

# 중계기를 사용하는 다중 사용자 OFDMA 시스템에서의 THP 를 이용한 효율적인 주파수 재사용 기법

강민규, 상영진, 이형열, 전기준, 김광순  
연세대학교 전기전자공학과  
{kangys8, yjmich, neolee, puco201, ks.kim} @yonsei.ac.kr

## Efficient Frequency Reuse Scheme with THP for Multiuser OFDMA Systems using Relays

Mingyu Kang, Young Jin Sang, Hyung Yeol Lee, Ki Jun Jeon, Kwang Soon Kim

Department of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University

134 Sinchon-dong, Seodaemun-gu, Seoul 120-749, Korea

### 요 약

본 논문에서는 무선 중계기를 사용하는 다중 사용자 OFDMA 시스템의 주파수 효율성을 향상시키기 위한 방법으로서 THP 를 이용한 주파수 재사용 기법을 제안한다. 기지국은 각 중계기로부터 임의의 사용자에게 전송되는 신호에 대하여 알고 있기 때문에 필요한 채널 정보를 사용자로부터 궤환 받아 THP 를 사용하여 셀 안쪽의 사용자에게 동일한 주파수 대역을 재사용하여 전송함으로써 시스템의 주파수 효율성을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 각 사용자들이 THP 에 필요한 채널 정보를 양자화하여 기지국에 궤환하는 경우를 고려하였으며, 이 경우에 양자화의 오류에 따른 링크 레벨 성능에 대하여 분석하였다. 그리고 시스템 레벨 모의 실험을 통하여 제안하는 주파수 재사용 기법을 수행할 경우 추가적으로 발생하는 궤환량을 함께 고려한 전체적인 시스템의 주파수 효율성이 향상됨을 보였다.

## 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 효율성을 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 높은 유연성을 갖는 등 여러 장점들을 가지고 있다 [1]-[3]. 또한 OFDMA 시스템에서 셀 안에 다수의 무선 중계기를 추가 운용하여 협력 통신 기술을 사용할 경우 음영 현상을 극복하거나 전송 신호의 도달 범위를 확대하여 셀 경계에 있는 사용자에게도 높은 전송률을 안정적으로 제공하는 등 전체적인 셀룰러 시스템의 용량 증대를 얻을 수 있다 [4]-[6].

본 논문에서는 무선 중계기가 존재하는 다중 사용자 OFDMA 시스템에서 주파수 효율성을 향상시키기 위한 방법으로서 THP (Tomlinson-Harashima precoding) [7]-[10]를 이용한 효율적인 주파수 재사용 기법을 제안한다. THP 는 dirty paper coding 의 일종으로 복조 차수 (modulation order)가 낮을수록 추가적인 전력 손실이 발생하긴 하지만, 비교적 낮은 복잡도로 구현하기 쉬운 장점을 가지고 있는 간섭 제거 기법이다. 기지국은 무선 중계기로부터 임의의 사용자에게 전송되는 신호에 대해 미리 알고 있으므로 사용자로부터 궤환을 통하여 채널에 대한 정보만 추가적으로 얻을 수 있다면 THP 를 이용한 주파수 재사용을 통해 셀 안쪽의 다른 사용자에게

정보를 추가적으로 전송함으로써 전체적인 시스템의 주파수 효율성을 향상시킬 수 있다.

실제 상황에서 THP 를 사용할 경우 각 사용자는 채널 정보를 양자화 (quantization) 하여 기지국에 궤환하여야 하므로, 본 논문에서는 이를 고려하여 THP 의 양자화 오류에 따른 링크 레벨 성능에 대하여 분석한다. 또한, 시스템 레벨 모의 실험을 통하여 제안하는 주파수 재사용 기법을 수행할 경우 추가적으로 발생하는 궤환량을 함께 고려한 전체적인 시스템의 주파수 효율성이 향상됨을 보인다.

## II. 시스템 모형 및 제안하는 프레임 구조

### 1. 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 있으며, 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 0 이고 분산이  $P_w$  인 복소

가우시안 (complex Gaussian) 랜덤 변수이다.  $D_k$  는 기지국과  $k$  번째 사용자와의 거리를 의미하며,  $\eta$  는 경로 감쇄 지수 (path loss exponent)를 나타내며 본 논문에서는 4 로 가정하였다. 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 논문에서는 블록 페이딩 채널 모델을 사용하여  $N_{OFDM}T$  동안의 시간 동안 각 감쇄 채널은 변하지 않는다고 가정한다. 이 때  $N_{OFDM}$  은 채널의 일관 시간 (coherence time)을 반영하여 정해지는 정수값이다.  $\rho_b$  는 셀 경계에서의 평균 신호 대 잡음비 (signal to noise ratio, SNR)를 나타내며, 셀 경계에서의 평균 수신 전력이  $P_s$  일 때  $\rho_b = P_s / P_w$  이다. 이 때  $k$  번째 사용자의 평균 수신 SNR 은  $\rho_k = \rho_b (D_b / D_k)^{\eta}$  로 주어진다. 기지국과 중계기, 중계기와 사용자간의 송수신 신호 및 채널에 대한 정의는 위와 유사하게 할 수 있으므로 생략한다.

## 2. 중계기를 이용하는 셀룰러 시스템 모형 및 제안하는 프레임 구조

셀의 내부에는 기지국과의 거리가  $D_r$  인 총 6 개의 무선 고정 중계기가 기지국을 중심으로 하는 정육각형의 꼭지점 지점에 위치하고 있으며, 각 사용자는 다음 식을 이용하여 각 부채널마다 기지국으로부터 또는 중계기를 거쳐 전송 받을 수 있는 최대 전송률에 해당하는 MCS 옵션을 기지국으로 제출한다.

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

여기서  $R_{k,n}^{BS \rightarrow MS}$  는  $k$  번째 사용자가  $n$  번째 부채널에서 기지국으로부터 받을 수 있는 최대 전송률을 의미하며,  $R_{r,n}^{BS \rightarrow RS}$  은  $r$  번째 중계기가 기지국으로부터 받을 수 있는 최대 전송률을 나타낸다. 또한  $R_{k,n}^{RS \rightarrow MS}$  는  $k$  번째 사용자가  $r$  번째 중계기로부터 받을 수 있는 최대 전송률이며,  $\alpha$  와  $1-\alpha$  는 전체 프레임에서 첫 번째 부프레임과 두 번째 부프레임이 차지하는 시간의 비율을 의미한다. 기지국은 비례 공정 스케줄링 (proportional fair scheduling) [11]을 이용하여 각 부채널을 사용자에게 할당하며, 이 때  $n$  번째 부채널에 선택된 사용자  $k_n^*$  는 다음과 같이 주어진다.

$$k_n^* = \arg \max_k (R_{k,n} / R_k). \quad (3)$$

여기서  $R_k$  는  $k$  번째 사용자의 평균 전송률이며, 시간  $t$  에서 평균 전송률  $R_k(t)$  는 다음과 같다.

$$R_k(t) = (1-1/T_c)R_k(t-1) + 1/T_c \sum_{n \in C_k(t)} R_{k,n}(t). \quad (4)$$

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

본 논문에서는 지금까지 언급한 기존의 중계기를 이용하는 셀룰러 시스템에서 그림 1 과 같이 중계기가 사용자에게 신호를 전송하는 주파수 대역을 기지국이 THP 를 이용하여 셀 내부의 사용자에게 추가적으로

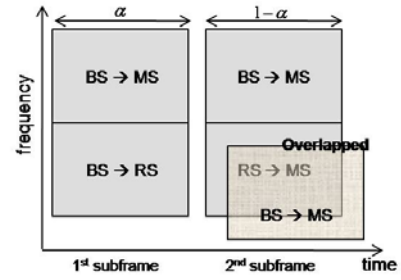


그림 1. THP 제안하는 프레임 구조

신호를 전송하는 프레임 구조를 제안한다. 기지국은 두 번째 부프레임에서 중계기가 전송하는 신호를 미리 알고 있으므로 동일한 대역을 중계기 보다 셀 안쪽에 위치해 있는 사용자에게 추가로 할당하고 THP 를 이용하여 중계기로부터의 간섭의 영향을 효과적으로 제거하며 신호를 전송할 수 있다. 이 경우 기존에 중계기로부터 신호를 전송 받던 사용자에게 간섭의 영향을 미쳐 성능의 열화가 발생할 수도 있으나, 이는 거리에 따른 간섭 신호의 감쇄로 인하여 시스템의 성능에는 큰 영향을 미치지 못하게 된다.

## III. THP 의 링크 레벨 성능

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 THP 를 사용할 경우 수신 신호  $Y$  는 다음과 같이 나타난다.

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

여기서  $\text{Mod}(\cdot)$  는 평균 전력 제한 조건을 만족시키기 위한 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  $\lfloor s \rfloor$  는  $s$  보다 작거나 같은 정수를 나타내며,  $\tau$  는 복조 차수에 따라 결정되는 상수이다. Modulo 연산 후의 최종 송신 신호  $\widehat{X}_1$  은 성상도 (constellation) 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 THP 를 사용하는 경우 수신단에서의 신호 복조시 demodulo 연산에 의한 디코딩 오류에 의해 링크 성능의 손실이 추가적으로 발생하게 된다. 본 논문에서 기지국 또는 중계기는 LDPC (low density parity check) 부호를 사용하여 신호를 전송한다. 간섭의 영향이 거의 없을 시 비교적 큰 잡음에 의해 잘못된 demodulo 연산에 의한 오류가 발생하는 경우의 로그 우도비 값의 신뢰도를 높이기 위하여 Expanded Soft Demapper [9]를 사용한다.

본 논문에서는 MMSE (minimum mean square error) 추정 기법의 THP [10]를 사용한다. 이 기법을 사용할 경우 송신단에서는 간섭 신호에 특정 상수  $\beta$ 를 곱한 후 본래 보내기로 한 송신 신호에 빼어 modulo 연산을 거친 후 송신하게 되면, 수신단에서는 수신 신호에  $\beta$ 를 곱하여 정보를 추정하게 된다.  $\beta$ 는 수신 신호에서 유효한 잡음의 평균 전력을 감소시키는 방향으로 정해지게 되며, 다음과 같이 주어진다.

$$\beta = P_1 / (P_1 + P_w / |h_1|^2). \quad (8)$$

여기서  $P_1$ 은 최종 송신 신호  $\hat{x}_1$ 의 평균 전력을 나타낸다.

표 1은 본 논문에서 시스템 레벨 성능 평가에 사용할 각 MCS 옵션에 따른 목표 패킷 오류율 (packet error rate, PER),  $10^{-2}$ 을 만족시키기 위해 추가적으로 필요한 평균 전력의 양 ( $A_{dB}$ )을 실험을 통해 얻어 정리한 것이다. 실험을 위하여  $N_s=1024$ , 그리고 샘플링 간격  $T_s$ 는 0.1us 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 유효 SNR (effective SNR, ESNR)을 구할 수 있다.

$$ESNR = h_1^2 P_1 / (P_w 10^{0.1A_{dB}}). \quad (9)$$

양자화된 채널 정보들을 바탕으로 THP를 사용할 경우에는 실제 채널값과 양자화된 값과의 차이로 인하여 성능 열화가 발생하게 된다.  $Q(x)$ 가  $x$ 의 양자화된 값을 나타낼 때, 수신단에서 본래의 채널값을 완벽히 추정할 수 있다고 가정하면 수신단에서 필요한  $\beta_r$ 은 식 (8)과 동일하게 주어지고, 송신단에서 필요한  $\beta_t$ 는  $P_1 / (P_1 + P_w / |Q(h_1)|^2)$ 로 주어진다. 이 경우에는 본래의 채널값과 양자화된 채널값의 차이로 인하여 간섭의 영향이 완벽하게 사라지지 않게 되며, M-QAM을 사용할 경우 발생하는 추가적인 전력 손실  $P_q$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_q = \frac{|h_1|^2 P_2 M}{M-1} \left| \beta_T \frac{Q(h_2)}{Q(h_1)} - \beta_R \frac{h_2}{h_1} \right|^2 + \frac{2|h_1|^2 P_2 M}{M-1} (1-\beta_R) \beta_T \left| \beta_T \frac{Q(h_2)}{Q(h_1)} - \beta_R \frac{h_2 Q(h_2)}{h_1 Q(h_1)} \right|. \quad (10)$$

여기서  $P_2$ 는 간섭의 평균 전력을 나타낸다.  $P_q$ 를 식 (9)에 추가적으로 고려하면 양자화되어 케환된 채널을 기반으로 하는 경우의 수신 신호의 ESNR은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$ESINR = h_1^2 P_1 / [(P_w + P_q) 10^{0.1A_{dB}}]. \quad (11)$$

그림 2는 양자화되어 케환된 채널 값을 기반으로 하는 THP를 사용하였을 때 전력 보상 여부에 따른 PER 성능을 비교한 것이다. QPSK ( $M=4$ ), 부호율은 1/3인 경우를 관찰하였으며, 나머지 실험 환경은 표 1에서의 그것과 동일하다. 채널값을 양자화하기 위한 부호 벡터 (code vector)를 찾기 위하여 LBG 알고리즘 [12]을 사용하였다.

Modulation	Coderate	$A_{dB}$ at target PER = $10^{-2}$
QPSK	1/3	3.2 dB
QPSK	1/2	2.7 dB
QPSK	3/4	2.3 dB
16QAM	1/2	1.5 dB
16QAM	2/3	1.0 dB
64QAM	1/2	1.0 dB
64QAM	2/3	0.7 dB
64QAM	3/4	0.5 dB

표 1. THP 기법 사용시 목표 PER을 만족시키기 위해 추가적으로 필요한 평균 송신 전력

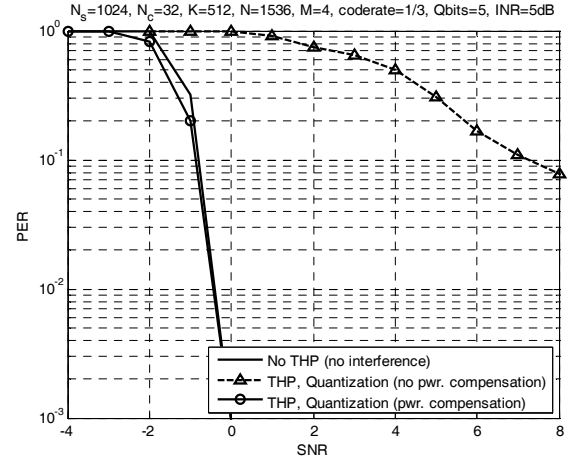


그림 2. 양자화된 채널값을 이용한 THP의 전력 보상 여부에 따른 PER 성능

제거되지 않은 간섭의 영향으로 인하여 링크의 성능이 많이 악화되는 것을 관찰할 수 있으며, 식 (11)과 표 1을 이용하여 ESNR을 만족시키도록 송신 전력을 보상해준 결과 간섭이 없는 경우의 PER 성능과 동일하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이를 통하여 본 논문에서 분석한 ESNR 계산 방법이 옳다는 것을 확인할 수 있다.

#### IV. 시스템 레벨 모의 실험

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

$$S = C_{DL} W_{DL} / (W_{DL} + W_{UL}) \quad [bps / Hz]. \quad (12)$$

여기서  $C_{DL}$ 은 하향 링크의 주파수 효율성을 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 나타낸다. 또한  $F$ 는 시스템 전체의 케환량을 나타내며 THP를 사용하지 않는 경우  $K(N_M + N_R)N_b$  비트로 주어지게 된다. 여기서  $N_M (=3)$ 는 MCS 옵션을 나타내는 데 필요한 비트수이며,  $N_R (=3)$ 는 기지국으로부터 직접 전송 받을 것인지 아니면 어떤 중계기를 거쳐서 전송 받을지를 알려주는데 필요한 비트수이다. THP를 사용할 경우에는  $E[K_m](N_M + 2N_Q)N_b$  비트의 추가적인 케환량이 필요하게 되며, 여기서  $N_Q (=5)$ 는 한 부채널의 채널값을 양자화하는데 필요한 비트수이다.

그림 3 과 4 는 기존의 무선 중계기를 이용하는 OFDMA 셀룰러 시스템에서 제안하는 주파수 재사용 기법의 사용 여부에 따른 주파수 효율성 및 비례적 공정성을 나타낸 것이다. 실험을 위하여  $\alpha=1/2$ ,  $D_b=1000m$ ,  $D_r=500m$ ,  $C_{UL}=1.5142$  bps/Hz 그리고  $\rho_b=0dB$  라고 가정하였으며, 나머지 실험 환경은 앞의 실험들에서의 그것과 동일하다고 가정하였다. 먼저 그림 3 에서 THP 를 이용한 주파수 재사용 기법을 사용할 경우 케환에 필요한 상향 링크가 함께 고려된 시스템의 전체적인 효율성이 크게 향상되는 것을 확인할 수 있다. 본 실험 환경에서는 사용자의 수가 20 명일 경우 가장 큰 효율성을 나타내며, 이 때 주파수 재사용 기법을 사용하지 않는 경우 대비 약 31.6%의 효율성 증가를 얻을 수 있음을 볼 수 있다. 그림 4 에서도 마찬가지로 THP 를 이용한 주파수 재사용 기법을 사용할 경우 비례적 공정성이 크게 향상되는 것을 관찰할 수 있으며, 특히 사용자의 수가 커질수록 주파수 재사용 기법을 사용하지 않는 경우 대비 증가폭이 커지는 것을 관찰할 수 있다. 그 이유는 주파수 재사용 기법을 사용할 경우 하향 링크의 성능이 크게 향상되고, 이로 인하여 각 사용자의 평균 전송률도 함께 상승했기 때문이다.

## V. 결론

본 논문에서는 무선 중계기가 존재하는 다중 사용자 OFDMA 시스템에서 중계기가 사용자에게 정보를 전송하는 부프레임에 THP 를 이용한 주파수 재사용 기법을 수행하는 새로운 형태의 프레임 구조를 제안하였다. 그리고 각 사용자가 THP 에 필요한 채널값의 정보를 양자화하여 기지국에 케환하는 경우를 고려하였고, 이를 바탕으로 기지국이 THP 를 이용하여 신호를 전송할 경우에 양자화의 오류에 따른 링크 레벨 성능을 분석하였다. 또한 시스템 레벨 모의 실험을 통하여 본 논문에서 제안한 주파수 재사용 기법을 사용할 경우 추가적으로 발생하는 케환량이 함께 고려된 전체적인 시스템의 주파수 효율성 및 비례적 공정성이 크게 향상됨을 보였다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

- [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.

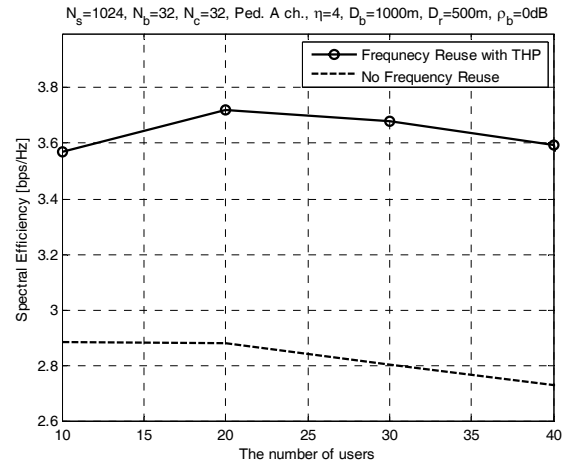


그림 3. 제안하는 주파수 재사용 기법의 사용 여부에 따른 주파수 효율성

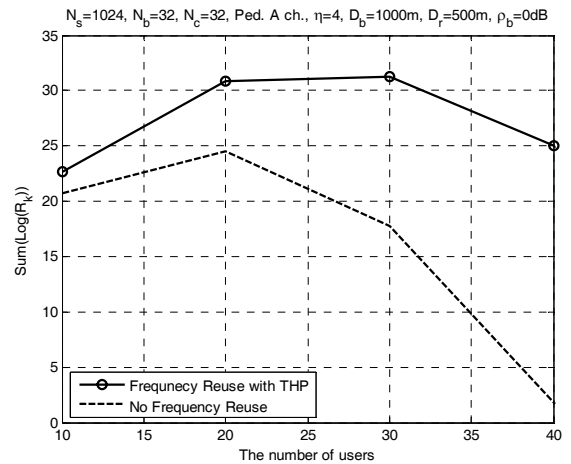


그림 4. 제안하는 주파수 재사용 기법의 사용 여부에 따른 비례적 공정성

- [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. Tomlinson, "New automatic equalizer employing modulo arithmetic," *Electron. Lett.*, vol. 7, pp. 138-139, Mar. 1971.
- [8] H. Harashima and H. Miyakawa, "Matched-transmission technique for channels with intersymbol interference," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-20, pp. 774-780, Aug. 1972.
- [9] 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.
- [10] D. Tse and P. Viswanath, "Fundamentals of wireless communications," Cambridge university press, 2005.
- [11] 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.
- [12] Y. Linde, A. Buzo, and R. M. Gray, "An Algorithm for Vector Quantizer Design," *IEEE Transactions on Commun.*, pp. 702-710, January 1980.