

논문 2011-48TC-4-10

OFDMA 시스템에서 지연 QoS를 지원하는 2-D 사용자 다중화 기법에 대한 높은 SNR영역에서의 성능 분석

(High SNR Analysis of User-Multiplexing Technique Provisioning
Delay QoS in OFDMA Systems)

안 성 우*, 홍 대 식**

(Seongwoo Ahn and Daesik Hong)

요 약

본 논문은 OFDMA 시스템에서 지연 QoS와 시스템 용량 간의 트레이드오프에 대해 2차원 자원할당 관점에서 살펴보고, 주파수 다이버시티와 시간축 사용자 다중화가 지연 QoS 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 바탕으로 지연 QoS가 시스템의 주파수 효율 (spectral efficiency)에 영향을 미치는 영향을 살펴보았다. 특히, 높은 SNR 영역에서 시간축 다중화도 (degree of multiplexing)에 따른 주파수 효율의 변화를 분석하여 효율적인 다중화 기법에 대한 방향을 제시하였다. 마지막으로 모의실험을 통하여 분석 결과를 검증하였으며, 최적의 다중화도를 이용할 때 상당한 성능이득을 얻을 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we study the throughput-delay tradeoff of OFDMA systems in context of 2-dimensional resource allocation, and analyze the effect of frequency diversity and user-multiplexing in time domain that has on delay QoS performance. Based on the analysis results, we investigate the impacts of delay QoS on spectral efficiency. In high SNR regime, the optimal DoM (degree of multiplexing) maximizing the spectral efficiency is identified. The results of the high SNR analysis can give us an intuition on an efficient resource allocation policy. Finally, through the simulation results, we verify that our approach with its optimal DoM yields substantial capacity gain.

Keywords : OFDMA, high SNR, user-multiplexing, QoS, effective capacity

I. 서 론

Orthogonal frequency division multiple access (OFDMA)방식은 광대역의 무선 채널에서 고속 데이터 전송을 가능하게 하는 다중 접속 방식으로 802.16e, 3GPP LTE, 802.20 과 같은 광대역무선 시스템들을 위한 표준의 다중 접속 시스템으로 채택되어 있다.

OFDMA 시스템에서는 주파수 다이버시티 (frequency diversity)와 다중사용자 다이버시티 이득 (multiuser diversity gain)을 효율적으로 활용하는 무선자원할당 (radio resource allocation; RRA) 및 스케줄링 알고리즘에 의해서 상당한 성능 이득을 얻을 수 있다^[1]. OFDMA시스템의 RRA에 관련된 대부분의 선행연구들은 각 부채널 (subchannel)들을 가장 채널상태가 좋은 사용자들에게 할당함으로써 시스템 용량을 최대화하는 것에 중점을 두고 이루어졌었다. 그중에서도 사용자간 공정성 (fairness)을 효율적으로 해결해주는 비례 공정 (proportional fair, PF) 기반의 스케줄링 기법^[2~3]이 가장 많이 연구되고 있고, 비트 오류율 (bit error rate; BER)^[4]이나 최소 전송률^[5]과 같은 추가적인 QoS을 고

* 학생회원, ** 평생회원, 연세대학교 전기전자공학부 (Dept. of Electrical and Electronic Engin., Yonsei University)

※ 이 논문은 한국과학재단이 주관하는 국가지정연구실사업(NRL:ROA-2007-000-20043-0)의 지원을 받아 연구되었음.

접수일자: 2011년1월7일, 수정완료일: 2011년4월14일

려하는 PF 스케줄링 알고리즘들도 제안되고 있다.

최근에는 지연 QoS (delay QoS)를 고려하는 PF 알고리즘들에 연구도 많이 진행되고 있다. 그중에서도 대기 큐길이를 사용자 선택의 기준값(criterion)에 반영하는 QLB (queue length based) 알고리즘들^[6]이 지연 QoS에 대해 비교적 좋은 성능을 보여주지만, 각 사용자의 서비스 처리율에 대한 통계를 알 수가 없기 때문에 시스템 성능 분석이 매우 어렵다는 문제가 있다. 또한, 사용자 다중화가 지연 QoS에 대해 중요한 요소임에도 불구하고 대부분의 연구들이 사용자 다중화 (user multiplexing) 문제보다는 사용자 선택 (user selection) 문제에 초점을 맞추고 있다.

최근 논문^[7]에서 OFDMA시스템에서 PF 스케줄링의 지연 QoS 성능에 대해 사용자 다중화 관점에서 수학적 분석모델을 제시하고, 주파수 다이버시티와 시간축 다중화가 각 사용자 용량과 지연 QoS 간의 trade-off관계에 미치는 영향을 분석하였다. 하지만, 이 논문에서는 지연 QoS가 전체 시스템의 주파수 효율(spectral efficiency)에 미치는 영향과 주어진 지연 QoS 조건을 만족하면서 최대 용량을 갖는 최적의 다중화도 (degree of multiplexing)에 대한 분석이 제대로 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 OFDMA 시스템에서 2차원 사용자 다중화가 지연 QoS 및 시스템의 주파수 효율에 미치는 영향과 최적의 다중화도를 분석한다. 높은 SNR 영역에서는 주파수 효율이 높아지기 때문에, 주파수 효율을 통해 전송 효율성을 파악하고자 한다면 높은 SNR영역에서의 분석이 더욱 의미를 갖는다^[8]. 따라서, 본 논문에서는 높은 SNR 영역에서 시스템의 주파수 효율에 영향을 주는 요소들 간의 상호관계를 분석하고, 이를 바탕으로 시간축 다중화도에 따른 주파수 효율의 변화를 분석하여 높은 SNR 영역에서의 효율적인 다중화 기법에 대한 방향을 제시한다.

II. 분석 도구 및 시스템 모델

1. 유효 용량 (Effective Capacity)

본 논문에서는 지연 QoS과 시스템 용량과의 관계를 분석하기 위해 사용하는 분석도구로서 통계적 QoS의 개념을 적용한 유효용량 (effective capacity)^[9]를 사용한다. 유효용량은 유선망에서 QoS분석에 폭넓게 사용하고 있는 유효대역폭 (effective bandwidth)^[10]을 무선

환경에 적용하기 위한 듀얼 개념이다. 예를 들어, 사용자의 소스 데이터 전송률이 λ 이고 데이터가 유효하기 위한 최대 지연시간이 D_{max} 로 주어졌을 때, 지연초과 확률에 대해 $\Pr\{D > D_{max}\} \leq \epsilon$ 와 같은 요구사항이 있다고 가정하자. 이 경우 통계적 지연 QoS는 $(\lambda, D_{max}, \epsilon)$ 로 정의되고, 지연초과 확률은 Chernoff bound와 Little의 법칙을 이용하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\Pr\{D > D_{max}\} \approx e^{-\theta \lambda D_{max}} \leq \epsilon \quad (1)$$

위 관계식을 통해서 통계적 지연 QoS $(\lambda, D_{max}, \epsilon)$ 에 대한 QoS 지수 (QoS exponent)는 $\theta = -\log \epsilon / \lambda D_{max}$ 로 정의될 수 있으며, 이때의 유효용량은 아래와 같이 정의 된다.

$$C_E(\theta) = -\frac{1}{\theta} \log(E\{e^{-\theta R[n]}\}) \quad (2)$$

결론적으로, 유효용량은 QoS지수 θ 에 의해 명시된 지연 QoS 요구사항을 만족하는 최대 전송 용량으로 정의된다. 여기서, θ 가 클수록 요구되는 지연 제약 (delay constraint)이 엄격해지고, 작을수록 지연 제약이 느슨해짐을 나타낸다.

2. 시스템 모델

그림 1은 N 개의 부채널(subchannel)를 갖고 각 프레임이 2차원으로 사용자 다중화된 OFDMA 시스템을 보여준다. 각 사용자에 대해 부채널들은 서로 독립이고 동일한 분포를 따르는 (identically and independently distributed; i.i.d.) 레일레이(Rayleigh) 블록 페이딩을 가정한다. 따라서, 부채널 수 N 은 무선채널의 주파수 다

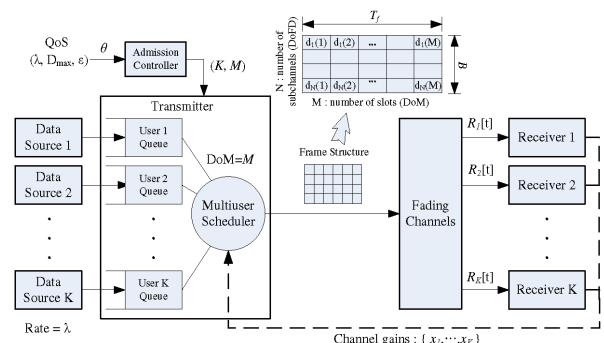


그림 1. OFDMA 시스템 모델

Fig. 1. OFDMA system models.

이버시티 정도(degree of frequency diversity; DoFD)를 나타낸다. 전체 사용자수는 K 로, 시스템 대역폭은 B 로, 부채널의 대역폭은 $B_c = B/N$ 로 표현한다. 또한, 프레임 구간은 T_f 로 표현하며, 각 프레임의 부채널들은 동일 크기의 M 개의 슬롯으로 분할되고 각 슬롯은 한 명의 사용자에게 할당된다고 가정한다. 이때, 한 부채널에 다중화되는 사용자수 M 을 시스템의 다중화도(degree of multiplexing; DoM)로 정의한다. 각 프레임마다 부채널 n 에서 사용자 k 가 슬롯을 할당받는 여부를 $s_{n,k}$ 으로 표현할 때 (즉, 슬롯을 할당받으면 $s_{n,k} = 1$, 아니면 $s_{n,k} = 0$), 각 프레임에서 사용자의 데이터 전송량은 아래와 같이 정의된다.

$$R_k = \frac{BT_f}{MN} \sum_{n=1}^N s_{n,k} \log_2(1 + \rho_{n,k} x_{n,k}) \quad (3)$$

이때, $\beta = BT_f \log_2 e$ 이고 $\rho_{n,k}$ 는 사용자 k 의 부채널 n 의 평균 수신 SNR이고, $x_{n,k}$ 는 순시적 소규모 (small-scale) 페이딩을 반영한 NSNR (normalized SNR)을 나타낸다. 슬롯할당은 NSNR이 높은 순서대로 사용자에게 할당한다. 이런 NSNR에 기반한 자원할당은 사용자들 간의 비례 공정성 (proportional fairness)를 보장한다^[11]. NSNR $x_{n,k}$ 는 i.i.d. 레일레이 블록 페이딩을 가정하였고, 기지국은 모든 사용자의 채널 정보를 완벽하게 알고 있다고 가정하였다.

III. OFDMA 시스템에서 2-D 사용자 다중화 기법의 성능 분석

1. 2-D 사용자 다중화가 지연 QoS에 미치는 영향
 높은 SNR 영역에서의 다중화도(DoM)의 영향을 분석하기 전에 2-D 사용자 다중화가 지연 QoS에 미치는 영향에 대한 분석부터 먼저 살펴보도록 하겠다. 우선, 우선, i.i.d. 블록 페이딩을 가정하였기 때문에, (1)과 (3)을 이용하여 다중화도가 M 인 경우의 사용자별 유효용량을 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} C_E^{M,N}(\theta, \rho_k) &= -\frac{1}{\theta T_f} \log \left(E_{s_{n,k}, x_{n,k}} \left\{ e^{-s_{n,k} \frac{\theta \beta}{MN} \sum_{n=1}^N \log(1 + \rho_k x_{n,k})} \right\} \right) \\ &= -\frac{N}{\theta T_f} \log \left(E_{s_{n,k}, x_{n,k}} \left\{ (1 + \rho_k x_{n,k})^{-s_{n,k} \frac{\theta \beta}{MN}} \right\} \right) \end{aligned}$$

$$= -\frac{N}{\theta T_f} \log \left(\frac{1}{K} \sum_{m=1}^M \phi_m(\rho_k) + 1 - \frac{M}{K} \right) \quad (4)$$

이때, $\beta = BT_f \log_2 e$ 이고, $\phi_m(\rho_k)$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\phi_m(\rho_k) = E_{x_{d(m)}} \left\{ (1 + \rho_k x_{d(m)})^{-\frac{\theta \beta}{MN}} \right\} \quad (5)$$

이때, $d(m)$ 는 $\{x_k\}_{k=1}^K$ 중에서 m 번째 큰 값을 갖는 사용자 인덱스를 나타내는 함수이다 (즉, $x_{d(1)} \geq x_{d(2)} \geq \dots \geq x_{d(K)}$).

$\{x_k\}_{k=1}^K$ 가 평균 1을 갖는 i.i.d. 지수 확률 변수들이므로, K 가 충분히 큰 경우에 대표본 근사화 (large sample approximation)^[12]를 통해 $x_{d(m)}$ 은 아래와 같이 근사화된다^[13].

$$\lim_{K \rightarrow \infty} x_{d(\lceil \alpha K \rceil)} \approx -\log \alpha \quad \text{for } \frac{1}{K} \leq \alpha \leq 1 \quad (6)$$

최종적으로 (5)와 (6)를 (4)에 적용하면 유효용량 $C_E^{M,N}(\theta, \rho_k)$ 에 대한 점근분석(asymptotical analysis) 결과를 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} C_E^{M,N}(\theta, \rho_k) &\approx -\frac{N}{\theta T_f} \log \left[\underbrace{\frac{1}{K} \sum_{m=1}^M \left(1 - \rho_k \log \frac{m}{K} \right)^{-\frac{\theta \beta}{MN}}}_{\text{affects MU diversity gain}} + \underbrace{1 - \frac{M}{K}}_{\text{non-service prob}} \right] \quad (7) \end{aligned}$$

(7)의 대괄호에서 첫 번째 항은 다중사용자 다이버시티 이득에 영향을 주고, 두 번째 항은 각 프레임에서 서비스를 못 받을(즉, 슬롯을 할당받지 못하는) 확률을 나타내는데 이는 지연 QoS에 영향을 준다. 이 두 항 모두는 다중화도(DoM) M 에 영향을 받는다. 예를 들어, M 이 작아지면, 서비스 확률은 낮아지는 반면 다중사용자 다이버시티 이득이 증가한다. 따라서, 더 높은 유효 용량을 얻을 수 있지만 낮은 지연 QoS만을 보장한다. 반대로 M 이 커지면, 높은 지연 QoS를 보장하지만 유효 용량이 상대적으로 낮아진다. 결론적으로 다중화도 M 은 지연 QoS과 유효용량 사이의 trade-off에 있어서 중요한 파라미터가 됨을 알 수 있다.

주파수 다이버시티의 유효용량에 대한 영향을 살펴보면, 아래의 명제로 정리된다.

명제 1. 본 논문의 시스템 모델을 가정할 때, 유효용량은 아래의 관계가 유지된다.

$$C_E^{M,N}(\theta, \rho_k) = C_E^{M,1}(\theta/N, \rho_k) \quad (8)$$

또한, 지연 QoS 제약이 매우 느슨해지면($\theta \rightarrow 0$), 주파수 다이버시티는 유효용량 $C_E^{M,N}(\theta, \rho_k)$ 에 영향을 주지 않는다.

증명: 우선 관계식 (8)은 (7)로부터 쉽게 얻어진다.

$\lim_{\theta \rightarrow 0} C_E^{M,N}(\theta, \rho_k)$ 에 L'Hospital의 정리를 적용하면 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\lim_{\theta \rightarrow 0} C_E^{M,N}(\theta, \rho_k) \approx \frac{\beta}{MT_f} \sum_{m=1}^M \log(1 - \rho_k \log(m/K)) \quad (9)$$

위 결과식은 N 을 포함하고 있지 않다. 따라서, $\lim_{\theta \rightarrow 0} C_E^{M,N}(\theta, \rho_k)$ 는 DoFD N 에 영향을 받지 않는다. ■

위 명제로부터 주파수 다이버시티는 지연 QoS를 개선시킬 수 있지만 Shannon 용량($\theta \rightarrow 0$)에는 별 이득이 없다는 사실을 알 수 있다. 이것은 Shannon 용량을 증가시켜주는 다중사용자 다이버시티와는 다른 점이다.

2. 높은 SNR 영역에서 최적의 다중화도 분석

이번 장에서는 높은 SNR 영역에서 시스템의 주파수 효율을 최대화하는 최적의 다중화도를 분석한다. 우선, 사용자별 유효용량을 모두 합한 시스템의 전체 대역폭 효율을 정의하면 다음과 같다.

$$S_E(\text{SNR}) = \frac{K}{B} \times C_E^M(\theta, \text{SNR}) \quad (\text{bps/Hz}) \quad (10)$$

명제 2. 본 논문에서 가정한 사용자 다중화 기법을 사용할 경우, 높은 SNR에서 최적의 다중화도를 다음과 같이 정의할 때,

$$M^* = \operatorname{argmax}_{1 \leq M \leq K} \left\{ \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} S_E(\text{SNR}) \right\} \quad (11)$$

최적의 다중화도 M^* 은 지연 QoS 제약에 상관없이 K 가 된다.

증명: (4)를 (10)에 적용하면 높은 SNR영역에서의 주파수 효율은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} S_E(\text{SNR}) &= -\frac{K}{\theta B_c T_f} \log \left(\frac{1}{K} \sum_{m=1}^M \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \phi_m(\text{SNR}) + 1 - \frac{M}{K} \right) \\ &= -\frac{K}{\theta B_c T_f} \log(1 - M/K) \end{aligned} \quad (12)$$

(12)는 M 에 대해 단조 증가하므로, 높은 SNR에서 주파수 효율을 최대화하는 M 은 K 가 된다. ■

위의 명제 1은 높은 SNR에서는 다중사용자 다이버시티 이득보다는 서비스 기회를 보장하는 것이 더 많은 성능 이득을 얻을 수 있음을 의미한다. 결론적으로, 높은 SNR에서는 프레임에 사용자를 최대로 다중화하는 것이 가장 주파수 효율이 좋은 전송방식이 된다는 것을 알 수 있다.

이제, 높은 SNR에서 지연 QoS가 시스템의 주파수 효율 (spectral efficiency)에 미치는 영향을 살펴보도록 하자. 높은 SNR영역에서 주파수 효율에 대한 선형근사식은 아래와 같이 표현할 수 있다^[14].

$$S_E(\text{SNR}) \approx S_\infty \times (\log_2 \text{SNR} - L_\infty) \quad (12)$$

여기서, 기울기 S_∞ 와 파워 오프셋 L_∞ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} S_\infty &= \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \frac{S_E(\text{SNR})}{\log_2 \text{SNR}} \\ L_\infty &= \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \left(\log_2 \text{SNR} - \frac{S_E(\text{SNR})}{S_\infty} \right) \end{aligned}$$

이때, S_∞ 의 단위는 bps/Hz/(3dB)가 된다.

명제 3. 다중화도가 K 인 최대 사용자 다중화를 사용할 경우, 높은 SNR에서 S_∞ 와 L_∞ 는 아래와 같다.

$$\begin{cases} S_\infty = 1, L_\infty = \frac{1}{\theta} \log_2 \Gamma(1 - \theta) & \text{for } \theta < 1 \\ S_\infty = \frac{1}{\theta}, L_\infty = -\log_2(\theta - 1) & \text{for } \theta \geq 1 \end{cases}$$

이때, $\theta = \frac{\theta \beta_c}{K}$ 이고 $\beta_c = \beta/N = B_c T_f \log_2 e$ 이다.

증명: $M=K$ 인 경우 주파수 효율은 아래와 같이 정리된다.

$$S_E(\text{SNR}) = -\frac{\log_2 e}{\theta} \log \left(\int_0^\infty (1 + \text{SNR}x)^{-\theta} e^{-x} dx \right) \quad (13)$$

$$= -\frac{1}{\theta} \log_2 \left(\text{SNR}^{-\theta} \int_0^{\infty} \left(\frac{1}{\text{SNR}} + x \right)^{-\theta} e^{-x} dx \right)$$

우선, $a < 1$ 일 때 $0 < \int_0^{\infty} x^{-a} e^{-x} dx < \infty$ 를 만족한다. 따라서, $\theta < 1$ 인 경우에는, 높은 SNR에서의 선형 근사화를 아래와 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} S_E(\text{SNR}) &= \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} -\frac{1}{\theta} \log_2(\text{SNR}^{-\theta}) - \frac{1}{\theta} \log_2 \left(\int_0^{\infty} x^{-\theta} e^{-x} dx \right) \\ &= \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \log_2(\text{SNR}) - \underbrace{\frac{1}{\theta} \log_2(\Gamma(1-\theta))}_{L_{\infty}} \end{aligned}$$

위 결과식에서 $\theta < 1$ 일 때 $L_{\infty} = \frac{1}{\theta} \log_2(\Gamma(1-\theta))$ 이고 $S_{\infty} = 1$ 임을 알 수 있다. 여기서 $\Gamma(z)$ 는 감마함수이다. 이제, $\theta \geq 1$ 인 경우 살펴보자. 우선 (13)에서 적분은 아래와 같이 유도된다.

$$\int_0^{\infty} (1 + \text{SNR} \cdot x)^{-\theta} e^{-x} dx = \text{SNR}^{-1} e^{\frac{1}{\text{SNR}}} E_{\theta} \left(\frac{1}{\text{SNR}} \right)$$

이때, $E_n(z)$ 은 n 차 지수적분 함수이고 $\int_1^{\infty} e^{-zt} t^{-n} dt$ 로 정의된다. 여기서 $\lim_{z \rightarrow \infty} e^{-1/z} = 1$ 이고, $n > 1$ 일 때

$\lim_{z \rightarrow 0} E_n(z) = \lim_{z \rightarrow 0} \frac{\Gamma(1-n, z)}{z^{1-n}} = \frac{1}{n-1}$ 이 된다. 이 결과들을 이용하여 아래와 같은 선형근사화를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} S_E(\text{SNR}) &= \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} -\frac{1}{\theta} \log_2 \left(\text{SNR}^{-1} e^{\frac{1}{\text{SNR}}} E_{\theta} \left(\frac{1}{\text{SNR}} \right) \right) \\ &= \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} -\frac{1}{\theta} \left(\log_2(\text{SNR}) - \log_2 \left(\frac{1}{\theta-1} \right) \right) \end{aligned}$$

위 결과식에서 $\theta \geq 1$ 일 때 $L_{\infty} = -\log_2(\theta-1)$ 이고 $S_{\infty} = 1/\theta$ 임을 알 수 있다. ■

위의 결과에서 보듯이, $\theta < 1$ 일 때 S_{∞} 는 지연 QoS 제약에 영향을 받지 않고 Shannon 용량의 기울기와 같은 1이 됨을 확인할 수 있다. 반면에, $\theta \geq 1$ 일 때는 $S_{\infty} = 1/\theta < 1$ 이 되고, θ 가 증가할수록 기울기 S_{∞} 가

낮아진다. 즉, 지연 QoS 제약이 엄격해질수록, QoS제약에 영향을 받게 되어 주파수효율이 낮아지게 된다.

IV. 모의실험 환경 및 수치결과

본 모의 실험에서는 사용자 다중화가 지연 QoS와 시스템 용량에 미치는 영향을 살펴본다. 실험환경은 그림 1의 이산 시간 시스템을 가정하였다. 데이터 소스는 고정 전송률 λ 로 패킷을 생성하고 생성된 패킷은 각 사용자의 서비스 큐에 도착한다. 다양한 λ 와 D_{\max} 에 대해 Monte-Carlo 실험을 수행하여 지연초과 확률 ϵ 을 측정하였다. 이렇게 실험을 통해 구해진 $(\lambda, D_{\max}, \epsilon)$ 의 결과들을 갖고, $\theta = -\log \epsilon / \lambda D_{\max}$ 의 관계식을 이용하여 QoS 지수(QoS exponent) θ 과 유효용량(effective capacity)을 추출하였다. 시스템 매개변수들은 $B=1$ MHz, $T_f = 5$ ms, 그리고 $K=20$ 이 사용되었다.

그림 2는 SNR을 10 dB로 가정하였을 경우, 다양한 다중화도와 주파수 다이버시티에 따른 QoS 지수 θ 와 주파수 효율 간의 trade-off 관계를 보여주고 있다. θ 가 증가할수록, 주파수 효율을 최대화하는 최적의 다중화도(DoM)도 1에서 K 로 증가함을 확인할 수 있다. 이는 θ 가 0에 가까워질수록 지연 품질에 대한 제약이 느슨해지므로, 다중화도를 낮춤으로서 다중사용자 다이버시티

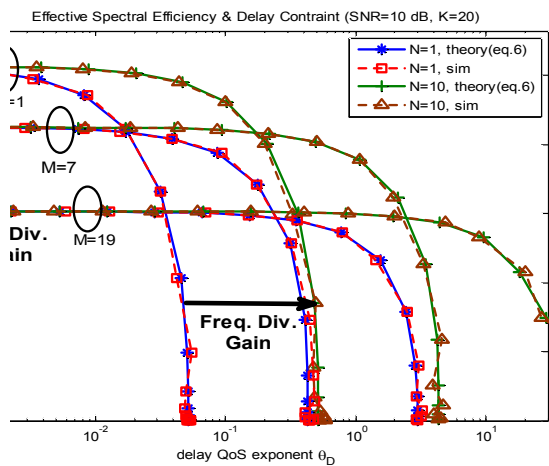


그림 2. 사용자 다중화도에 따른 QoS 지수와 유효용량 간의 trade-off 관계 비교 ($\beta = 5 \times 10^3 \log_2 e$, $K=20$, $\text{SNR}=10$ dB)

Fig. 2. Comparison of tradeoff between QoS component and effective capacity according to user-multiplexing ($\beta = 5 \times 10^3 \log_2 e$, $K=20$, $\text{SNR}=10$ dB).

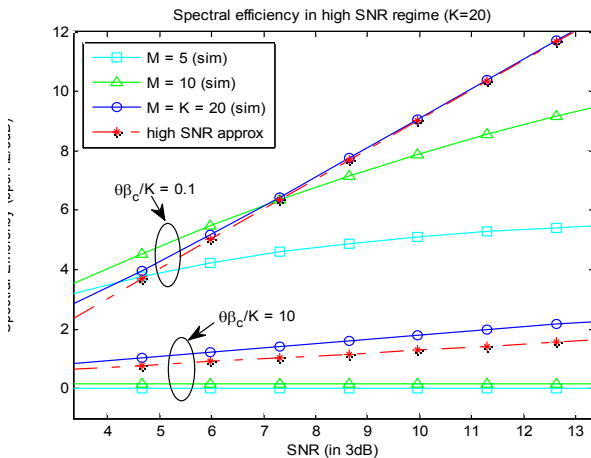


그림 3. 높은 SNR 에서 다중화에 따른 주파수 효율의 비교 ($K=20$, $\beta=5 \times 10^3 \log_2 e$)

Fig. 3. Spectral efficiency ratio versus user-multiplexing in the high SNR regime ($K=20$, $\beta=5 \times 10^3 \log_2 e$).

티 이득을 최대화하는 것이 시스템 용량에 이득이 되기 때문이다. 반면에 θ 가 커질수록 지연 품질에 대한 제약이 엄격해지기 때문에, 다중화도를 높여 각 사용자에게 서비스 기회를 높이는 것이 유효용량에 이득이 된다.

또한, 주파수 다이버시티 정도(DoFD) N 이 커질수록 trade-off 곡선이 θ 축을 따라 오른쪽으로 $10 \log_{10} N$ dB 만큼 이동한다. 위 그림을 통해, 주파수 다이버시티 이득은 지연 QoS를 개선시키는 효과가 있고, 다중사용자 다이버시티 이득은 Shannon 용량을 증가하는 효과가 있다는 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 높은 SNR 영역에서 다중화도(DoM)에 따른 주파수 효율에 대한 실험결과와 3장의 근사 분석결과를 비교하였다. 그림에서 보듯이 높은 SNR에서는 주파수 효율을 최대화하는 최적의 다중화도는 K 가 되고, $M=K$ 일 때의 선형 근사 분석이 실험결과와 상당히 근접함을 알 수 있다. 특히, $\theta=0.1 < 1$ 의 경우 주파수 효율의 기울기는 1이 되는 반면, $\theta=10 > 1$ 인 경우에는 기울기가 $1/\theta (=0.1)$ 에 가까워지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 높은 SNR영역에서 $\theta < 1$ 일 때는 지연 QoS 제약이 시스템 용량에 미치는 영향이 줄어들어 Shannon 용량을 얻을 수 있는 반면에, $\theta \geq 1$ 일 때는 지연 QoS 제약이 SNR의 증가와 상관없이 시스템의 성능을 제한한다. 또한, 높은 SNR에서는 다중사용자 다이버시티 이득보다는 서비스 기회를 보장하는 것이 더 많은 성능 이득을 얻을 수 있고, 따라서 사용자를 최대한

다중화하는 것이 주파수 효율에 좋은 전송방식이 된다는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문은 OFDMA 시스템에서 주파수 다이버시티와 사용자 다중화가 지연 QoS와 시스템 용량에 미치는 영향을 분석했는데 의의가 있다. 또한, 주어진 지연 QoS와 주파수 다이버시티 정도(DoFD)에 대해 최적의 다중화도(DoM)를 선택함으로써 시스템의 유효용량을 크게 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

특히, 높은 SNR영역에서의 분석을 통해 주파수 효율이 좋은 다중화 기법에 대한 방향을 제시하였다. SNR이 높아질수록 다중사용자 다이버시티에 의한 이득이 상대적으로 줄어들면서 프레임에 사용자를 최대로 다중화하는 것이 더욱 효율적인 전송방식이 될 수 있다.

이러한 결론들은 지연 QoS를 보장하는 OFDMA 통신시스템을 설계할 때 사용자 다중화가 시스템 성능에 미치는 영향에 대한 시각을 가질 수 있도록 도와 줄 것이다.

참고 문헌

- [1] M.Ergen, S.Coleri and P.Varaiya, "QoS Aware Adaptive Resource Allocation Techniques for Fair Scheduling in OFDMA Based Broadband Wireless Access Systems," IEEE Trans. Broadcast., vol. 49, pp. 362 - 370, Dec 2003.
- [2] P.Bender, P.Black, M.Grob, et al., "CDMA/HDR: A Bandwidth Efficient High Speed Data Service for Nomadic Users," IEEE Commun. Mag., vol. 38, pp. 70 - 77, July 2000.
- [3] 김영주, 송형준, 권동영, 홍대식, "OFDMA 시스템에서 전송률 향상을 위한 충돌 회피 스케줄링" 대한전자공학회, 전자공학회논문지, 제45권 TC편, 제11호, (통권 제377호) 9~14쪽, 2008년 11월.
- [4] J. Jang and K.B. Lee, "Transmit Power Adaptation for Multiuser OFDM Systems," IEEE J. Select. Areas Commun., vol. 21, p. 171.178, Feb 2003.
- [5] T.D. Nguyen and Y. Han, "A Proportional Fairness Algorithm with QoS Provision in Downlink OFDMA Systems," IEEE Commun. Letters, vol. 10, pp. 210 - 212, Nov 2006.
- [6] R. S. A. Eryilmaz and J. Perkins, "Stable scheduling policies for fading wireless channels,"

- In Proceedings of ISIT, 2003.
- [7] S. Ahn, S. Lee, K. Kim and D. Hong, "Analysis of Proportional Fair Scheduling in OFDMA Systems with Delay QoS Constraints," APCC 2010.
- [8] S. Verdu, "Spectral efficiency in the wideband regime," IEEE Trans. Information Theory., vol. 48, no. 6, pp. 1319 - 1343, Jun. 2002.
- [9] D. Wu and R. Negi, "Effective capacity: a wireless link model for support of quality of service," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 2, no. 4, pp. 630 - 643, July 2003.
- [10] C.-S. Chang, "Stability, Queue Length, and Delay of Deterministic and Stochastic Queueing Networks," IEEE Trans. Autom. Control, vol. 39, no. 5, pp. 913 - 931, May 1994.
- [11] L. Yang and M.-S. Alouini, "Performance Analysis of Multiuser Selection Diversity," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 55, pp. 1003 - 1018, May 2006.
- [12] David, H. A., Nagaraja, H. N, Order Statistics (3rd Edition). Wiley, New Jersey pp 458, 2003.
- [13] S. W. Ahn, H. Wang, S. Han, and D. Hong, "The Effect of Multiplexing Users in QoS Provisioning Scheduling," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 59, no. 5, pp. 2575 - 2581, Jun 2010.
- [14] S. S. (Shitz) and S. Verd, "The impact of frequency-flat fading on the spectral efficiency of CDMA," IEEE Trans. Information Theory., vol. 47, no. 4, pp. 1302 - 1327, May 2001.

 저 자 소 개



안 성 우(학생회원)
 1999년 서강대학교 컴퓨터학과
 석사 졸업.
 1999년~현재 삼성전자
 통신연구소 재직.
 2007년 3월~현재 연세대학교 전
 기전자공학과 박사 과정.

<주관심분야 : 이동통신시스템, OFDM, MIMO,
 멀티홉 시스템>



홍 대 식(평생회원)
 1990년 Purdue University
 Electrical Engineering
 박사 졸업.
 1991년~현재 연세대학교 전기
 전자공학과 교수.

<주관심분야 : 디지털통신, 통신신호처리, 4G시스
 템, OFDM, 멀티홉 시스템, CR, M2M>