

논문 2011-48TC-4-9

# 저전력 무선통신 시스템에서 사용자 다중화가 지연 QoS 성능에 미치는 영향 분석

(Effect Analysis of User-Multiplexing on Delay QoS Performance in Low-Power Wireless Communication Systems)

안 성 우\*, 홍 대 식\*\*

(Seongwoo Ahn and Daesik Hong)

## 요 약

본 논문은 지연 QoS (delay Quality of Service)에 대한 제약이 주어졌을 때의 시스템 용량을 정량화 할 수 있는 분석모델을 제시하고, 이를 바탕으로 다중사용자 저전력 무선통신 시스템에서 사용자 다중화가 지연 QoS에 미치는 영향을 분석하였다. 이를 위해, 한 프레임에서 스케줄 되는 사용자 수를 다중화도 (degree of multiplexing)이라 정의하고, 다중화도가 지연 서비스 품질과 시스템 용량 간의 관계에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 저전력 통신환경에서 에너지 효율성을 고려할 때 최적의 다중화도가 어떻게 변화하는지를 확인하였다. 마지막으로 모의실험을 통하여, 최적의 다중화도를 이용할 때 상당한 성능이득을 얻을 수 있음을 확인하였다.

## Abstract

In this paper, we present the analytic model to quantify the system capacity with delay Quality of Service (QoS) constraints, and analyze the effect of user-multiplexing on the delay QoS performance in multiuser low-power wireless communication systems. For this purpose, we define the degree of multiplexing as the number of scheduled users to be served in a frame, and investigate the effect of degree of multiplexing (DoM) on the trade-off of throughput and delay QoS constraints. Through this analysis, we characterize the optimal DoM maximizing the energy efficiency in low-power communication environments. Finally, through the simulation results, we verify that our approach with its optimal DoM yields substantial capacity gain.

**Keywords :** low-power communication, user-multiplexing, QoS, effective capacity

## I. 서 론

최근 친환경적인 통신환경에 대한 관심이 높아지면서 저전력 통신 시스템에 대한 다양한 연구가 진행되고

있다<sup>[1]</sup>. 특히, 효과적인 저전력 통신 시스템의 개발이 이루어지기 위해서는, 비디오, 게임, VoIP (Voice over IP)와 같은 실시간 멀티미디어 서비스를 저전력 다중사용자 통신환경에서 효율적으로 지원하기 위한 연구도 병행될 필요가 있다.

기본적으로 무선 다중사용자 통신환경에서는 한정된 자원을 여러 사용자가 공유해야 하고, 페이딩에 의한 무선 채널 이득의 변화 때문에 다중사용자 무선 환경에서 이런 지연 QoS (delay Quality of Service)을 보장하기 위해선 효율적인 자원관리가 필수적이다.

\* 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: 2011년1월6일, 수정완료일: 2011년4월14일

무선 환경에서의 지연 QoS를 지원하기 위해 유선망에서 연구되었던 EDF (early deadline first) 기반의 알고리즘들<sup>[2]</sup>과 GPS (generalized processor sharing) 기반의 WFQ (weighted fair queueing)<sup>[3]</sup>, WF<sup>2</sup>Q (worst-case fair weighted fair queueing)<sup>[4]</sup>, IWFQ (idealized wireless fair queueing)<sup>[5]</sup> 등과 같은 알고리즘들이 무선 환경에서 새롭게 연구되었다. 하지만, 이런 대부분의 알고리즘들은 다중사용자 다이버시티 이득을 제대로 활용하지 못해 전체적으로 시스템용량을 떨어뜨리는 문제가 있다.

다중사용자 무선 환경에서 시스템 용량을 증가시키는 가장 효율적인 방법 중 하나는 다중사용자 다이버시티 이득 (multiuser diversity gain)을 이용하는 것이다. 즉, 선택적으로 가장 좋은 채널을 갖는 사용자에게 자원을 할당함으로써 시스템용량을 증가하는 방법이다. 많은 선행연구<sup>[6-7]</sup>에서 다중사용자 다이버시티 이득을 활용하여 Shannon 용량이 크게 증가함을 보여주었다. 하지만, 이러한 기회적 스케줄링 (opportunistic scheduling) 방법은 공정성 (fairness)과 지연 QoS를 보장하지 못한다. 공정성에 대한 효율적인 해결 방법으로 PF (Proportional Fair) 기반의 스케줄링 기법이 가장 많이 사용되고 있지만, PF 기반의 스케줄링 기법만은 제한된 시간 내에 데이터를 전송할 기회를 보장할 수 없기 때문에 지연 QoS를 효율적으로 보장하지 못한다.

이렇듯 무선 환경에서는 다중사용자 다이버시티 이득에 의한 시스템 용량증가와 전송기회 보장에서 비롯된 지연 QoS 간의 trade-off 관계가 존재한다. 최근 논문<sup>[8]</sup>에서 이러한 용량과 지연 QoS 간의 trade-off 관계를 사용자 다중화 (user multiplexing) 관점에서 수학적 모델을 제시하고, 사용자 다중화도가 지연 QoS과 시스템 용량에 미치는 영향을 분석하였다. 하지만, 이 논문

에서는 주어진 지연 QoS 조건을 만족하면서 최대 용량을 갖는 최적의 다중화도에 대한 분석이 제대로 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 저전력 통신환경에서 사용자 다중화가 지연 QoS 및 시스템 성능에 미치는 영향과 최적의 다중화도 (degree of multiplexing)를 분석한다. 수신 SNR (signal-to-noise ratio)이 낮은 저전력 통신환경에서는 주파수 효율(spectral efficiency)이 떨어지기 때문에 단순히 용량 (capacity) 분석만으로는 전송 효율성을 파악하기 어렵다. 따라서, 에너지 효율성 관점에 대해 시스템의 전송 효율성을 분석하는 것이 적합하다.<sup>[9]</sup> 본 논문에서는 에너지 효율성 분석을 통해, 저전력 통신환경에서는 다중사용자 다이버시티 이득을 최대화하는 것이 효율적인 전송기법이란 것을 보일 것이다.

## II. 시스템 모델

그림 1은 다중 사용자가 스케줄링을 통해 무선 채널을 공유하고 각 프레임이 사용자 다중화된 무선 시스템을 보여준다. 전체 사용자수는  $K$ 로, 시스템 대역폭은  $B$ 로 프레임 구간은  $T_f$ 로 표현한다. 각 프레임은 동일 크기의  $M$ 개의 슬롯으로 분할되고 각 슬롯은 한 명의 사용자에게 할당된다고 가정한다. 이때, 한 프레임에 다중화되는 사용자수  $M$ 을 시스템의 다중화도(degree of multiplexing; DoM)로 정의한다. 프레임  $n$ 에서 사용자  $k$ 가 슬롯을 할당받는 여부를  $s_k[n]$ 으로 표현할 때 (즉, 슬롯을 할당받으면  $s_k[n] = 1$ , 아니면  $s_k[n] = 0$ ), 해당 프레임에서 사용자의 데이터 전송량은 아래와 같이 정의된다.

$$R_k[n] = s_k[n] \cdot \frac{BT_f}{M} \log_2(1 + \rho_k x_k[n]) \quad (1)$$

이때,  $\rho_k$ 는 사용자  $k$ 의 평균 수신 SNR이고,  $x_k[n]$ 는 순시적 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<sup>[10]</sup>. NSNR  $x_k[n]$ 는 서로 독립이고 동일한 분포를 따르는 (identically and independently distributed; i.i.d.) 레일레이(Rayleigh) 블록 페이딩을 가정하였고, 기지국은 모든 사용자의 채널 정보를 완벽하게 알고 있

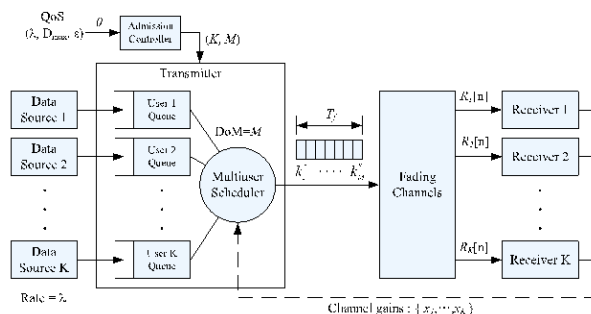


그림 1. 다중 사용자 무선 시스템의 모델

Fig. 1. Multiuser wireless communication system models.

다고 가정하였다.

본 논문에서는 지연 QoS와 시스템 용량과의 관계를 분석하기 위해 사용하는 분석도구로서 통계적 QoS의 개념을 적용한 유효용량 (effective capacity)<sup>[11]</sup>를 사용한다. 유효용량은 유선망에서 QoS분석에 폭넓게 사용하고 있는 유효대역폭 (effective bandwidth)<sup>[12]</sup>을 무선 환경에 적용하기 위한 듀얼 개념이다. 예를 들어, 사용자의 소스 데이터 전송률이  $\lambda$ 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 bound<sup>[13]</sup>와 Little의 법칙<sup>[14]</sup>을 이용하여 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\Pr\{D > D_{max}\} \approx e^{-\theta \lambda D_{max}} \leq \epsilon \quad (2)$$

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.

$$C_E(\theta) = -\frac{1}{\theta} \log(E\{e^{-\theta R[n]}\}) \quad (3)$$

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

### III. 저전력 통신환경에서 사용자 다중화 기법의 성능 분석

#### 1. 사용자 다중화가 지연 QoS에 미치는 영향

저전력 통신환경에서 다중화도의 영향을 분석하기 전에 사용자 다중화가 지연 QoS에 미치는 영향에 대한 분석부터 먼저 살펴보도록 하겠다. 우선, i.i.d. 블록 페이딩을 가정하였기 때문에, 수식전개의 간단함을 위해 프레임 인덱스  $n$ 을 생략하고 (1)과 (3)을 이용하여 다중화도가  $M$ 인 경우의 사용자별 유효용량을 정리하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} C_E^M(\theta, \rho_k) &= -\frac{1}{\theta T_f} \log\left(E_{s_k, x_k} \left\{ e^{-s_k \frac{\theta \beta}{M} \log(1 + \rho_k x_k)} \right\}\right) \\ &= -\frac{1}{\theta T_f} \log(\Pr\{s_k = 1\} \times \phi(\rho_k) + \Pr\{s_k = 0\}) \\ &= -\frac{1}{\theta T_f} \log\left(\frac{M}{K} \cdot \phi(\rho_k) + 1 - \frac{M}{K}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

이때,  $\beta = BT_f \log_2 e$ 로 정의하고,  $\phi(\rho_k)$ 는 아래와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \phi(\rho_k) &= E_{x_k} \left\{ e^{-\frac{\theta \beta}{M} \log(1 + \rho_k x_k)} \right\} \\ &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M E_{x_{d(m)}} \left\{ (1 + \rho_k x_{d(m)})^{-\frac{\theta \beta}{M}} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

이때,  $d(m)$ 는  $\{x_k\}_{k=1}^K$  중에서  $m$ 번째 큰 값을 갖는 사용자 인덱스를 나타내는 함수이다 (즉,  $x_{d(1)} \geq x_{d(2)} \geq \dots \geq x_{d(K)}$ ). 위 식을 순차 통계 (order statistics)<sup>[15]</sup>와 추가적인 수식정리를 통해 정리하면 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} C_E^M(\theta, \rho_k) &= -\frac{1}{\theta T_f} \log \left[ \sum_{m=1}^M \sum_{i=0}^{K-m} \frac{b_{m,i}}{\rho_k} e^{-\frac{m+i}{\rho_k}} E_{\theta \beta} \left( \frac{m+i}{\rho_k} \right) + 1 - \frac{M}{K} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

이때,  $b_{m,i} = \binom{K-1}{m-1} (-1)^i \binom{K-m}{i}$ 이고,  $E_n(a)$ 은  $n$ 차 지수적분 함수 (exponential integral function)이고  $\int_1^\infty e^{-at} t^{-n} dt$ 로 정의된다. (6)의 자세한 유도과정은 [8]에 나와 있다.

위 식에 대한 좀 더 직관적인 결과를 얻기 위해, 대표본 근사화 (large sample approximation)<sup>[15]</sup>를 통해 아래와 같은 부명제를 정의하도록 한다.

**부명제 1.**  $\{x_k\}_{k=1}^K$ 가 평균 1을 갖는 i.i.d. 지수 확률 변수들이고  $d(m)$ 이  $\{x_k\}_{k=1}^K$  중에서  $m$ 번째 큰 값을 갖는 사용자 인덱스를 나타내는 함수라 할 때, 충분히 큰  $K$ 에 대해  $x_{d(m)}$ 은 아래와 같이 근사화된다.

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

증명: 자세한 증명 과정은 [8]에 나와 있음. ■

(5)에 위의 부명제를 적용하면, (6)에 대한 점근분석 (asymptotical analysis) 결과를 아래와 같이 얻을 수

있다.

$$\widehat{C}_E^M(\theta, \rho_k) = -\frac{1}{\theta T_f} \log \left[ \underbrace{\frac{1}{K} \sum_{m=1}^M \left(1 - \rho_k \log \frac{m}{K}\right)^{-\frac{\theta\beta}{M}}}_{\text{affects MU diversity gain}} + \underbrace{1 - \frac{M}{K}}_{\text{non-service prob.}} \right] \quad (7)$$

(6)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.

(6)의 결과는 사용자 다중화를 통해 지연품질과 용량 사이의 trade-off 문제를 다중사용자 다이버시티 이득과 서비스 확률간의 trade-off 관점에서 다룰 수 있음을 의미한다. 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 유효용량이 상대적으로 낮아진다. 결론적으로 다중화도  $M$ 은 지연 QoS와 유효용량 사이의 trade-off에 있어서 중요한 파라미터가 됨을 알 수 있다.

## 2. 저전력 통신환경에서 최적의 다중화도 분석

수신 SNR이 낮은 저전력 통신환경에서는, 주파수 효율성이 떨어지기 때문에 단순히 용량 분석만으로는 전송 효율성을 파악하기 어렵다. 오히려, 비트에너지 (bit energy)와 같은 에너지 효율성 관점에 대해 시스템의 전송 효율성을 분석하는 것이 적합하다<sup>[9]</sup>. 우선, 사용자별 유효용량을 모두 합한 시스템의 전체 대역폭효율은  $S_E(\text{SNR}) = \frac{K}{B} \times C_E^M(\theta, \text{SNR})$ 이 되고, 이를 이용하면

전송 비트에너지는  $\frac{E_b}{N_0} = \frac{\text{SNR}}{S_E(\text{SNR})}$  로 정의된다.

**명제 1.** 본 논문에서 가정한 사용자 다중화 기법을 사용할 경우, 최소 비트에너지는  $\frac{E_b}{N_{0 \min}}$  는 아래와 같다.

$$\frac{E_b}{N_{0 \min}} = \lim_{\text{SNR} \rightarrow 0} \frac{E_b}{N_0} = \frac{M \log 2}{\sum_{m=1}^M \sum_{s=m}^K \frac{1}{s}} \quad (8)$$

만약 사용자수  $K$ 가 충분히 크다면, 위 식은 아래와 같

이 근사화된다.

$$\frac{E_b}{N_{0 \min}} \approx \frac{\log 2}{1 - \log \frac{M}{K}} \quad (9)$$

결론적으로, 비트에너지를 최소화하는 최적의 다중화도는 1이 되고, 그때의 최소 비트에너지는  $\frac{\log 2}{1 + \log K}$ 이 된다.

증명: 비트에너지의 정의를 적용하여 최소 비트에너지를 정의하면 아래와 같다.

$$\frac{E_b}{N_{0 \min}} = \lim_{\text{SNR} \rightarrow 0} \frac{\text{SNR}}{S_E(\text{SNR})} = \frac{1}{S'_E(0)}$$

(5)에서  $\phi(0) = 1$ 이고,  $\phi(\text{SNR})$ 에 대한 미분결과는 아래와 같이 주어진다.

$$\phi'(\text{SNR}) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M E \left\{ -\frac{\theta\beta}{M} x_{d(m)} (1 + \text{SNR} \cdot x_{d(m)})^{-\frac{\theta\beta}{M}-1} \right\} \quad (10)$$

그러므로,  $\phi'(0) = -\frac{\theta\beta}{M^2} \sum_{m=1}^M E\{x_{d(m)}\}$ 이 된다. 위 결과들을 이용하면, 아래와 같이  $S'_E(0)$ 가 유도된다.

$$\begin{aligned} S'_E(0) &= -\frac{K \log_2 e}{\theta\beta} \cdot \frac{\phi'(0)}{\phi(0) + (K/M - 1)} \\ &= \frac{\log_2 e}{M} \cdot \sum_{m=1}^M E\{x_{d(m)}\} \\ &= \frac{\log_2 e}{M} \cdot \sum_{m=1}^M (H_K - H_{m-1}) \\ &= \frac{\log_2 e}{M} \cdot \sum_{m=1}^M \sum_{s=m}^K \frac{1}{s} \end{aligned}$$

이때,  $H_n$ 는  $\sum_{s=1}^n \frac{1}{s}$ 로 정의되는 조화수 (harmonic number)를 나타낸다. 위 결과를 이용하여 최소 비트에너지에 대해 (8)과 같은 결과를 얻을 수 있다.

만약 사용자수  $K$ 가 충분히 크다면, 부명제 1의 결과로부터  $E\{x_{d(m)}\} \approx \log(K/m)$ 가 된다. 그러므로,  $S'_E(0)$ 는 아래와 같이 근사화된다.

$$\begin{aligned}
 S'_E(0) &\approx -\frac{K \log_2 e}{M} \cdot \frac{1}{K} \sum_{m=1}^M \log(m/K) \\
 &\approx -\frac{K \log_2 e}{M} \int_0^{M/K} \log \alpha \, d\alpha \\
 &= \frac{1 - \log(M/K)}{\log 2} \tag{11}
 \end{aligned}$$

(11)로부터  $S'_E(0)$ 이  $M$ 에 대한 단조증가 함수라는 것을 알 수 있다. 따라서,  $1/S'_E(0)$ 을 최소화하는  $M$ 은 1이 된다. ■

위의 명제 1의 (9)에서 QoS 지수  $\theta$ 가 생략되어 있다는 점으로부터, 낮은 SNR 영역에서는 에너지 효율이 지연 QoS의 제약 (delay QoS constraint)에 영향을 받지 않는다는 사실을 알 수 있다. 따라서, 저전력 통신 환경에서는 다중사용자 다이버시티 이득을 최대화하는 방식이 가장 에너지 효율이 좋은 전송방식이 될 수 있다.

추가적으로 저전력 통신 환경에서  $E_b/N_0$ 가 증가함에 따라 주파수 효율이 어떻게 변하는지를 살펴보도록 한다. 낮은 SNR영역에서  $E_b/N_0$  대비 주파수 효율에 대한 선형근사식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$S_E\left(\frac{E_b}{N_0}\right) \approx S_0 \times \left( \log_2 \frac{E_b}{N_0} - \log_2 \frac{E_b}{N_{0 \min}} \right) \tag{12}$$

여기서,  $\frac{E_b}{N_{0 \min}}$ 에서의  $E_b/N_0$ 에 대한 주파수 효율의 그래프에 대한 기울기  $S_0$ 는 광대역 기울기(wideband slope)라고 불리고 다음과 같이 정의된다<sup>[9]</sup>.

$$S_0 = \lim_{\substack{E_b \\ N_0 \downarrow N_{0 \min}}} \frac{S_E\left(\frac{E_b}{N_0}\right)}{10 \log_{10} \frac{E_b}{N_0} - 10 \log_{10} \frac{E_b}{N_{0 \min}}} \tag{13}$$

이때, (13)의 단위는 bps/Hz/(3dB)가 된다. 여기에  $E_b/N_0$ 의 정의와 L'Hospital의 정리를 적용하여  $S_0$ 를 SNR의 함수로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 S_0 &= \lim_{\text{SNR} \rightarrow 0} \frac{S_E(\text{SNR})}{\log \frac{\text{SNR}}{S_E(\text{SNR})} - \log \frac{1}{S'_E(0)}} \log 2 \\
 &= \frac{2(S'_E(0))^2}{-S''_E(0)} \log 2 \text{ (bps/Hz/3dB)} \tag{14}
 \end{aligned}$$

$S_0$ 를 유도하기 위해, 우선 (10)을 추가 미분하고 부명제 1을 적용하여  $\phi''(0)$ 의 근사식을 구하면 다음과 같다.

$$\phi''(0) \approx \frac{\theta \beta}{M^2} \left( \frac{\theta \beta}{M} + 1 \right) \sum_{m=1}^M \left( \log \frac{m}{K} \right)^2$$

위 식과  $\frac{1}{K} \sum_{m=1}^M g(m/K) \approx \int_0^{M/K} g(\alpha) \, d\alpha$ 의 근사화 방법을 이용하여, SNR=0에서의 주파수 효율의 2차 미분을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 S''_E(0) &= -\frac{K \log_2 e}{\theta \beta} \cdot \left[ \frac{M}{K} \phi''(0) - \left( \frac{M}{K} \phi'(0) \right)^2 \right] \\
 &= -\frac{1}{\log 2} \left[ (1 - \log p)^2 + 1 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\Theta}{p} ((1-p)(1 - \log p)^2 + 1) \right] \tag{15}
 \end{aligned}$$

이때,  $p = M/K$  이고,  $\Theta = \frac{\theta \beta}{K}$ 이다. 여기서, 서비스 확률인  $p$ 는 정규 다중화도 (normalized DoM)로도 정의할 수 있다.

(11)과 (15)의 결과를 (14)에 적용하면, 최종적으로 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 S_0 &= \frac{2}{f(p) + \Theta \times (f(p)/p - 1)} \\
 &< \frac{2}{\min_p f(p) + \Theta \times \min_p \{f(p)/p - 1\}} \tag{16} \\
 &= \frac{2}{1 + \Theta}
 \end{aligned}$$

여기서  $f(p) = 1 + 1/(1 - \log p)^2$ 이다.  $\Theta$ 는 주파수 효율에 영향을 주는 시스템 파라미터들( $B, T_f, K$ )과 QoS 지수  $\theta$ 로 구성되어 있다. (16)에서 보듯이  $S_0$ 는  $\theta$ 가 증가함에 따라 감소한다. 즉, 시스템 파라미터들이 고정되어 있다면, 지연 QoS에 대한 제약이 엄격해질수록  $E_b/N_0$ 의 증가에 따른 주파수 효율의 증가율이 낮아짐을 의미한다. 따라서, SNR이 증가할수록 시스템 유효용량은 지연품질 제약에 더 큰 영향을 받게 된다.

광대역 기울기  $S_0$ 를 최대화하는 최적의 정규 다중화도 (normalized DoM)는  $p^* = \arg \max_{1/K \leq p \leq 1} S_0$ 로 정의된다. (16)에서  $f(p)$ 는  $p$ 에 대해 단조 감소 함수이기 때문에,  $\Theta$ 가 작을수록  $p^*$ 는  $1/K$ 에 가까워진다.

다. 즉,  $\theta$ 가 작을수록 다중사용자 다이버시티 이득을 최대로 하는 전송방식이 효율적임을 의미한다. 반대로,  $\theta$ 가 커질수록  $p^*$ 는 1에 가까워지고, 사용자 다중화도를 높이는 전송방식이 효율적임을 나타낸다.

#### IV. 모의실험 환경 및 수치결과

본 모의 실험에서는 사용자 다중화가 지연 QoS과 시스템 용량에 미치는 영향을 살펴본다. 실험환경은 그림 1의 이산 시간 시스템을 가정하였다. 데이터 소스는 고정 전송률  $\lambda$ 로 패킷을 생성하고 생성된 패킷은 각 사용자의 서비스 큐에 도착한다. 다양한  $\lambda$ 와  $D_{max}$ 에 대해 Monte-Carlo 실험을 수행하여 지연초과 확률  $\epsilon$ 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)  $\theta$ 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 다중화도에 따른 QoS 지수 (QoS exponent)  $\theta$ 와 유효용량간의 trade-off 관계를 보여주고 있다. 그림 2에서 보듯이 사용자수  $K$ 가 그다지 크지 않은 20 정도에서도 (7)의 유효용량에 대한 점근분석 결과가 실험결과에 상

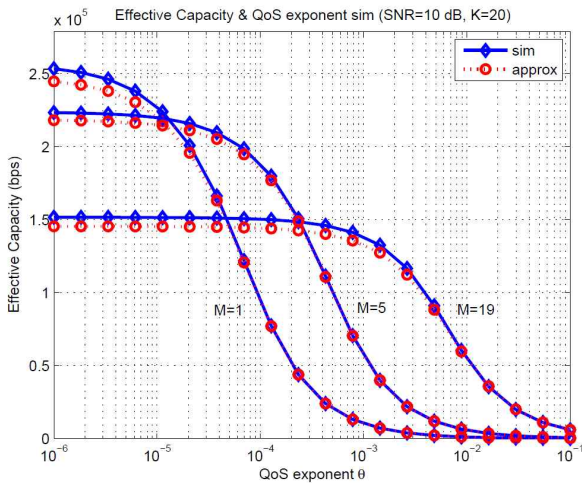


그림 2. 사용자 다중화도에 따른 QoS 지수와 유효용량 간의 trade-off 관계 비교 ( $\beta = 5 \times 10^3 \log_2 e$ ,  $K = 20$ , SNR = 10 dB)

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

당히 근접해 있음을 알 수 있다.

또한,  $\theta$ 가 증가할수록, 유효용량을 최대화하는 최적의 다중화도 (DoM)도 1에서  $K$ 로 증가함을 확인할 수 있다. 이는  $\theta$ 가 0에 가까워질수록 지연 QoS에 대한 제약이 느슨해지므로, 다중화도를 낮춤으로서 다중사용자 다이버시티 이득을 최대화하는 것이 시스템 용량에 이득이 되기 때문이다. 반면에  $\theta$ 가 커질수록 지연 QoS에 대한 제약이 엄격해지기 때문에, 다중화도를 높여 각 사용자에게 서비스 기회를 높이는 것이 유효용량에 이득이 된다.

그림 3은 저전력 통신환경에서  $E_b/N_0$ 에 따른 주파수 효율의 변화에 대한 실험결과와 3장의 근사 분석결과를 비교하였다. 그림에서 보듯이 (12)의 선형근사 분석이 실험결과와 상당히 근접함을 확인할 수 있다. 또한, 최소 비트에너지( $E_b/N_{0min}$ )는  $\Theta (= \theta \beta / K)$ 에 의해 영향을 받지 않음을 확인 할 수 있다. 따라서,  $E_b/N_{0min}$ 은 다중 사용자 다이버시티를 최대한 활용하는  $M = 1$ 일 때 가장 적은 값을 갖는다.

하지만,  $E_b/N_{0min}$ 와는 달리 주파수 효율의 기울기( $S_0$ )는  $\Theta$ 에 의해 영향을 받고 있다. 이는  $E_b/N_0$ 가 커질수록 주파수 효율이  $\Theta$ 의 영향을 받게 됨을 의미한다. 우선,  $\Theta$ 가 큰 경우( $\Theta = 1.1$ ),  $M = 10$ 일 때의 광대역 기울기  $S_0$ 가  $M = 1$ 일 때보다 더 큰 것을 확인할 수 있

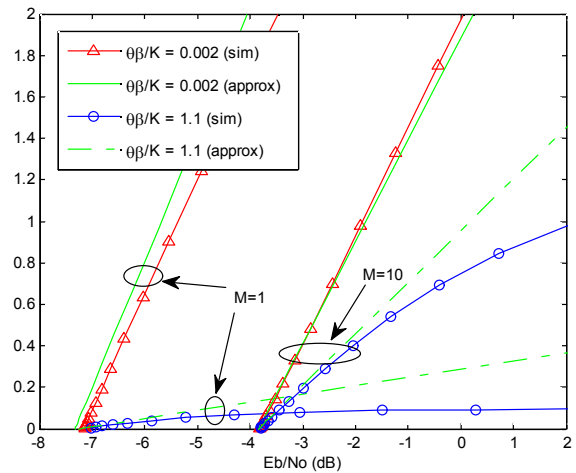


그림 3. 저전력 통신환경에서 비트에너지( $E_b/N_0$ )에 따른 주파수 효율(spectral efficiency)의 비교 ( $K = 20$ ,  $\beta = 5 \times 10^3 \log_2 e$ )

Fig. 3. Spectral efficiency versus bit energy in low-power wireless communication systems ( $K = 20$ ,  $\beta = 5 \times 10^3 \log_2 e$ ).

다. 하지만,  $\theta$ 가 작은 경우( $\theta = 0.002$ )에는 오히려  $M=1$ 일 때의 기울기가 더 높다. 이는  $\theta$ 가 높아질수록 지연 QoS의 제약이 엄격해져서, 각 사용자의 서비스 기회를 보장함으로써 얻는 이득이 다중사용자 다이버시티 이득보다 더욱 중요해지기 때문이다.

## V. 결 론

본 논문은 다중사용자 무선시스템에서 사용자 다중화가 지연 QoS와 시스템 용량에 미치는 영향을 분석했는데 의의가 있다. 또한, 주어진 지연 QoS에 대해 최적의 다중화도(DoM)를 선택함으로써 시스템의 유효용량을 크게 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

특히, 저전력 통신환경에서의 분석을 통해 에너지 효율이 좋은 다중화 기법에 대한 방향을 제시하였다. SNR이 낮을수록 지연 QoS의 제약이 시스템 성능에 미치는 영향이 줄어들게 되고, 따라서 다중사용자 다이버시티 이득을 적극적으로 활용함으로써 더욱 효율적인 전송이 가능할 수 있다.

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

## 참 고 문 헌

- [1] 정성인, 이승민, 이효성, 이흥호, “무선전력통신 시스템의 저전력화를 위한 기술적 개선방안” 대한전자공학회, 전자공학회논문지, 제47권 TC편, 제1호, 53~57쪽, 2010년 1월.
- [2] V. Huang and W. Zhuang, “QoS-oriented packet scheduling for wireless multimedia CDMA communications,” *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 3, no. 1, pp. 73 - 85, Jan 2004.
- [3] A. K. Parekh and R. G. Gallager, “A generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks: The single-node case,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 1, no. 3, pp. 344 - 357, Jun 1993.
- [4] J. C. R. Bennett and H. Zhang, “WF2Q: Worst-case fair weighted fair queueing,” in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 120 - 128, 1996.
- [5] V. B. S. Lu and R. Srikant, “Fair scheduling in wireless packet networks,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 7, no. 4, pp. 473 - 489, Aug 1999.
- [6] R. Knopp and P. A. Humblet, “Information capacity and power control in single-cell multiuser communications,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC'95)*, Seattle, WA, Jun. 1995.
- [7] P. Viswanath, D. Tse and R. Laroia, “Opportunistic beamforming using dumb antennas,” *IEEE Trans. Information Theory.*, vol. 48, no. 6, pp. 1277 - 1294, Jun. 2002.
- [8] 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.
- [9] S. Verdu, “Spectral efficiency in the wideband regime,” *IEEE Trans. Information Theory.*, vol. 48, no. 6, pp. 1319 - 1343, Jun. 2002.
- [10] L. Yang and M.-S. Alouini, “Performance Analysis of Multiuser Selection Diversity,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 55, no. 3, pp. 1003 - 1018, May 2006.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] P. A. and P. S.U, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*. McGraw-Hill, 2002.
- [14] N. M. P. Peter G. Harrison, *Performance Modeling of Communication Networks and Computer Architectures*. Addison-Wesley, 1993.
- [15] David, H. A., Nagaraja, H. N, *Order Statistics (3rd Edition)*. Wiley, New Jersey pp 458, 2003.

---

 저 자 소 개
 

---



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

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



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

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