

# 협동 릴레이와 다중 사용자 다이버시티를 이용하는 무선 통신 네트워크의 용량 분석

준회원 정희진\*, 정회원 문철\*\*, 서정태\*\*\*, 유강희\*\*

## Capacity of Multiuser Diversity with Cooperative Relaying in Wireless Networks

Hee-Jin Joung\* Associate Member,  
Cheol Mun\*\*, Jeong-Tae Seo\*\*\*, Kang-Hee Yoo\*\* Regular Members

### 요약

본 논문은 다중 사용자 다이버시티를 운용하는 무선 네트워크에서 협동 다이버시티를 사용할 경우, 하향링크 채널에서 다중사용자 다이버시티와 협동 다이버시티 사이의 상호작용을 분석한다. 협동 다이버시티 링크의 수신 신호 대 잡음비 분포를 감마 분포로 근사한 후, 다수의 협동 다이버시티 링크들이 fair-access 스케줄링 되는 단일 셀에서의 평균 용량을 해석적으로 구한다. 제안하는 해석방법을 시뮬레이션 결과와 비교하여 검증하였으며, 각 링크에서 수신 신호 대 잡음비의 변동을 줄여주는 협동 다이버시티가 다수 링크들의 수신 신호 대 잡음비의 변동성을 이용하는 다중 사용자 다이버시티의 성능을 저하시킴을 용량 분석을 통하여 보여준다.

**Key Words** : Diversity methods, Cooperative diversity, Multiuser diversity, Scheduling, System capacity

### ABSTRACT

We consider the use of cooperative diversity in a multiuser wireless data network. This paper provides an analysis of the interaction between cooperative diversity and multiuser diversity on downlink channels. By using approximation of the signal-to-noise ratio (SNR) distribution of each cooperative diversity link by Gamma distribution, an analytic expression is derived for the average throughput of a single-cell wireless system with multiple cooperative diversity links combined with a fair-access scheduler. The proposed analytic approach is verified through comparisons with simulated results and shows that cooperative diversity makes the detrimental impacts on multiuser diversity.

### I. 서론

무선 통신 서비스에 대한 수요 증가에 따라 무선 통신 시스템의 성능과 용량을 개선시키려는 연구가 활발히 진행되어왔다. 최근에 다이버시티 (diversity) 기술과 무선 자원 관리 (radio resource manage-

ment) 기술은 시스템의 링크 성능과 시스템 용량을 향상 시키는데 각각 중요한 방법으로 자리매김 되었다. 공간 다이버시티는 무선 채널에서 발생하는 페이딩을 억제시킴으로서 링크에서의 성능을 개선시킨다. 최근에 매크로 공간 다이버시티 기술의 한 형태로서 협동 다이버시티(cooperative diversity)가 제

※ 이 논문은 충주대학교 대학구조개혁지원사업비(교육인적자원부 지원)의 지원을 받아 수행한 연구임.

\* 연세대학교 대학원 전기전자공학과 ACEM Lab (iionyourmarkii@hotmail.com)

\*\* 국립 충주대학교 전기전자정보공학부 (chmun@cjnu.ac.kr, stseo@cjnu.ac.kr(° : 교신저자), 107yoo@cjnu.ac.kr)

논문번호 : KICS2007-09-437, 접수일자 : 1997년 9월 28일, 최종논문접수일자 : 2008년 5월 21일

안되고 있다<sup>1,2</sup>. 협동 다이버시티는 송신단과 수신단 사이에 분포되어 있는 여러 릴레이(relay)들을 가상의 안테나 배열로 사용함으로써 공간 다이버시티 이득을 얻는다.

일대 다수간의 무선 통신 시스템에서 스케줄링(scheduling)에 의한 다중 사용자 다이버시티(multiuser diversity)는 주파수 효율을 향상시키는 매우 중요한 기술이다<sup>3,4</sup>. 다중 사용자 다이버시티는 매 데이터 전송 시에 스케줄러가 모든 사용자의 채널 상태 정보, 즉 수신 신호 대 잡음비(signal to noise ratio, SNR)를 이용하여, 가장 좋은 채널 상태를 가지는 사용자에게 전송 기회를 할당해 주는 방식으로 시스템 용량을 증가시킨다. 다중 사용자 다이버시티를 사용하는 무선 통신 시스템에서 다중 안테나 기술에 의한 시스템 용량에 대한 영향은 [5,6]에서 명확히 보여주고 있다. 송신 다이버시티(transmit diversity)는 각 링크에서 수신 SNR의 변동성을 줄여 링크 성능을 개선시키지만, 동시에 다수 링크들의 수신 SNR의 변동성을 이용하는 다중 사용자 다이버시티의 이득을 저하시켜 전체적인 시스템 용량을 감소시킨다<sup>5,6</sup>.

본 논문은 “협동 다이버시티가 공간 다이버시티의 경우와 같이 다중 사용자 다이버시티 이득을 저하시키는가”라는 물음에서 시작하여, 릴레이를 사용하는 각 링크의 수신 SNR을 감마 분포(Gamma distribution)로 근사하고, 다수의 협동 다이버시티 링크들이 fair-access 스케줄링 되는 단일 셀에서의 평균 용량을 해석적으로 구한다. 제안하는 해석방법을 시뮬레이션 결과와 비교하여 검증하였으며, 용량 분석을 통하여 하향 링크에서 협동 다이버시티와 다중 사용자 다이버시티 사이의 상호 작용을 분석하였다.

## II. 시스템 모델

단일 셀에서 무선 통신 시스템의 하향 링크를 고려한다. 셀 내의  $K$ 명의 사용자들은 주파수 비선택적 블록 레일레이 페이딩(frequency flat Rayleigh block fading) 채널을 겪기 때문에, 채널은 패킷을 전송하는 동안 일정하게 유지된다고 가정한다. 각각의 링크는 보조적인 amplify-and-forward 릴레이를 사용하며, 하나의 데이터 패킷이 소스 노드(source node) 's'에서 데스티네이션 노드(destination node) 'd'로 전송되는 데에는 두 개의 연속된 타임 슬롯을 사용한다.

### 2.1 링크 모델

소스 노드는 첫 번째 타임 슬롯 동안 데스티네이션과 릴레이 모두에게 신호를 전송한다. 이때 데스티네이션과 릴레이에 수신된 신호는 각각

$$y_{s,d} = \sqrt{P_s} h_{s,d} x + n_{s,d} \quad (1)$$

$$y_{s,r} = \sqrt{P_s} h_{s,r} x + n_{s,r} \quad (2)$$

이다. 여기서  $x$ ,  $y_{s,d}$ , 그리고  $y_{s,r}$ 는 정규화된 에너지를 가지는 송신 신호, 데스티네이션에서 수신한 신호, 릴레이에서 수신한 신호를 각각 나타낸다.  $h_{s,d}$ 와  $h_{s,r}$ 는 소스와 데스티네이션 그리고 소스와 릴레이 사이의 채널 계수를 나타내며, i.i.d (independent and identically distributed) 복소 가우시안 랜덤 변수 (complex Gaussian random variables)로 가정한다. 즉,  $h_{s,d} \sim CN(0, g_{s,d})$  그리고  $h_{s,r} \sim CN(0, g_{s,r})$ 라고 가정한다. 여기서,  $P_s$ 는 소스 노드의 평균 송신 전력을 나타내고,  $g_{s,d}$ 와  $g_{s,r}$ 은 소스-데스티네이션, 소스-릴레이의 경로 손실(path loss)와 쉐도잉(shadowing)을 포함하는 채널의 평균 이득을 각각 의미한다.  $n_{s,d}$ 와  $n_{s,r}$ 은 각 채널의 AWGN (additive white Gaussian noise)를 나타내고,  $n_{s,d} \sim CN(0, N_0)$ ,  $n_{s,r} \sim CN(0, N_0)$ 와 같이 동일한 분산  $N_0$ 를 가진다고 가정한다.

다음 두 번째 타임 슬롯 동안, 릴레이는 소스로부터 받은 신호를 증폭하여 데스티네이션으로 전송한다. 데스티네이션이 릴레이로부터 받은 신호는

$$y_{r,d} = G\sqrt{P_r} h_{r,d} y_{s,r} + n_{r,d} \quad (3)$$

이고, 여기서  $h_{r,d} \sim CN(0, g_{r,d})$ 는 릴레이-데스티네이션의 채널 계수,  $g_{r,d}$ 는 릴레이-데스티네이션의 평균 채널 이득,  $P_r$ 은 릴레이의 평균 송신 전력, 그리고  $n_{r,d} \sim CN(0, N_0)$ 는 AWGN을 각각 나타낸다.  $G$ 는 릴레이 노드의 증폭 이득을 나타내며  $1/(P_s|h_{s,r}|^2)$ 로 유지되는데, 이는 릴레이의 평균 송신에너지가 발산하지 않도록 제한한다. 링크 전체의 송신 전력  $P_T$ 는 소스 노드와 릴레이 노드에 동일하게 분포되도록 한다. 즉  $P_s = P_r = P_T/2$ 가 된다.

데스티네이션 노드에서 MRC (maximal ratio combining)을 한 후의 수신 SNR 는

$$\gamma_d = \gamma_{s,d} + \frac{\gamma_s \gamma_{r,d}}{\gamma_{s,r} + \gamma_{r,d}} \quad (4)$$

이고, 여기서  $\gamma_{s,d} = P_s |h_{s,d}|^2 / N_0$ ,  $\gamma_{s,r} = P_s |h_{s,r}|^2 / N_0$ , 그리고  $\gamma_{r,d} = P_r |h_{r,d}|^2 / N_0$  이다.

### 2.2 링크 수신 SNR의 근사화

시스템 용량을 이론적으로 해석을 하기 위해  $\gamma_d$ 의 분포를 감마 분포로 근사화(approximation) 한다. 감마 분포는 파라미터  $\alpha$ 와  $\beta$ 로 정의되며,  $\gamma_d$ 의 분포의 근사화를 위해  $\gamma_d$ 의 원래 분포로부터 근사화된 감마 분포의 파라미터  $\alpha$ 와  $\beta$ 를 다음과 같이 유도한다.

$$f_{\gamma_d}(x) \approx \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}, x > 0 \quad (5)$$

여기서  $\alpha = \bar{r}_d^2 / \sigma_d^2$ ,  $\beta = \sigma_d^2 / \bar{r}_d$  이고  $\Gamma(\cdot)$ 는 감마함수로  $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt$ 와 같이 정의된다.  $\gamma_d$ 의 평균과 분산인  $\bar{\gamma}_d$ 와  $\sigma_d^2$ 은 각각

$$\bar{\gamma}_d = (-1) \frac{d}{dt} M_{\gamma_d}(t) \Big|_{t=0} \quad (6)$$

$$\sigma_d^2 = (-1)^2 \frac{d^2}{dt^2} M_{\gamma_d}(t) \Big|_{t=0} - \bar{\gamma}_d^2 \quad (7)$$

와 같이 구해진다.  $\gamma_d$ 의 MGF (moment generating function)인  $M_{\gamma_d}(\cdot)$ 은

$$M_{\gamma_d}(t) = M_{\gamma_{s,d}}(t) \cdot M_{\gamma_{r,d}}(t) \quad (8)$$

이며, 여기서  $M_{\gamma_{s,d}}(t) = 1/(1+g_{s,d}t)$ 이다. 만약 소스-릴레이, 릴레이-데스티네이션간의 채널 이득이 동일하다면, 즉  $g_{s,r} = g_{r,d}$ 이라면,  $\gamma_{s,d} \gamma_{r,d} / (\gamma_{s,d} + \gamma_{r,d})$ 의 MGF,  $M_{\gamma_{s,d}}(\cdot)$ 는

$$M_{\gamma_{s,d}}(t) = {}_2F_1\left(1, 2; \frac{3}{2}; -\frac{g_{s,r}}{4}t\right) \quad (9)$$

로 주어진다<sup>[8]</sup>.  ${}_2F_1(\cdot, \cdot; \cdot; \cdot)$ 는 Gauss' hypergeometric function으로 [9]의 정의를 따른다.

### III. 시스템 용량 분석

$K$ 개의 협동 다이버시티 링크를 가지고 fair-access 스케줄러를 활용하는 단일 셀 무선 통신 시스템의 평균 용량을 유도한다. 앞으로 위치자 'k'는 링크의 번호를 의미한다. 이론적인 용량 분석을 위해 각 링크의 소스-릴레이(릴레이-데스티네이션)와 소스-데스티네이션의 채널 이득의 비율이 동일하다고 가정한다. 즉,  $\{g_{s,r}^{(k)} / g_{s,d}^{(k)}\}_{k=1, \dots, K} = \{g_{r,d}^{(k)} / g_{s,d}^{(k)}\}_{k=1, \dots, K} = \delta$ 로 가정한다. 그리고 2장의 방식으로  $k$ 번째 링크의 SNR  $\gamma_d^{(k)}$ 의 분포를 감마분포로 근사하는데, 이때  $\gamma_d^{(k)}$ 의 근사화된 감마 분포의 파라미터는 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{(1 + \frac{1}{3}\delta)^2}{(1 + \frac{4}{45}\delta^2)} \quad (10)$$

$$\beta^{(k)} = \frac{(1 + \frac{4}{45}\delta^2)}{(1 + \frac{1}{3}\delta)} g_{s,d}^{(k)} \quad (11)$$

Fair-access 스케줄러는 각 타임 슬롯에서 평균 SNR에 대해 순시 SNR이 가장 큰 링크로 패킷을 전송한다. 이렇게 평균적인 채널에 비해 상대적으로 좋은 순시 채널 상태의 링크를 통해 데이터를 전송함으로써, 공평성(fairness)을 유지하면서도 다중 사용자 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 스케줄링 알고리즘은 다음과 같다.

$$k^* = \arg \max_{k=1, \dots, K} \frac{\gamma_d^{(k)}}{\bar{\gamma}_d^{(k)}} \quad (12)$$

$$= \arg \max_{k=1, \dots, K} \frac{\gamma_d^{(k)}}{\beta^{(k)}}$$

여기서  $\gamma_d^{(k)}$ 는  $\beta^{(k)}$ 에 비례하므로, 즉  $\bar{\gamma}_d^{(k)} = \alpha \beta^{(k)}$ 이므로 식 (12)의 오른쪽 항을 만족한다. 따라서 fair-access 스케줄링에 사용되는 최종 결정 변수 (decision variables)  $\chi^{(k)} = \gamma_d^{(k)} / \beta^{(k)}$ 는 다음과 같은 분포함수를 갖는다.

$$f_{\chi^{(k)}}(x) = \beta^{(k)} \cdot f_{\gamma_d^{(k)}}(\beta^{(k)}x) \quad (13)$$

$$= \frac{1}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x}$$

식 (13)은 모든  $k$ 에 대해서  $\chi^{(k)}$ 가 동일한 분포를 가짐을 보여준다. 즉,  $\{f_{\chi^{(k)}}(x)\}_{k=1, \dots, K} = f_{\chi}(x)$ 이다. 따라서, fair-access 스케줄링 알고리즘은 모든 사용자들에게 동일한 access time을 보장한다.

Fair-access 스케줄러는 패킷을 스케줄링할 때 사용자의 평균 SNR을 고려하지 않는다. 따라서 fair-access 스케줄러에 의해 선택된 링크들의 순시

SNR,  $\tilde{\gamma}$ 는 두 개의 독립적인 랜덤 변수, 스케줄러에 의해 선택된 링크들의  $\chi^{(k)}$ 를 나타내는  $\tilde{\chi}$ 와 스케줄러에 의해 선택된 링크들의  $\beta^{(k)}$ 를 나타내는  $\tilde{\beta}$ 의 곱으로 표현할 수 있다.

$$\tilde{\gamma} = \tilde{\beta} \tilde{\chi} \quad (14)$$

$\tilde{\chi}$ 의 PDF(probability density function)는  $\{f_{\chi^{(k)}}(x)\}_{k=1, \dots, K} = f_{\chi}(x)$ 임을 고려하여 order statistics<sup>[10]</sup>를 이용해 구할 수 있다.

$$f_{\tilde{\chi}}(x) = K f_{\chi}(x) (F_{\chi}(x))^{K-1} \quad (15)$$

여기서  $F_{\chi}(\cdot)$ 은  $\chi$ 의 CDF(cumulative distribution function)이다. 반면 모든 사용자는 동일한 access time을 가지기 때문에  $\tilde{\beta}$ 는  $\beta^{(k)}$ 와 동일한 통계적 특성을 가지며 다음과 같이 분포함수를 정의할 수 있다.

$$f_{\tilde{\beta}}(x) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \delta(x - \beta^{(k)}) \quad (16)$$

따라서  $\tilde{\gamma}$ 의 PDF는 식 (14), (15), (16)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} f_{\tilde{\gamma}}(x) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{|t|} f_{\tilde{\beta}}(t) f_{\tilde{\chi}}\left(\frac{x}{t}\right) dt \\ &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \frac{1}{\beta^{(k)}} f_{\tilde{\chi}}\left(\frac{x}{\beta^{(k)}}\right) \end{aligned} \quad (17)$$

$K$ 개의 협동 다이버시티 링크와 fair-access 스케줄러를 가지는 무선 통신 네트워크의 평균 시스템 용량을 구하는 최종 수식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{C}_{sys} &= \frac{1}{2} \int_0^{\infty} \log_2(1+x) f_{\tilde{\gamma}}(x) dx \\ &= \sum_{k=1}^K \frac{1}{2\beta^{(k)\alpha} \Gamma(\alpha)} \times \\ &\quad \int_0^{\infty} \log_2(1+x) x^{\alpha-1} e^{-x/\beta^{(k)}} \left( P\left(\alpha, \frac{x}{\beta^{(k)}}\right) \right)^{K-1} dx \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, 릴레이의 경우 하나의 패킷을 전송하기 위해 두 개의 연속적인 타임 슬롯을 사용하기 때문에, 하나의 타임 슬롯만을 사용하는 직접 전송 (direct transmission) 보다 전송 용량이 절반이 된다.  $P(\cdot, \cdot)$ 는 regularized Gamma function으로 다음과 같이 정의 된다.

$$P(\alpha, x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (19)$$

#### IV. 결과 분석 및 결론

모든 링크에 대해  $P_s = P_r = P_T/2 = 1$ 로 가정한다. 또한,  $g_{s,d}^{(k)}$ 는 다음과 같이 균일한 분포를 갖도록 정의한다.

$$g_{s,d}^{(k)} = \eta + k\epsilon \sqrt{\frac{3}{n(n+1)}}, \quad k=0, \pm 1, \dots, \pm n \quad (20)$$

여기서  $\eta$ 와  $\epsilon$ 는  $g_{s,d}^{(k)}$ 의 평균과 표준편차를 나타내고  $n = \frac{K-1}{2}$ 이다. 본 논문에서는  $\eta$ 와  $\epsilon$ 는 각각 10.0과 5.0으로 설정하였다. 셀의 사용자 수는  $g_{s,d}^{(k)}$ 의 대칭적 분포를 위해 항상 홀수의  $K$ 를 가정한다. 위의 분포는 식 (10)과 (11)에 를 대입하여 구할 수 있다.

그림 1은 평균 시스템 용량에 대한 시뮬레이션과 본 논문에서 제안한 해석법에 의한 비교 결과를  $K$ 에 대해 보여주고 있다. 시뮬레이션에 의한 용량 분석을 위해 10,000번 이상의 채널을 발생시키고, 각각의 채널 발생에서 각 링크는  $g_{s,r}^{(k)} = g_{r,d}^{(k)}$ 와  $\{g_{s,r}^{(k)}/g_{s,d}^{(k)}\}_{k=1, \dots, K} = \delta$ 를 만족한다. 각 채널 발생에 대한 순시적인 용량을 계산하고 이를 평균하여 평균 시스템 용량을 구한다. 비교 결과, 모든  $\delta$ 에 대해 시뮬레이션에 의해 구한 시스템 용량과 제안하는 해석법에 의한 시스템 용량이 거의 일치함으로써, 본 논문에서 제안하는 시스템 용량 해석 방법이 유효함을 보여준다.

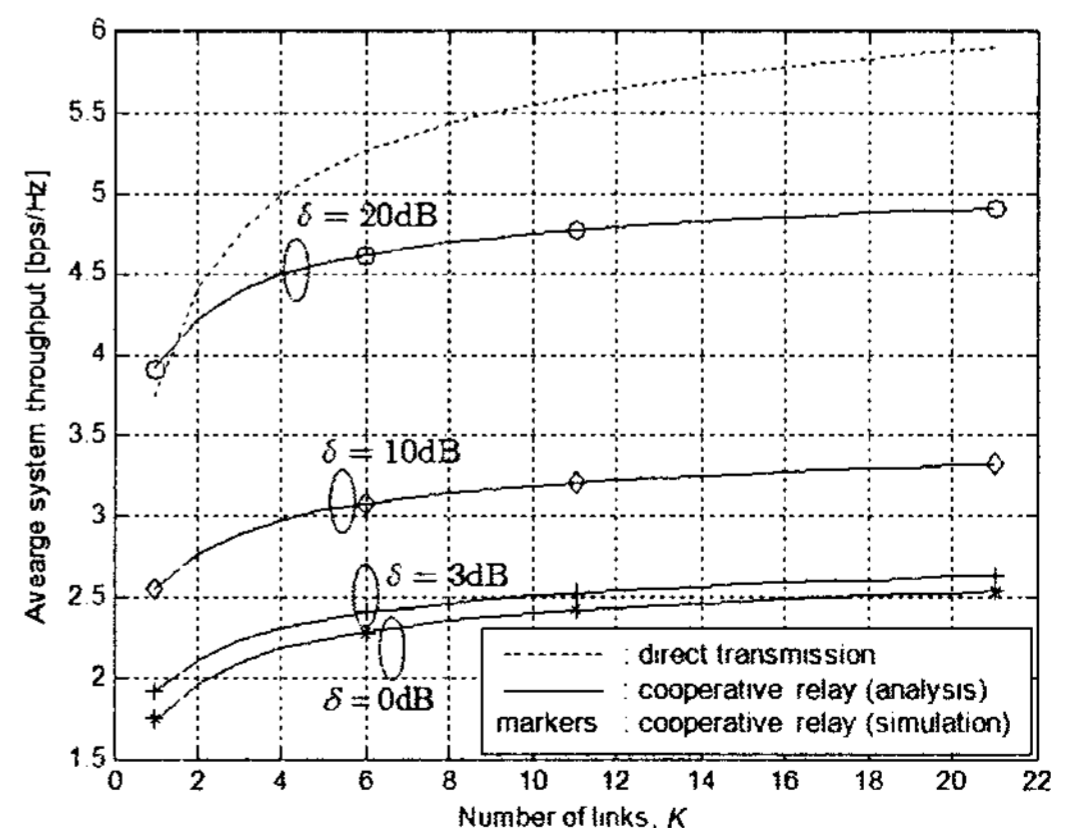


그림 1. 다중 사용자 다이버시티와 협동 다이버시티를 사용하는 무선 통신 네트워크의 시스템 용량 분석

그림 1에서 각 링크에서  $\delta$ 가 클수록, 즉 직접 경로 (direct path)에 대한 릴레이 경로 (relay path)의 평균 채널 이득이 클수록, 평균 시스템 용량이 증가함을 확인할 수 있다. 이는 다수의 릴레이 경로들 중에서 평균 채널 이득을 최대로 하는 릴레이를 선택하여 전송하는 smart relaying 기술을 통해, destination에서 수신된 SNR의 평균과 분산을 증가시키고 이를 통해 다중 사용자 다이버시티 이득을 증가시켜 결과적으로 시스템 용량을 증가시킬 수 있음을 보여준다. 그러나, 직접 전송과 같이 릴레이의 도움 없이 신호를 바로 전송하는 경우, 협동 다이버시티보다 더 높은 시스템 용량을 얻게 되는데, 이는 단지 하나의 타임 슬롯 동안 총 전력  $P_T$ 를 소스 노드에서 모두 사용할 수 있기 때문이다. 또한, 협동 다이버시티는 공간 다이버시티 이득에 의해 destructive 페이딩을 경감시켜 줄 뿐만 아니라 동시에 constructive 페이딩까지 감소시키기 때문에, 순시적으로 높은 constructive 페이딩을 갖는 링크를 선택하여 전송함으로써 시스템 용량을 증가시키는 다중 사용자 다이버시티 이득을 감소시킨다. 이는 그림 1에서 총 사용자수  $K$ 에 따라 변하는 시스템 용량 곡선의 증가를 보면 협동다이버시티를 이용하는 쪽이 그렇지 않은 경우보다 낮은 증가율을 보이는 것으로 확인할 수 있다.

결과적으로 협동 다이버시티를 사용하여 각 링크의 페이딩을 경감시키는 것은 다중사용자 다이버시티 이득을 줄어든다. 하지만 smart relaying scheme을 사용하여 더 좋은 채널 상태를 가지는 릴레이를 선택하게 된다면 이를 효과적으로 보상할 수 있다.

### 참고 문헌

[1] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity - Part I: System description," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.51, No.11, pp.1927-1938, Nov., 2003.

[2] J. N. Laneman, D. N. C. Tse and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior", *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.50, No.12, pp. 3062-3080, Dec., 2004.

[3] R. Knopp and P. A. Humblet, "Information capacity and power control in single-cell multiuser communications," in *Proc. of*

*International Conference on Communications (ICC)*, pp.331-335, 1995.

[4] P. Bender, P. Black, M. Grob, R. Padovani, N. Sindhushayana, and A. Viterbi, "CDMA/HDR: A bandwidth-efficient high-speed wireless data service for nomadic users," *IEEE Communications Magazine*, pp.70-77, July 2000.

[5] B. M. Hochwald, T. L. Marzetta, and V. Tarokh, "Multiple-antenna channel hardening and its implications for rate feedback and scheduling," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.50, No.9, pp. 1893-1909, Sept., 2004.

[6] C. Mun, M.-W. Lee, J.-G. Yook, H.-K. Park, "Exact capacity analysis of multiuser diversity combined with transmit diversity", *Electronics Letters*, Vol.40, No.22, pp.1423-1424, Oct., 2004.

[7] C. Mun, C.-H. Kang, and H.-K. Park, "Approximation of SNR statistics for MRC diversity systems in arbitrarily correlated Nakagami fading channels, *Electronics Letters*, Vol.35, No.4, pp.266 - 267, Feb., 1999.

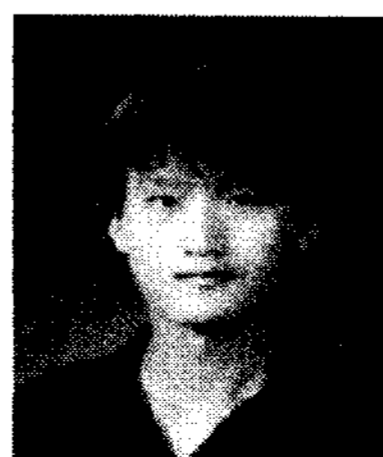
[8] M. O. Hasna and M. S. Alouini, "A performance study of dual-hop transmissions with fixed gain relays," *IEEE trans. Wireless Commun.*, Vol.3, No.6, pp.1963-1986, Nov., 2004.

[9] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. New York, NY: Dover Publications, ninth ed., 1970.

[10] H. A. David, *Order Statistics*, 1st ed. New York: Wiley, 1970.

정 희 진 (Hee-Jin Joung)

준회원



2008년 2월 충주대학교 전자통신 공학과 졸업

2008년 2월~현재 연세대학교 대학원 전기전자공학과 석박사 통합과정

<관심분야> MIMO, Multiuser diversity, Relaying

문 철 (Cheol Mun)

정회원



1995년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업  
1997년 2월 연세대학교 전자공학과 석사  
2001년 2월 연세대학교 전기전자공학과 박사  
2001년 3월~2002년 2월 삼성

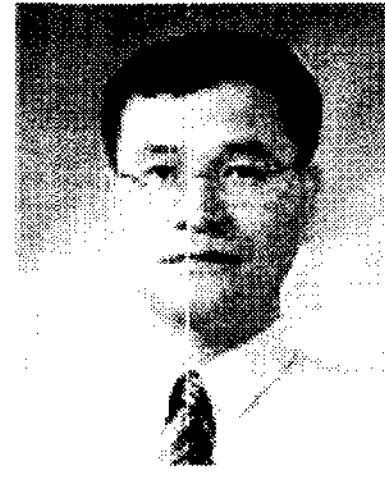
전자 네트워크사업부 선임연구원

2003년 8월~현재 국립충주대학교 전기전자정보공학부 교수

<관심분야> MIMO, Multiuser diversity, Relaying

유 강 희 (Kang-Hee Yoo)

정회원



1979년 2월 고려대학교 전자공학과 졸업  
1982년 9월 고려대학교 전자공학과 석사  
1987년 8월~1989년 8월 벨기에 Bell telephone 방문연구원  
1997년 9월 고려대학교 전자공학과 박사

1978년 12월~1998년 6월 한국전자통신연구원 연구원, 선임연구원, 책임연구원, 연구실장

1998년 9월~현재 국립충주대학교 전기전자정보공학부 교수

<관심분야> 광통신 시스템, 초고주파 회로설계

서 정 태 (Jeong-Tae Seo)

정회원



1985년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업  
1987년 2월 연세대학교 전자공학과 석사  
1988년~1990년 삼성전자 정보통신연구소 주임연구원  
1995년 2월 연세대학교 전자공학과 박사

2003년 Virginia Polytechnic Institute and State University Visiting Scholar

1995년~현재 국립충주대학교 전기전자정보공학부 교수

<관심분야> 음성 부호화, 영상 부호화, 이동통신