

다중 사용자 릴레이 시스템에서 감소된 피드백 정보를 이용한 두 단계 스케줄링 기법

정회원 장 용 업*, 신 원 용**°, 종신회원 김 아 정***

Two-step Scheduling With Reduced Feedback Overhead in Multiuser Relay Systems

Yong-Up Jang*, Won-Yong Shin**° *Regular Members*, Ajung Kim*** *Lifelong Member*

요 약

본 논문은 다중 사용자 amplify-and-forward relay 시스템에서 전송 모드, 즉, 한 홉 혹은 두 홉 전송, 그리고 적절한 사용자를 두 단계로 선택하는 다중 사용자 스케줄링 기법을 소개한다. 제안하는 다중 사용자 스케줄링을 수행 하였을 경우 두 가지 전송 모드별 평균 achievable rate의 닫힌 꼴 표현을 유도하고 단말 수가 무한히 증가 할 때 평균 achievable rate에 대한 점근적인 결과도 분석한다. 평균 achievable rate 분석에 기반하여 두 단계 스케줄링 알고리즘을 수행하는데, 먼저 전송 모드 선택을 하고, 그 다음 선택된 전송 모드에 대한 순간 signal-to-noise ratio (SNR)을 기지국으로 피드백 함으로써 이를 이용한 부분적인 피드백 정보를 기반으로 사용자 선택을 수행한다. 또한 다중 사용자 diversity gain이 최대로 취득되는 평균 SNR 조건도 분석하고 추가로 특정 조건에서 피드백 양을 더 줄일 수 있는 방안에 대해 조사한다. 제안된 스케줄링 알고리즘은 모든 전송 모드 (즉, 한 홉과 두 홉 전송 모드)에 대한 instantaneous SNR을 피드백하여 최적 다중 사용자 스케줄링을 할 경우와 유사한 achievable rate을 보인다. 반면 제안 기법의 피드백 양은 최적 기법에 비해 대략 절반으로 줄어드는 것을 확인한다.

Key Words : Two-step multiuser(MU) scheduling, User selection, Signal-to-noise ratio (SNR), transmission mode, Amplify-and-forward relay, Feedback

ABSTRACT

In this paper, we introduce a multiuser (MU) scheduling method for multiuser amplify-and-forward relay systems, which selects both the transmission mode, i.e., either one- or two-hop transmission, and the desired user via two steps. A closed-form expression for the average achievable rate of the proposed scheduling is derived under two transmission modes with MU scheduling, and its asymptotic solution is also analyzed in the limit of large number of mobile stations. Based on the analysis, we perform our two-step scheduling algorithm: the transmission mode selection followed by the user selection that needs partial feedback for instantaneous signal-to-noise ratios (SNRs) to the base station. We also analyze the average SNR condition such that the MU diversity gain is fully exploited. In addition, it is examined how to further reduce a quantity of feedback under certain conditions. The proposed algorithm shows the comparable achievable rate to that of the optimal one using full feedback information, while its required feedback overhead is reduced below half of the optimal one.

※ 본 연구는 한국연구재단 일반연구과제(NRF-2011-0010621) 지원으로 수행되었습니다.

* KAIST IT 융합연구소 (yujang@itc.kaist.ac.kr)

** School of Engineering and Applied Sciences, Harvard University (wyshin@seas.harvard.edu) (° : 교신저자)

*** 세종대학교 전자정보통신공학부 (akim@sejong.ac.kr)

논문번호 : KICS2011-01-069, 접수일자 : 2011년 1월 31일, 최종논문접수일자 : 2011년 5월 2일

I. 서 론

Relay를 사용하는 전송 기술은 용량 측면에서 end-to-end 링크 질을 향상시킬 뿐 아니라 커버리지를 확장시키는 장점으로 인해 널리 사용되고 있다^[1]. 가장 간단한 relay 프로토콜 중 하나는 base station (BS)과 mobile station (MS) 사이의 통신을 돕는 두 홉 relaying이다^[2]. 시스템에 하나의 BS, 하나의 MS, 그리고 다수 개의 relay station (RS)이 배치되었을 때 두 홉 relaying 협력을 고려하는 많은 사전 연구가 진행되어 왔는데, 대표적으로 분산 시공간 코딩^[3,4]과 RS 선택^[5]과 같은 신규 기술이 있다. 하지만 두 홉 relaying 통신의 단점은 half-duplex 가정 시 시간과 주파수 등의 자원이 한 홉 전송에 비해 두 배로 많이 필요하다는 것이다. 즉, 두 홉 relaying 기술은 achievable rate 측면에서 pre-log factor 1/2을 야기하고^[6], 한 홉 전송에 비해 항상 더 좋은 시스템 용량을 보장하지는 못한다. 따라서 시스템 용량을 최대화하기 위해 한 홉 혹은 두 홉 전송과 같은 전송 모드를 선택하기 위한 적절한 스케줄링 방안이 효율적으로 채택되어야 한다.

수많은 MS가 존재하는 시스템 환경에서, 시스템 용량을 더욱 증가시키기 위해 다중 사용자 diversity gain이 활용될 수 있다. 예를 들면, 하향링크 broadcast 채널에서 기회적 스케줄링^[7], 기회적 beamforming^[8], 그리고 random beamforming^[9]이 대표적 기술이다. 위의 기술들을 다른 시스템 모델에 확장함으로써 ad hoc 네트워크에서의 기회적 routing 방법^[10]과 cognitive radio 네트워크에서의 기회적 스케줄링 방법^[11]이 소개되었다. 또한 협력 통신 방안 중 하나인 두 홉 decode-and-forward relay 시스템을 고려할 때 BS와 RS 사이의 링크가 부가백색가우시언잡음 (additive white Gaussian noise: AWGN)인 경우 기회적 스케줄링 기술이 개발되었다^[12]. RS 지원을 받는 다중 사용자 시스템에서 최적의 전략은 RS가 전송 모드와 셀 내 모든 사용자 중 적절한 MS를 동시에 선택하는 것이다. 이 때 BS에서 한 홉 및 두 홉 링크에 대한 순간 신호대잡음비 (signal-to-noise ratio: SNR) 값에 기반하여 선택을 수행하는데, 이 때 많은 피드백 양을 필요로 하게 된다.

본 논문에서는 두 홉 amplify-and-forward (AF) relay를 지원하는 다중 사용자 하향링크 시스템에서 효율적으로 피드백 정보량을 줄일 수 있는 두 단계 기회적 스케줄링 방법을 제안한다. 제안하는 스케줄링 방안은 전송 모드와 적절한 MS를 동시에 선택하는

것이 아닌 단계적으로 선택하는 방안이다. 첫 번째로, BS는 평균 SNR과 MS의 수 N 을 이용하여 한 홉 또는 두 홉 다중 사용자 스케줄링의 단점 꼴로 표현된 평균 achievable rate 중 더 큰 값을 가지는 전송 모드를 선택한다. 두 번째로, BS는 MS에게 첫 번째 단계에서 선택된 전송 모드 (즉, 한 홉 또는 두 홉)에 대한 순간 SNR 값을 요청하고, 피드백 정보에 기반하여 적절한 MS를 기회적으로 선택한다. 제안하는 기술의 첫 번째 단계인 전송 모드 선택을 위하여, 사용하는 두 가지 전송 모드에 대한 평균 achievable rate의 단점 꼴 표현을 유도한다. 또한 MS의 수 N 이 무한히 크게 증가할 경우에 대해 점근적인 평균 achievable rate을 유도한다. 또한 점근적인 결과 식으로부터, 특정 조건 하에 피드백 정보를 추가적으로 줄일 수 있는 방안을 제안한다. 제안한 스케줄링의 성능을 검증하기 위해 컴퓨터 모의실험을 수행 하였고, 모의실험 결과를 통해 제안한 두 단계 스케줄링 기술은 모든 피드백 정보를 활용하는 최적 기술과 비슷한 achievable rate을 가짐을 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 시스템 및 채널 모델을 설명한다. III장에서는 두 단계 다중 사용자 스케줄링 기법이 제안된다. IV장에서는 제안한 스케줄링 기법에 대한 평균 achievable rate을 분석하고, 피드백 양을 더욱 줄이기 위한 수정된 스케줄링 기술을 보인다. V장에서 모의실험 결과를 보이고, VI장에서 본 논문을 요약 및 마무리한다.

II. 시스템 및 채널 모델

그림 1은 하나의 BS, 하나의 RS, N 개의 MS로 구성된 다중 사용자 하향링크 relay 시스템이다. 1) 한 홉 전송에서는 BS가 특정 MS까지 직접 신호를 전송한다. 이 때 n 번째 MS의 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_{1,n} = h_{b,m,n} \sqrt{P_b} x + w_{m,n}, \quad n = 1, \dots, N \quad (1)$$

여기에서 $h_{b,m,n}$ 은 BS와 n 번째 MS 사이의 complex 채널, P_b 는 BS에서의 송신 전력, x 는 송신 신호, $w_{m,n}$ 은 분포 $CN(0, \sigma_{m,n}^2)$ 을 갖는 n 번째 MS에서의 complex AWGN을 나타낸다. 두 홉 전송에서는 BS가 RS를 통해 하나의 MS로 신호를 전송한다. 이

1) 본 논문에서 고려하는 시스템 모델은 broadcast relay 채널 모델로써 기존 논문^[13,14] 뿐만 아니라 3GPP Long Term Evolution (LTE)^[15]에서도 고려되는 실제적인 모델이다.

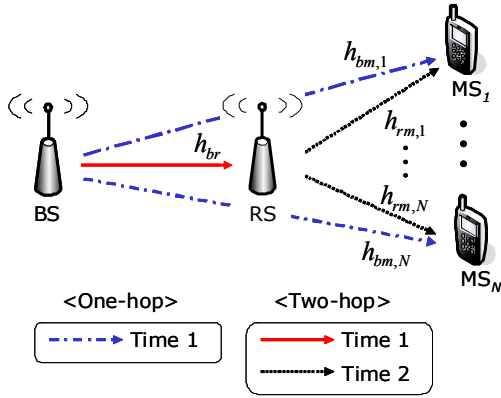


그림 1. 하나의 BS, 하나의 RS, 그리고 N 명의 MS가 존재할 때 다중 사용자 하향링크 시스템 모델

때 RS는 동시에 송신 및 수신에 불가능한 half-duplex 모드로 동작한다고 가정한다. 그러면 첫 번째 시간 슬롯에서 BS는 RS로 데이터를 송신하고, 두 번째 시간 슬롯에서 RS는 받은 데이터를 증폭 후 MS로 전송하게 된다. 간단한 모델링을 위해 두 홉 전송에서 BS로부터 MS로의 직접 경로는 고려하지 않는다. 이 때 n 번째 MS에서의 수신 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$y_{2,n} = h_{rm,n}g(h_{br}\sqrt{P_b}x + w_r) + w_{m,n}, \quad n = 1, \dots, N \quad (2)$$

여기에서 $h_{rm,n}$ 과 h_{br} 은 각각 RS와 n 번째 MS 사이, BS와 RS 사이의 complex 채널이다. 또한 g 는 RS에서의 증폭 요소, w_r 은 분포 $CN(0, \sigma_r^2)$ 을 갖는 RS에서의 complex AWGN을 나타낸다. 채널 $h_{bm,n}$, $h_{rm,n}$, h_{br} 은 $n = 1, \dots, N$ 에 대해 모두 independent and identically distributed (i.i.d.)하며, 분포 $CN(0, 1)$ 을 가진다고 가정한다. 이 때 RS에서의 증폭 요소 g 는 아래와 같이 표현된다²⁾.

$$g = \sqrt{\frac{P_r}{|h_{br}|^2 P_b + \sigma_r^2}} \quad (3)$$

여기에서 P_r 은 RS에서의 송신 전력을 나타낸다. BS에서는 지리적 위치에 기반한 모든 평균 SNR 값 및 MS의 수 N 을 사전에 알 수 있고, 채널 이득을 포함하는 순간 SNR은 오로지 피드백을 통해 획득 가능하다고 가정한다. 추가로 다중 사용자 시스템에서 다수 개의 MS가 선택되는데 있어, 선택된 모든 MS는

각각 BS에서 MS까지 (BS-MS)의 평균 SNR이 동일하고, 또한 RS에서 MS까지 (RS-MS)의 평균 SNR도 동일하다고 가정한다. 즉, BS-MS 평균 SNR과 RS-MS 평균 SNR이 각각 $\bar{\gamma}_{bm}$ 과 $\bar{\gamma}_{rm}$ 로 주어질 때, 위의 가정으로부터 아래 두 조건이 만족된다.

$$\bar{\gamma}_{bm} = \frac{P_b}{\sigma_m^2} = \frac{P_b}{\sigma_{m,1}^2} = \dots = \frac{P_b}{\sigma_{m,N}^2},$$

$$\bar{\gamma}_{rm} = \frac{P_r}{\sigma_m^2} = \frac{P_r}{\sigma_{m,1}^2} = \dots = \frac{P_r}{\sigma_{m,N}^2}$$

이 때 위의 수식은 모든 선택된 MS가 BS와 RS로부터 모두 같은 반경을 가지는 곳에 위치해 있음을 의미한다. 본 모델에서는 분석의 용이함을 위해 시간 영역에서의 전력 제어는 수행하지 않는다.²⁾

III. 제안하는 두 단계 다중 사용자 스케줄링 방법

본 장에서는 MS에서 BS로의 순간 SNR에 대한 피드백 양을 효율적으로 줄이면서 최적 스케줄링을 수행하는 새로운 기법을 제안한다. 제안하는 스케줄링은 BS가 전송 모드와 적절한 MS를 두 단계로 선택하는 방안이다. C_i 를 i 홉 ($i \in \{1, 2\}$) 전송에서 N 명의 MS 중 최대 순간 SNR을 가지는 MS의 평균 achievable rate으로 정의하면 C_i 는 평균 SNR $\bar{\gamma}_{bm}$, $\bar{\gamma}_{rm}$, $\bar{\gamma}_{br}$ ($= \frac{P_b}{\sigma_r^2}$)과 N 의 함수로 표현된다 (C_i ($i \in \{1, 2\}$)의 분석은 IV장에서 자세히 다룬다). 제안하는 스케줄링 방안은 다음의 두 단계로 나누어져 있다.

단계 1. 전송 모드 선택

전송 모드 \hat{i} 은 다음과 같이 정한다.

$$\hat{i} = \arg \max_{i \in \{1, 2\}} C_i \quad (4)$$

여기서 전송 모드는 파라미터 $\bar{\gamma}_{bm}$, $\bar{\gamma}_{rm}$, $\bar{\gamma}_{br}$ 과 N 에 기반하여 이미 설계된 검색표를 사용하여 선택된

2) 높은 SNR 영역에서, 시간 영역에서의 최적 전력 제어 수행 시 페이딩 환경 하에 평균 achievable rate은 송신 전력 제어를 수행하지 않는 경우 대비 아주 근소한 이득이 있음이 보여진다¹⁶⁾. 제안하는 시스템에서는 다중 사용자 스케줄링이 수행되고, 즉, 높은 SNR을 가지는 사용자가 선택되므로, N 이 충분히 클 때 전력 제어에 의한 이득은 거의 무시할 수 있을 것이다.

다 (표 1 참조).³⁾ 검색표는 다음 장에서 분석할 C_i 의 닫힘꼴 표현에 기반하여 설계될 수 있다. 예를 들어 $\bar{\gamma}_{bm} = 0\text{dB}$, $\bar{\gamma}_{rm} = 20\text{dB}$, $\bar{\gamma}_{br} = 30\text{dB}$ 이고 $N = 15$ 일 경우, 표 1에 의해 $\hat{i} = 2$ 이고 따라서 전송 모드는 두 홉으로 결정된다.

단계 2. 사용자 선택

BS는 MS에게 단계 1에서 결정된 홉의 순간 SNR을 피드백 하도록 요청한다. 한 홉 전송의 경우, BS는 BS-MS의 순간 SNR $\bar{\gamma}_{bm}|h_{bm,n}|^2$ ($n = 1, \dots, N$)을 피드백 하도록 요청하고, 두 홉 전송의 경우, BS는 RS를 통한 BS와 MS 사이 (BS-RS-MS)의 순간 SNR

$$\frac{\bar{\gamma}_{br}|h_{br}|^2\bar{\gamma}|h_{rn}|^2}{\bar{\gamma}_{br}|h_{br}|^2 + \bar{\gamma}|h_{rn}|^2 + 1}, n = 1, \dots, N, \quad (5)$$

을 피드백 하도록 요청한다. BS는 MS가 피드백한 정보를 바탕으로, 결정된 홉에서의 최대 순간 SNR을 가지는 MS를 선택하여 최종 서비스 한다.

비교를 위해 한 홉과 두 홉 모든 순간 SNR을 피드백하는 최적 스케줄링 방안이 고려된다. 이 경우 주어진 채널에 대해 순간 achievable rate을 최대화하는 측면에서 전송 모드 및 사용자가 동시에 선택된다. V장에서 모의실험을 통해 제안하는 두 단계 스케줄링 방안이 기존 한 홉 또는 두 홉만을 사용하는 다중 사용자 스케줄링 방안 대비 높은 성능을 나타냄을 보인다. 또한 제안하는 스케줄링은 최적 스케줄링 방안 대비 두 배 적은 피드백 양을 가지면서 비슷한 성능을 나타냄을 보인다.

IV. Achievable Rate 분석

본 장에서는 한 홉과 두 홉으로 각각 다중 사용자 스케줄링을 수행할 경우의 평균 achievable rate을 분석한다. 먼저 평균 achievable rate의 닫힘 꼴을 유도하고, MS의 수 N 이 무한히 클 경우 점근적인 닫힘 꼴을 유도한다. 뿐만 아니라, 점근적인 닫힘 꼴 표현에 기반하여 특정 조건에서 피드백 양을 더욱 줄일 수 있는 다중 사용자 스케줄링을 제안한다.

3) 룩업 테이블 기반의 전송 모드 선택 방안은 기존의 한 홉 혹은 두 홉만을 사용하는 스케줄링 방안 대비 계산 복잡도의 증가는 없음을 확인할 수 있다.

표 1. 전송 모드 선택을 위한 검색 표 (단계 1)

N	$\bar{\gamma}_{bm}$ (dB)	$\bar{\gamma}_{rm}$ (dB)	$\bar{\gamma}_{br}$ (dB)	전송 모드
1-30	20	30/20/10	30	한 홉
1-4	10	30	30	두 홉
5-30	10	30	30	한 홉
1-30	10	20/10	30	한 홉
1-30	0	30/20/10	30	두 홉
1-30	20	30/20/10	20	한 홉
1-30	10	30/20/10	20	한 홉
1-30	0	30/20	20	두 홉
1-16	0	10	20	두 홉
17-30	0	10	20	한 홉

4.1 한 홉 전송

신호 모델 (1)로부터, 한 홉 전송을 수행할 경우 다중 사용자 스케줄링의 평균 achievable rate C_1 은 다음과 같다.

$$C_1 = E[\log_2(1 + SNR_{1,\max})] \quad (6)$$

여기에서 $SNR_{1,\max} = \max_{n=1, \dots, N}\{\bar{\gamma}_{bm}|h_{bm,n}|^2\}$ 이다. 다음의 lemma는 식 (6)의 닫힘 꼴 표현을 보여준다.

Lemma 1: 한 홉 전송 시 다중 사용자 스케줄링의 평균 achievable rate, 즉, (6)의 평균 achievable rate C_1 의 닫힘 꼴은 다음과 같이 표현된다.^[17]

$$C_1 = \frac{N}{\ln(2)} \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^n \binom{N-1}{n} \frac{e^{(n+1)/\bar{\gamma}_{bm}}}{n+1} E_1\left(\frac{n+1}{\bar{\gamma}_{bm}}\right) \quad (7)$$

여기에서 $\bar{\gamma}_{bm} = \frac{P_b}{\sigma_m^2}$ 이고, $E_1(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt$ 는

exponential integral 함수이다.

증명: 식 (6)에서 random variable $SNR_{1,\max}$ 의 확률 밀도 함수 $p_{\gamma_{bm,\max}}(x)$ 는 다음과 같다.

$$p_{\gamma_{bm,\max}}(x) = \frac{N}{\gamma_{bm}} e^{-x/\gamma_{bm}} (1 - e^{-x/\gamma_{bm}})^{N-1} = \frac{N}{\gamma_{bm}} \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^n \binom{N-1}{n} e^{-(n+1)x/\gamma_{bm}} \quad (8)$$

여기에서 식 (8)의 첫 번째 등호는 exponential random variable의 order statistic^[18]로부터 유도되고, 두 번째 등호는 binomial 정리를 이용하여 유도된다. 식 (8)을 (6)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$C_1 = \frac{N}{\ln(2)\bar{\gamma}_{bm}} \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^n \binom{N-1}{n} \times \int_{x=0}^{\infty} \ln(1+x) e^{-(n+1)x/\bar{\gamma}_{bm}} dx \quad (9)$$

식 (9)에서 참고문헌^[20]의 식 (4.337.2)를 적용하면 (7)의 닫힘 꼴이 유도된다. ■

평균 achievable rate C_1 의 닫힘 꼴 표현은 BS-MS 평균 SNR $\bar{\gamma}_{bm}$ 과 MS의 수 N 으로 표현된다. N 이 무수히 클 경우 참고문헌^[8]의 결과를 사용하여 (7)에서의 평균 achievable rate C_1 은 높은 확률로 다음과 같이 점근적으로 근사화 할 수 있다.

$$C_1 \approx \log_2(1 + \bar{\gamma}_{bm} \ln(N)) \quad (10)$$

식 (10)을 살펴보면 C_1 은 MS의 수 N 에 따라 증가하는 함수임을 확인 할 수 있는데, 이것은 한 홉 다중 사용자 스케줄링의 경우 $\bar{\gamma}_{bm}$ 에 관계없이 항상 다중 사용자 diversity gain을 얻는다는 것을 의미한다.

4.2 두 홉 전송

신호 모델 (2)로부터, 두 홉 전송을 할 경우 다중 사용자 스케줄링의 평균 achievable rate C_2 는 다음과 같다.

$$C_2 = E \left[\frac{1}{2} \log_2(1 + SNR_{2,\max}) \right] \quad (11)$$

여기에서

$$SNR_{2,\max} = \max_{n=1,\dots,N} \left\{ \frac{\gamma_{br}\gamma_{rm,n}}{\gamma_{br} + \gamma_{rm,n} + 1} \right\} \quad (12)$$

이고 $\gamma_{br} = \bar{\gamma}_{br}|h_{br}|^2$, $\gamma_{rm,n} = \bar{\gamma}_{rm}|h_{r,m,n}|^2$ 이다. 식 (12)의 오른쪽 수식은 $\gamma_{rm,n}$ 에 대하여 단조 증가 함수이고 이는 다음의 lemma에서 증명된다.

Lemma 2: 함수

$$f(\gamma_{rm,n}) = \frac{\gamma_{br}\gamma_{rm,n}}{\gamma_{br} + \gamma_{rm,n} + 1} \quad (13)$$

은 $\gamma_{rm,n}$ 에 대하여 단조 증가 함수이다.

증명: 식 (13)을 $\gamma_{rm,n}$ 에 대하여 한 번 미분하면 다

음과 같다.

$$\frac{\partial f(\gamma_{rm,n})}{\partial \gamma_{rm,n}} = \frac{\gamma_{br}(1 + \gamma_{br})}{(\gamma_{br} + \gamma_{rm,n} + 1)^2} \quad (14)$$

이 때 식 (14)는 항상 양수 값을 가지므로 (12)은 단조 증가 함수이다. ■

Lemma 2와 식 (12)을 이용하면 식 (11)는 다음과 같이 다시 표현될 수 있다.

$$C_2 = E \left[\frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_{br} \max_{n=1,\dots,N} \{\gamma_{rm,n}\}}{\gamma_{br} + \max_{n=1,\dots,N} \{\gamma_{rm,n}\} + 1} \right) \right] \quad (15)$$

이제 평균 achievable rate C_2 의 닫힘 꼴은 다음 proposition에서 보여 진다.

Proposition 1: 두 홉 전송 시 다중 사용자 스케줄링의 평균 achievable rate, 즉, (15)의 평균 achievable rate C_2 의 닫힘 꼴은 다음과 같이 표현된다.

$$C_2 = \frac{N}{2\ln(2)\bar{\gamma}_{br}\bar{\gamma}_{rm}} \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^n \binom{N-1}{n} \times \begin{cases} \frac{e^{1/\bar{\gamma}_{br}} E_1\left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{br}}\right) - \frac{(n+1)e^{(n+1)/\bar{\gamma}_{rm}} E_1\left(\frac{n+1}{\bar{\gamma}_{rm}}\right)}{\bar{\gamma}_{br}}}{\frac{n+1}{\bar{\gamma}_{br}\bar{\gamma}_{rm}} \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{br}} - \frac{n+1}{\bar{\gamma}_{rm}}\right)}, & \text{if } \frac{1}{\bar{\gamma}_{br}} \neq \frac{n+1}{\bar{\gamma}_{rm}} \\ \frac{\gamma_{br}^2}{\bar{\gamma}_{br}} \left(-1 + \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{br}} + 1\right)\right) e^{1/\bar{\gamma}_{br}} E_1\left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{br}}\right), & \text{if } \frac{1}{\bar{\gamma}_{br}} = \frac{n+1}{\bar{\gamma}_{rm}} \end{cases} \quad (16)$$

여기에서 $\bar{\gamma}_{br} = \frac{P_b}{\sigma_r^2}$ 이고 $\bar{\gamma}_{rm} = \frac{P_r}{\sigma_m^2}$ 이다.

증명: 식 (15)에서 random variable γ_{br} 의 확률 밀도 함수 $p_{\gamma_{br}}(x)$ 는 exponential 함수로 주어지고 다음과 같이 표현된다.

$$p_{\gamma_{br}}(x) = \frac{1}{\gamma_{br}} e^{-x/\gamma_{br}} \quad (17)$$

또한 random variable $\gamma_{rm,\max} (\max_{n=1,\dots,N} \{\gamma_{rm,n}\})$ 의 확률 밀도 함수 $p_{\gamma_{rm,\max}}(y)$ 는 다음과 같다.

$$p_{\gamma_{rm,\max}}(y) = \frac{N}{\gamma_{rm}} e^{-y/\bar{\gamma}_{rm}} (1 - e^{-y/\bar{\gamma}_{rm}})^{N-1} = \frac{N}{\gamma_{rm}} \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^n \binom{N-1}{n} e^{-(n+1)y/\bar{\gamma}_{rm}} \quad (18)$$

여기에서 식 (18)의 첫 번째 등호는 exponential random variable의 order statistic^[18]으로부터 유도되고, 두 번째 등호는 binomial 정리로부터 유도된다. 식 (17)와 (18)을 (15)에 대입 후 (15)을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$C_2 = \frac{N}{2 \ln(2) \bar{\gamma}_{br} \bar{\gamma}_{rm}^n} \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^n \binom{N-1}{n} \times \underbrace{\int_{x=0}^{\infty} \int_{y=0}^{\infty} \ln \left(1 + \frac{xy}{x+y+1} \right) e^{-x/\bar{\gamma}_{br}} e^{-(n+1)y/\bar{\gamma}_{rm}} dx dy}_{J} \quad (19)$$

식 (19)에서 J 는 참고문헌^[19]의 식 (4.337.2)를 적용하면 다음과 같이 표현된다.

$$J = \bar{\gamma}_{br} \int_{y=0}^{\infty} \left(e^{1/\bar{\gamma}_{br}} E_1 \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{br}} \right) - e^{(1+y)/\bar{\gamma}_{br}} E_1 \left(\frac{1+y}{\bar{\gamma}_{br}} \right) \right) e^{-(n+1)y/\bar{\gamma}_{rm}} dy \quad (20)$$

여기에서 식 (20)에서 보이는 적분을 수행하기 위해 다음의 두 가지 경우를 고려한다. 첫째로 $\frac{1}{\bar{\gamma}_{br}} \neq \frac{n+1}{\bar{\gamma}_{rm}}$ 이면 부분 적분을 사용함으로써 (16)의 첫 번째 단함 꼴을 유도할 수 있다. 둘째로 $\frac{1}{\bar{\gamma}_{br}} = \frac{n+1}{\bar{\gamma}_{rm}}$ 이면 부분 적분과 참고문헌^[19]의 식 (6.221)을 사용함으로써 (16)의 두 번째 단함 꼴을 유도할 수 있다. 즉, 최종적으로 식 (16)를 얻을 수 있다. ■

다음의 proposition에서는 MS의 수 N 이 매우 클 경우 평균 achievable rate C_2 의 점근적인 결과 식이 보여 진다.

Proposition 2: MS의 수 N 이 충분히 크고 RS-MS 평균 SNR이 N 의 함수로 스케일 되지 않으면, 두 홉 전송 시 다중 사용자 스케줄링의 평균 achievable rate C_2 는 다음과 같이 근사화 된다.⁴⁾

$$C_2 \approx \begin{cases} \frac{e^{1/\bar{\gamma}_{br}} E_1 \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{br}} \right)}{2 \ln(2)}, & \text{if } \bar{\gamma}_{br} = o(\ln(N)) \\ \frac{1}{2} \log_2 (1 + \bar{\gamma}_{rm} \ln(N)), & \text{if } \ln(N) = o(\bar{\gamma}_{br}) \end{cases} \quad (21)$$

4) Proposition 2에서는 다음의 표기법을 사용하였다. $f(x) = o(g(x))$ 는 $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{g(x)} = 0$ 을 의미 한다. 반면, $f(x) = O(g(x))$ 는 모든 $x > c$ 에 대하여 $f(x) \leq Cg(x)$ 가 되는 상수 C 와 c 가 존재함을 의미한다^[20].

증명: 만약 N 이 충분히 클 경우, exponential random variable의 최대 값, 즉, $\max_{n=1, \dots, N} \{|h_{rm,n}|^2\}$ 은 $\ln(N)$ 으로 스케일하게 된다^[8]. 이 결과를 식 (15)에 적용하면, (15)은 다음과 같이 근사화 된다.

$$C_2 \approx E \left[\frac{1}{2} \log_2 (1 + SNR'_{2,\max}) \right] \quad (22)$$

여기에서 $SNR'_{2,\max} = \frac{\bar{\gamma}_{br} \bar{\gamma}_{rm} \ln(N)}{\bar{\gamma}_{br} + \bar{\gamma}_{rm} \ln(N) + 1}$ 이다.

이 때 $\bar{\gamma}_{br}$ 와 $o(\ln(N))$ 의 크기 관계에 따라 $SNR'_{2,\max}$ 의 근사화를 더 수행할 수 있다. 구체적으로 먼저 $\bar{\gamma}_{br} = o(\ln(N))$ 인 경우, $SNR'_{2,\max}$ 는 다음과 같이 근사화 된다.

$$SNR'_{2,\max} \approx \frac{\bar{\gamma}_{br} \bar{\gamma}_{rm}}{\bar{\gamma}_{br} / \ln(N) + \bar{\gamma}_{rm} + 1 / \ln(N)} \approx \bar{\gamma}_{br} \quad (23)$$

여기서 조건 $\bar{\gamma}_{br} = o(\ln(N))$ 으로부터 $\bar{\gamma}_{br} / \ln(N) \approx 0$ 이고 $1 / \ln(N) \approx 0$ 이므로, 식 (23)의 근사화가 성립하게 된다. 식 (23)을 (22)에 대입하면 (22)은 다음과 같이 더욱 근사화 된다.

$$C_2 \approx E \left[\frac{1}{2} \log_2 (1 + \bar{\gamma}_{br}) \right] = \frac{1}{2} \int_{x=0}^{\infty} \log_2 (1+x) \frac{1}{\bar{\gamma}_{br}} e^{-x/\bar{\gamma}_{br}} dx \quad (24)$$

그러므로, 식 (24)에서 보이는 적분을 풀면 (21)의 첫 번째 근사화된 단함 꼴이 유도된다. 둘째로 $\ln(N) = o(\bar{\gamma}_{br})$ 인 경우, $SNR'_{2,\max}$ 은 다음과 같이 근사화 된다.

$$SNR'_{2,\max} \approx \frac{|h_{br}|^2 \bar{\gamma}_{rm} \ln(N)}{|h_{br}|^2 + \bar{\gamma}_{rm} \ln(N) / \bar{\gamma}_{br} + 1 / \bar{\gamma}_{br}} \approx \bar{\gamma}_{rm} \ln(N) \quad (25)$$

여기서 조건 $\ln(N) = o(\bar{\gamma}_{br})$ 로부터 $\ln(N) / \bar{\gamma}_{br} \approx 0$ 이고 $1 / \bar{\gamma}_{br} \approx 0$ 이므로, 식 (25)의 두 번째 근사화가 성립하게 된다. 식 (25)을 (22)에 대입하면 (21)의 두 번째 식이 유도된다. 따라서 최종적으로 식 (21)를 얻을 수 있다. ■

두 홉 다중 사용자 스케줄링의 경우, 평균 achievable rate C_2 의 점근적인 근사식 (21)에서 확인할 수 있듯이 MS의 수 N 이 커지더라도 링크 상황에 따라 다중 사용자 diversity gain을 얻거나 혹은 얻지 못할 수 있는 두 가지 영역이 존재한다. 즉, 식 (21)에서 확인할 수 있듯이 $\bar{\gamma}_{br} = o(\ln(N))$ 이면 diversity gain 획득이 불가능하지만, $\ln(N) = O(\bar{\gamma}_{br})$ 인 경우 diversity gain이 존재한다. 반면, 한 홉 다중 사용자 스케줄링의 경우, 식 (10)과 같이 MS의 수 N 이 커짐에 따라 다중 사용자 diversity gain으로 인하여 항상 평균 achievable rate C_1 이 증가하는 경향을 보인다. 만약 N 이 증가함에 따라 BS에서 RS까지 (BS-RS) 평균 SNR $\bar{\gamma}_{br}$ 가 N 의 함수로 스케일하지 않으면, 즉, 식 (21)의 첫 번째 조건 $\bar{\gamma}_{br} = o(\ln(N))$ 일 경우에는, 두 홉 다중 사용자 스케줄링의 성능은 (21)의 첫 번째 식의 값으로 수렴한다. 이 경우에는 모든 MS가 채널 상태를 피드백 하더라도 diversity gain이 존재하지 않기 때문에 성능의 이득이 없게 된다. 만약 N 이 증가함에 따라 BS-RS 평균 SNR $\bar{\gamma}_{br}$ 가 N 의 함수로 스케일하거나 또는 $\bar{\gamma}_{br}$ 가 N 의 증가량 보다 월등히 클 때, 즉, 식 (21)의 두 번째 조건 $\ln(N) = O(\bar{\gamma}_{br})$ 일 경우에는, 두 홉 다중 사용자 스케줄링의 성능은 (21)의 두 번째 식과 같이 N 에 따라 증가하게 된다. 이는 두 홉 다중 사용자 스케줄링 수행 시 식 (10)에서 보인 한 홉 전송의 경우와 동일하게 다중 사용자 diversity gain을 얻음을 의미한다.

4.3 수정된 다중 사용자 스케줄링

본 절에서는 두 홉 다중 사용자 스케줄링 성능의 점근적인 근사화로부터 유도된 결과 식 (21)에 기반하여 특정 링크 조건에서 피드백 양을 더욱 줄이는 스케줄링 기법을 제안한다. 단계 1은 기 제안한 방법과 동일하고 단계 2는 다음과 같이 수정될 수 있다.

단계 2. 사용자 선택

만약 단계 1에서 선택된 전송 모드 \hat{i} 이 1인 경우, BS는 모든 MS에게 BS-MS 순간 SNR을 피드백 하도록 요청한다. 만약 단계 1에서 선택된 전송 모드 \hat{i} 이 2인 경우, 다음과 같은 피드백 방식을 제안한다.

- 만약 $\bar{\gamma}_{br} = o(\ln(N))$ 이면, BS는 $m \in \{1, \dots, N\}$ 명의 임의로 선택된 MS에 대하여 BS-RS-MS 순간 SNR 피드백을 요청한다. 여기서 m 은 상향링크

크의 피드백 양 제약 조건과 시스템 성능의 관계로 정한다. Proposition 1에서 유도된 두 홉 전송 다중 사용자 스케줄링의 평균 achievable rate 닫힘 꼴을 이용하여 피드백 사용자 수 m 에 따른 성능을 분석하고, 증가하는 피드백 양에 비해 성능의 증가 폭이 거의 없게 되는 영역에서 변수 $m \in \{1, \dots, N\}$ 을 결정한다.

- 만약 $\ln(N) = O(\bar{\gamma}_{br})$ 이면, BS는 모든 MS에게 BS-RS-MS 순간 SNR 피드백을 요청한다.

두 홉 다중 사용자 스케줄링 사용 시 $\bar{\gamma}_{br} = o(\ln(N))$ 일 경우에는 diversity gain을 얻지 못하므로 모든 MS에 대한 순간 SNR 피드백은 성능에 도움을 주지 못한다. V장에서는 $\bar{\gamma}_{br} = o(\ln(N))$ 인 조건에서 충분히 작은 m 개의 MS가 피드백 하는 경우와 모든 MS가 피드백 하는 경우가 거의 비슷한 성능을 나타냄을 모의실험을 통하여 보인다.

V. 모의실험 결과

본 장에서는 앞서 언급한 전송 기술에 대한 평균 achievable rate 유도를 검증하고, 제안한 스케줄링 방법의 장점을 보이기 위해 컴퓨터 모의실험을 수행한다. 모의 실험 환경은 다음과 같다. BS-RS 평균 SNR은 $\bar{\gamma}_{br}$, BS-MS 평균 SNR은 $\bar{\gamma}_{bm}$ 으로 N 개의 MS에 대해 모두 동일하고, 또한 RS-MS 평균 SNR은 $\bar{\gamma}_{rm}$ 으로 N 개의 MS에 대해 모두 동일하다고 가정한다.⁵⁾ BS-RS, BS-MS, RS-MS 채널은 i.i.d. Rayleigh 분포를 따른다.

그림 2에서는 한 홉 또는 두 홉 전송에 대해 다중 사용자 스케줄링을 사용할 때 MS의 수 N 대비 평균 achievable rate이 보여진다. 모의실험은 다양한 SNR 값에 대해 수행된다. BS-RS 평균 SNR $\bar{\gamma}_{br}$ 는 30dB, BS-MS 평균 SNR $\bar{\gamma}_{bm}$ 는 10, 0dB, 그리고 RS-MS 평균 SNR $\bar{\gamma}_{rm}$ 는 30, 20, 10dB로 가정한다. 제안한 두 단계 다중 사용자 스케줄링의 결과는 한 홉 또는 두 홉 전송에 대해 도시된 두 개 곡선의 가장 바깥 경계선을 따른다. $\bar{\gamma}_{bm} = 10\text{dB}$, $\bar{\gamma}_{rm} = 30\text{dB}$, $N=1$ 인 경우, 두 홉 전송 시 평균 achievable rate은 한 홉 전송에서보다 더 높음을 알 수 있다. 그러나 N 이 증가할

5) 평균 SNR은 경로 손실을 포함하는 값을 나타낸다. 본 논문에서는 간결화를 위하여 송수신 거리에 따른 경로 손실 관계를 구체적으로 명시하지는 않았다.

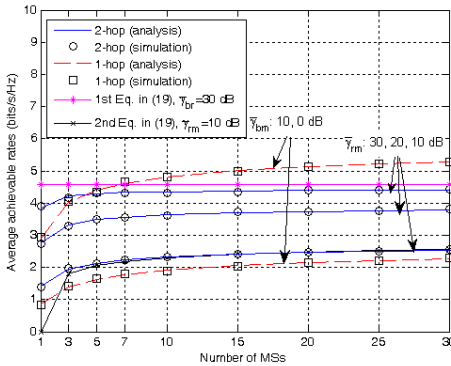


그림 2. BS-RS 평균 SNR이 30dB인 경우 ($\bar{\gamma}_{br}=30$ dB), MS의 수 N 에 대한 평균 achievable rate 비교

수록 더 많은 다중 사용자 diversity gain의 영향으로 한 홉 전송의 경우 더 높은 rate을 얻게 된다. 그림 2에서는 한 홉 및 두 홉 전송의 평균 achievable rate의 닫힘 꼴 결과인 수식 (7)과 (16)를 도출하였다. 모든 평균 SNR과 MS의 수 N 에 대하여 닫힘 꼴 표현 (7)과 (16)는 각각 모의실험 결과와 동일함을 확인할 수 있다. 또한 유도된 두 홉 다중 사용자 스케줄링의 평균 achievable rate의 점근적인 경향을 나타내는 식 (21)를 검증한다. 식 (21)의 첫 번째 수식을 이용하면 평균 achievable rate은 4.5로 주어지고, $\bar{\gamma}_{rm}=10$ dB인 경우에 (21)에서의 두 번째 수식 역시 그림 2에 도시되었다. $\bar{\gamma}_{rm}=30$ dB에 대해 N 이 10을 넘어 증가하는 경우, 실험 결과가 점근적으로 4.5로 접근하는 것을 확인할 수 있고, 이는 앞서 유도한 점근적인 결과식과 실험값이 잘 일치하는 것을 의미한다. 이 때 $m=10$ 명의 임의로 선택된 MS로부터 피드백을 받아 다중 사용자 스케줄링을 수행할 때의 성능은 10명 이상의 MS가 피드백 하여 스케줄링을 하는 경우와 거의 동일함을 확인할 수 있다. 또한 식 (21)의 두 번째 식은 $\bar{\gamma}_{rm}=10$ dB이고 $N \geq 5$ 인 경우 두 홉 전송에 대한 모의실험 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

뿐만 아니라, 제안하는 두 단계 스케줄링의 성능을 검증하기 위해, 모든 한 홉 및 두 홉의 순간 SNR을 피드백하여 전송 모드와 최적 MS를 동시에 결정하는 최적 다중 사용자 스케줄링의 평균 achievable rate과의 비교를 수행한다. 그림 3은 $\bar{\gamma}_{br}=30$ dB, $\bar{\gamma}_{rm}=30$ dB, $\bar{\gamma}_{bm}=10$ dB인 경우 MS의 수에 따른 평균 achievable rate을 나타낸다. 제안한 두 단계 스케줄링은 한 홉 또는 두 홉 전송에 대한 두 곡선의 가장 바깥 경계선을 따르게 되므로, 특히 두 곡선이 만나는

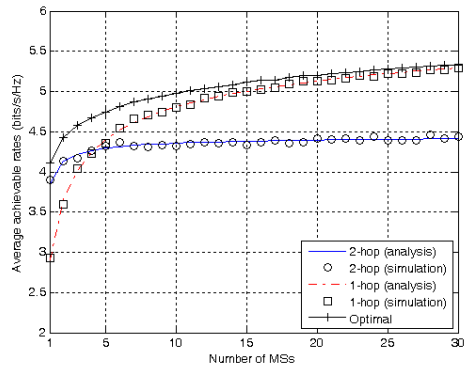


그림 3. BS-RS, RS-MS, 그리고 BS-MS의 평균 SNR이 각각 30dB, 30dB, 그리고 10dB인 경우, 제안하는 다중 사용자 스케줄링 방안과 최적 스케줄링 방안의 achievable rate 성능 비교

교차점 부근에서 최적 스케줄링 대비 약간의 성능 열화를 보이게 된다. 그러나 제안하는 두 단계 스케줄링 방안은 전송 모드 결정시 BS-RS, BS-MS, 그리고 RS-MS 평균 SNR 정보만 피드백하고 최적 MS 결정시 결정된 전송 모드와 관련된 순간 SNR을 피드백하기 때문에 최적 스케줄링 대비 피드백 양을 대략 반으로 줄일 수 있다는 장점이 있다. 제안한 방법은 한 홉 또는 두 홉 중 하나만을 사용하여 다중 사용자 스케줄링을 하는 방안에 비해 추가적인 BS-RS, BS-MS, 그리고 RS-MS 평균 SNR 정보 피드백으로 항상 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

다중 사용자 AF relay 시스템에서 두 단계로 전송 모드와 적절한 MS를 선택하는 다중 사용자 스케줄링 방법이 제안되었다. 또한 제안하는 기회적 스케줄링 방안에 대한 평균 achievable rate의 닫힘 꼴 표현을 유도하였고 MS의 수 N 이 큰 경우에 대한 점근적인 표현을 보임으로써 효율적으로 감소된 피드백 정보에 기반한 스케줄링 기준을 설계하였다. 두 홉 다중 사용자 스케줄링 하에서 다중 사용자 diversity gain을 최대로 얻는 링크 조건도 분석하였고, 또한 특정 조건 하에 피드백 양을 더욱 줄이기 위해 수정된 스케줄링 방안을 제안하였다. 마지막으로 제안한 스케줄링 방안을 최적 스케줄링 방안과 비교하였고, 평균 achievable

- 6) 본 논문에서는 보이지 않았지만, 특정 링크 조건에서 두 곡선 사이에 교차점이 존재하지 않는 경우, 제안한 기술은 최적 기술과 동일한 성능을 보이게 된다.
- 7) 평균 SNR 정보는 순간 SNR 정보 대비 크게 변하지 않으므로 피드백량의 증가량은 작다.

rate이 거의 동일함을 확인하였다. 반면, 제안 기법에서 요구되는 피드백은 최적 기법에 비해 절단 이하로 줄어들었음을 확인하였다. 이 분야에서의 추가 연구는 제안한 두 단계 기회적 스케줄링 기술을 직교주파수 분할다중화 (orthogonal frequency division multiplexing)와 같은 다중 캐리어 시스템으로 확장하는 일이다.

참 고 문 헌

- [1] R. Pabst, B. H. Walke, D. C. Schultz, P. Herhold, H. Yanikomeroglu, S. Mukherjee, H. Viswanathan, M. Lott, W. Zirwas, M. Dohler, H. Aghvami, D. D. Falconer, and G. P. Fettweis, "Relay-based deployment concepts for wireless and mobile broadband radio," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.42, pp.80-89, Sep. 2004.
- [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, pp.3062-3080, Dec. 2004.
- [3] P. A. Anghel and M. Kaveh, "On the performance of distributed space-time coding systems with one and two non-regenerative relays," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.5, pp.682-692, Mar. 2006.
- [4] Y. Jing and B. Hassibi, "Distributed space-time coding in wireless relay networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.5, pp.3524-3536, Dec. 2006.
- [5] Y. Zhao, R. Adve, and T. J. Lim, "Improving amplify-and-forward relay networks: Optimal power allocation versus selection," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.6, pp.3114-3123, Aug. 2007.
- [6] B. Rankov and A. Wittneben, "Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.25, pp.379-389, Feb. 2007.
- [7] R. Knopp and P. Humblet, "Information capacity and power control in single cell multiuser communications," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Seattle, WA, Jun. 1995, pp.331-335.
- [8] P. Viswanath, D. N. C. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.48, pp.1277-1294, Jun. 2002.
- [9] M. Sharif and B. Hassibi, "On the capacity of MIMO broadcast channels with partial side information," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.51, pp.506-522, Feb. 2005.
- [10] W.-Y. Shin, S.-Y. Chung, and Y. H. Lee, "Improved power-delay trade-off in wireless networks using opportunistic routing," *IEEE Trans. Inf. Theory*, under review for possible publication, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/0907.2455>.
- [11] C. Shen and M. P. Fitz, "Opportunistic spatial orthogonalization and its application to fading cognitive radio networks," preprint, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/0904.4283>.
- [12] O. Oyman, "Opportunistic scheduling and spectrum reuse in relay-based cellular networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.9, pp.1074-1085, Mar. 2010.
- [13] G. Kramer, M. Gastpar, and P. Gupta, "Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol.51, No.9, pp.3037-3063, Sep. 2005.
- [14] A. Reznik, S. Kulnarni, and S. Verdu, "Broadcast-relay channel: capacity region bounds," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, Adelaide, Australia, Sep. 2005, pp.820-824.
- [15] 3Gpp.(2010, Mar.) Further advancements for EUTRA: Physical layer aspect. TR 36.814 V2.0.1 Tech. Spec.n Group Radio Access Network Rel. 9 3GPP.
- [16] S. T. Chung and A. J. Goldsmith, "Degrees of freedom in adaptive modulation: A unified view," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.49, pp.1561-1571, Sep. 2001.
- [17] M.-S. Alouini and A. J. Goldsmith, "Capacity of Rayleigh fading channels under different adaptive transmission and diversity-combining techniques," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol.48, pp.1165-1181, Jul. 1999.

[18] A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*. 4th edition, McGraw-Hill, 2002.

[19] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*. 7th edition, Academic Press, 2007.


[20] D. E. Knuth, "Big Omicron and big Omega and big Theta," *ACM SIGACT News*, Vol.8, pp.18-24, Apr.-Jun. 1976.

김 아 정 (Ajung Kim) 중신회원
 1988년 2월 서울대학교 물리학과 학사
 1994년 7월 Northwestern University 석사
 1996년 12월 Northwestern University 박사
 1997년 1월~12월 Northwestern University Postdoctoral Fellow
 1998년 1월~4월 Motorola Center for Telecom. Northwestern University Associate Researcher
 1998년 4월~2003년 2월 삼성전자 종합기술원 전문연구원
 2008년 12월~2010년 8월 Harvard University 방문교수
 2003년 3월~현재 세종대학교 전자정보통신공학부 교수
 <관심분야> 정보이론, 광통신, 광대역통신, 정보보안

장 용 업 (Yong-Up Jang) 정회원

 2003년 2월 한양대학교 전자전기공학부 학사
 2010년 1월 KAIST 전기및전자공학과 박사
 2010년 3월~8월 : KAIST 정보전자연구소 박사후연구원
 2010년 9월~현재 KAIST IT 융합연구소 선임연구원

<관심분야> 협력 릴레이 네트워크, Cognitive radio 네트워크, 다중사용자 MIMO 스케줄링, Limited 피드백 무선 통신 네트워크

신 원 용 (Won-Yong Shin) 정회원

 2002년 2월 연세대학교 기계전자공학부 학사
 2004년 2월 KAIST 전자전산학과 석사
 2008년 8월 KAIST 전자전산학부 박사
 2008년 2월~4월 Harvard University 방문연구원

2008년 9월~2009년 2월 KAIST BK 정보전자연구소 박사후연구원
 2009년 3월~4월 KAIST 고성능집적시스템연구센터 선임급 위촉연구원
 2008년 8월~2009년 4월 (주)루미콤 방문연구원
 2009년 5월~현재 Harvard University Postdoctoral Fellow
 <관심분야> 정보이론, 통신이론, 신호처리, 해양 IT 관련 학제 간 융합연구