주파수 재사용으로 인하여 시스템의 전체적인 주파수 효율성이 크게 향상되는 것을 확인할 수 있다. 그림 5에서도 마찬가지로 제안하는 인지 협력 통신 기법을 사용할 경우 비례적 공정성 또한 크게 향상되는 것을 관찰할 수 있으며, 특히 사용자의 수가 커질수록 기존의 기법 대비 증가폭이 커지는 것을 관찰할 수 있다. 그 이유는 효율적인 주파수 재사용 기법을 사용할 경우 하향 링크의 성능이 크게 향상되고, 이로 인하여 각 사용자의 평균 전송률도 함께 상승하기 때문이다.

그림 6은 기존의 기법과 제안하는 기법이 각각 사용될 때 셀 경계의 평균 SNR (ρ_B)에 따라 주파수 효율성을 관찰한 것이다. 실험 환경은 그림 4, 5와 동일하며, 사용자의 수는 10명으로 가정하였다. 먼저 셀 경계의 평균 SNR이 상대적으로 낮은 지역에서는 그림 4의 결과와 마찬가지로 제안하는 기법을 사용할 경우 기존의 기법에 비해 주파수 효율성이 크게 향상되는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 동일한 기법의 경우 중계기의 수가 증가함에

따라서 다양성 이득을 통해 향상된 하향 링크의 채널 용량으로 인해 주파수 효율성이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 모든 기법이 ρ_B 가 증가할수록 동일한 값으로 수렴하는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 평균 SNR이 증가할수록 각 사용자는 중계기를 거치지 않고 기지국으로부터 신호를 직접 전송받을 확률이 증가하게 되고, 이에 따라 중계기를 거쳐 전송하게 될 확률 및 THP를 이용하여 주파수 재사용을 하게 될 확률이 감소하게 되기 때문이다.

V. 결 론

본 연구에서는 무선 중계기가 존재하는 다중 사용자 OFDMA 시스템에서 인지 협력 통신 기술을 사용하여 전체적인 시스템 성능을 향상시킬 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. 먼저 기존 프레임 구조에서 중계기가 사용자에게 정보를 전송하는 부프레임 대역을 기지국이 인지 기술을 통해 주파수를 재사용하여 다른 사용자에게 새로운 정보를 추가적으로 전송하는 새로운 형태의 프레임 구조를 제안하였다. 그리고 주파수 재사용시 겪게 되는 간섭을 제거하기 위한 방법으로 기지국이 THP 기법을 사용하고, 각 사용자가 THP에 필요한 채널값의 정보를 양자화하여 궤환하는 경우를 고려하였으며, 이 때 남아있는 간섭 및 채널 양자화 오류에 따른 링크 레벨 성능을 분석하였다. 시스템 레벨 모의실험을 통하여 본 논문에서 제안한 인지 협력 통신 기법을 사용할 경우 추가적으로 발생하는 궤환량만큼 함께 고려된 전체적인 시스템의 주파수 효율성 및 비례적 공정성이 크게 향상됨을 보였다.

참 고 문 헌

[1] C.Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Lataief, and R. D. Murch, "Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 17, no. 10, pp. 1747-1758, October 1999.

[2] Didem Kivanc, Guoqing Li, and Hui Liu, "Computationally efficient bandwidth allocation and power control for an OFDMA system," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 2, no. 6, pp. 1150-1158, November 2003.

[3] K. S. Kim, "Adaptive modulation and power allocation technique for LDPC-coded

MIMO-OFDMA cellular systems," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E88-B, pp.4410-4412, November 2005.

[4] R. Pabst, et al, "Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 9, pp. 80-89, September 2004.

[5] H. Yanikomeroglu, D.D. Falconer, and V. Sreng, "Coverage enhancement through two-hop peer-to-peer relaying in cellular radio networks," *World Wireless Research Forum Meeting* no.7, Eindhoven, the Netherlands, December 2002.

[6] Jaewon Cho, and Zygmunt J. Haas, "On the Throughput Enhancement of the Downstream Channel in Cellular Radio Networks through Multihop Relaying," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 22, no. 7, September 2004.

[7] M. H. M. Costa, "Writing on dirty paper," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 29, pp. 439 - 441, May 1983.

[8] M. Tomlinson, "New automatic equalizer employing modulo arithmetic," *Electron. Lett.*, vol. 7, pp. 138 - 139, Mar. 1971.

[9] H. Miyakawa and H. Harashima, "Information transmission rate in matched transmission systems with peak transmitting power limitation," in *Nat. Conf. Rec., Inst. Electron., Inform., Commun. Eng. of Japan*, no. 1269, p. 1268, Aug. 1969.

[10] H. Harashima and H. Miyakawa, "Matched-transmission technique for channels with intersymbol interference," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-20, pp. 774 - 780, Aug. 1972.

[11] K. Kusume, M. Joham, W. Utschick, and G. Bauch, "Efficient Tomlinson-Harashima precoding for spatial multiplexing on flat MIMO channel," in *Proc. Int. Conf. Commun. (ICC)*, vol. 3, pp. 2021 - 2025, May 2005.

[12] C. Windpassinger, R. F. H. Fischer, T. Vencel and J. B. Huber, "Precoding in multiantenna and multiuser communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, No.

4, pp. 1305 - 1316, July 2004.

- [13] D. Tse and P. Viswanath, "Fundamentals of wireless communications," *Cambridge university press*, 2005.
- [14] E. C. Y. Peh and Y.-C. Liang, "Expanded soft demapper for LDPC coded GMD-THP MIMO System," in *Proc. IEEE Radio and Wireless Symp.*, pp. 519-522, Jan. 2007.
- [15] 강민규, 상영진, 이형열, 전기준, 김광순, "중계기를 사용하는 다중 사용자 OFDMA 시스템에서의 THP를 이용한 효율적인 주파수 재사용 기법," *한국통신학회 하계종합학술발표회 논문집*, 제주, 2008년 7월.
- [16] H. Kim, K. Kim, Y. Han, and S. Yun, "A proportional fair scheduling for multicarrier transmission systems," in *Proc. IEEE Vehic. Techn. Confer. (VTC)*, vol. 1, pp. 409-413, September 2004.
- [17] Y. Linde, A. Buzo, and R. M. Gray, "An Algorithm for Vector Quantizer Design," *IEEE Transactions on Commun.*, pp. 702-710, January 1980.

강 민 규 (Mingyu Kang) 정회원



2006년 2월 연세대학교 기계 전자공학부 (공학사)
 2008년 2월 연세대학교 전기 전자공학과 (공학석사)
 2008년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 <관심분야> 이동통신, OFDMA, 다중안테나 시스템

상 영 진 (Young-Jin Sang) 정회원



2005년 8월 연세대학교 기계 전자공학부 (공학사)
 2007년 8월 연세대학교 전기 전자공학과 (공학석사)
 2007년 9월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 <관심분야> 이동통신, OFDMA, 웹토셀

고 병 훈 (Byung Hoon Ko) 준회원



2006년 8월 연세대학교 전기 전자공학부 (공학사)
 2007년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 석박사통합과정
 <관심분야> 협력통신, 계층간 최적화

김 광 순 (Kwang Soon Kim) 중신회원



1994년 2월 한국과학기술원 전기 및전자공학과 (공학사)
 1996년 2월 한국과학기술원 전기 및전자공학과 (공학석사)
 1999년 2월 한국과학기술원 전기 및전자공학과 (공학박사)
 1999년 3월~2000년 3월 Dept.

ECE, UC San Diego, 박사후연구원

2000년 4월~2004년 2월 한국전자통신연구원 선임 연구원
 2004년 3월~2009년 2월 연세대학교 전기전자공학부 조교수
 2009년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학부 부 교수
 2006년 1월~현재 한국통신학회 논문지 편집위원, 한국통신학회, 대한전자공학회 중신회원, IEEE 준석학위원
 <관심분야> 이동통신, 변복조 방식, 다중안테나 시스템, 채널부호, 계층간 최적화