

논문 2009-46TC-2-2

재생 OFDMA 중계 네트워크에서의 공평한 중계기 선택

(Fair Relay Selection in Regenerative OFDMA Relay Network)

정 하 린*, 김 진 수**, 이 재 홍***

(Harin Jeong, Jinsu Kim, and Jae Hong Lee)

요 약

본 논문은 공평성 제한(fairness constraint)이 존재하는 재생(regenerative) 직교 주파수 분할 다중 접속 (OFDMA: Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 중계 네트워크(relay network)에서 새로운 적응 중계기 선택(adaptive relay selection) 기법을 제안한다. 제안된 기법에서 K 개의 중계기 중 시스템 용량(system capacity)을 최대화하는 M 개의 중계기를 선택한다. 선택된 중계기 사이에서는 공평성 제한을 만족하면서 시스템 성능 열화(system performance degradation)를 최소화 하도록 부반송파를 재할당(subcarrier reallocation)한다. 그런 다음 보다 향상된 성능을 얻기 위해 워터필링(water-filling) 방법을 통한 적응적 전력 할당이 이루어진다. 시스템 용량과 공평성 사이의 트레이드오프(trade-off) 관계를 이용하여 제안된 기법의 개선 방법 또한 연구되었다.

Abstract

This paper presents a new adaptive relay selection scheme for a regenerative orthogonal frequency division multiplexing access(OFDMA) relay network with fairness constrains. In the proposed scheme, we select the best M relays out of a set of K potential relays to maximize system capacity. Among these selected relays, subcarriers are reallocated to satisfy fairness constraints as well as to minimize the degradation of the system performance. Afterwards, power allocation is performed for each subcarrier based on the water-filling method to enhance the performance improvement. By using the trade-off relationship between the system capacity and the fairness, the modified version of proposed scheme is also investigated.

Keywords: 중계기 선택, 페이딩 채널, 직교 주파수 분할 다중 접속, 공평성, 재생 중계 네트워크

I. 서 론

사용자 중계 기법(user relaying scheme)은 무선 채널의 방송 특성(broadcasting nature)을 이용하여 가상 안테나 선열(virtual antenna array) 기반 공간 다이버시티(spatial diversity)를 얻는다^[1]. 공간 다이버시티 이득(gain)은 중계기 선택, 송신기와 중계기 간의 전력 배분 방식에 따라 변화하며 사용자 중계 통신 시스템의

성능을 결정한다^[2~3].

OFDMA 시스템에서 다중사용자 다이버시티 이득(multi-user diversity gain)을 얻기 위해서는 무선 채널의 주파수 선택적(frequency selective) 특성을 이용한 효율적 자원할당 기법이 필요하다.

적절한 중계기 선택과 전력 할당 전략이 전제된 경우, 사용자 중계 기법을 OFDMA 시스템과 결합하여 전송 용량 증대와 셀 반경 확장이 가능하다.

무선 네트워크에서 중계기의 불균형적인 활용은 네트워크 수명의 단축을 야기한다^[4]. 중계기 활용의 균형을 보장하기 위해서는 공평성 제한을 고려할 필요가 있다.

무선 중계 네트워크의 성능 향상을 위해 각 부반송파에 대한 최적 전력 할당 기법이 연구되었다^[5~6]. 이런 기존의 연구 결과를 이용하여 얻을 수 있는 성능향상

* 정희원, KIS 채권평가(주) 파생상품팀
(KIS Pricing Inc.)

** 학생회원, ** 정희원, 서울대학교 전기·컴퓨터공학부
(Seoul National University)

※ 이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(R01-2007-000-11844-0).

접수일자: 2008년11월3일, 수정완료일: 2009년2월17일

정도를 계산하는 것이 가능하다.

본 논문은 공평성 제한이 있는 재생 OFDMA 중계 네트워크에서 새로운 중계기 선택 기법에 관한 연구를 진행한다. 전체 시스템 전력 제한과 각 중계기들의 공평성 제한이 존재할 때, 시스템 용량을 최대화하는 중계기 선택과 각 부반송파 당 전력 할당 기법을 제안한다. 컴퓨터 모의실험을 통해 제안된 기법이 기존 기법들에 비해 높은 시스템 용량을 가지며, 전체 중계기 수가 증가함에 따라 다중 사용자 다이버시티 이득도 증가함을 확인한다.

본 논문의 나머지는 다음과 같이 구성되었다. II장에서는 시스템 모델을 기술한다. 새로운 적응적 중계기 선택 기법이 III장에서 제안되었다. 컴퓨터 모의실험 결과를 IV장에서 보인 다음, V장에서 결론은 맺는다.

II. 시스템 모델

하나의 소스, K 개의 가능 중계기들, 하나의 데스티네이션으로 구성된 재생 중계 네트워크를 고려한다. 소스와 데스티네이션 사이의 거리를 반지름으로 하고 소스를 중심으로 하는 원 내부에 K 개의 가능 중계기들이 균일하게 분포한다고 가정한다.

OFDMA 를 이용함으로써 네트워크의 단위 부반송파 당 무선 채널들은 주파수 평탄(frequency-flat)하다고 가정한다. n 번째 부반송파에서의 소스와 중계기 k , 중계기 k 와 데스티네이션 사이의 순간 채널 이득 계수를 각각 $h_{sk}^{(n)}$, $h_{kd}^{(n)}$ 라 한다.

중계기 전송의 반이중(half-duplex) 성질에 의해 네트워크의 전송 프레임은 같은 기간의 2개의 시 구간으로 나누어진다.

첫 번째 구간에서 소스는 n 번째 부반송파에 전력 $P_{sk}^{(n)}$ 을 사용하여 정보 데이터 $x^{(n)}$ 을 중계기 k 에게 전송한다. n 번째 부반송파에서 중계기 k 가 수신한 데이터 $r_k^{(n)}$ 은 다음과 같다.

$$r_k^{(n)} = h_{sk}^{(n)} x^{(n)} + n_k^{(n)} \quad (1)$$

여기에서 $n_k^{(n)}$ 은 n 번째 부반송파에서 분산 σ^2 을 갖는 독립 복소 가우시안 잡음이다.

두 번째 구간에서 중계기 k 는 n 번째 부반송파에 전력 $P_{kd}^{(n)}$ 을 사용하여 수신 데이터의 재생된 형태 $\widehat{x}^{(n)}$

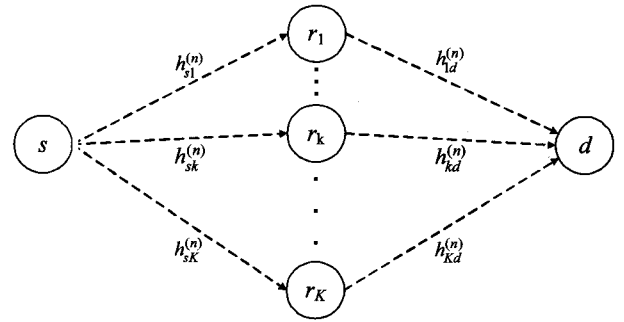


그림 1. 중계 네트워크 모형

Fig. 1. Relay network model.

을 데스티네이션에게 전송한다. n 번째 부반송파에서 데스티네이션이 수신한 데이터 $r_d^{(n)}$ 은 다음과 같다.

$$r_d^{(n)} = h_{kd}^{(n)} \widehat{x}^{(n)} + n_d^{(n)} \quad (2)$$

여기에서 $n_d^{(n)}$ 은 n 번째 부반송파에서의 분산 σ^2 을 갖는 독립 복소 가우시안 노이즈이다.

중계기 k 가 선택되었을 때 n 번째 부반송파에서의 중계 네트워크의 용량은 다음과 같다.

$$c_k^{(n)} = \frac{1}{2} \min \{ \log(1 + a_k^{(n)} p_{sk}^{(n)}), \log(1 + b_k^{(n)} p_{kd}^{(n)}) \} \quad (3)$$

여기에서 $a_k^{(n)} = \|h_{sk}^{(n)}\|^2 / \sigma^2$, $b_k^{(n)} = \|h_{kd}^{(n)}\|^2 / \sigma^2$ 이다.

중계 네트워크의 최대 용량을 달성 위해서는 각 부반송파에서 중계기 k 와 데스티네이션의 수신 신호 대 잡음비가 같아야 한다^[5].

소스와 중계기가 n 번째 부반송파에서 사용하는 전체 전력은 다음과 같다.

$$p^{(n)} = \sum_{k=1}^K \rho_k^{(n)} (P_{sk}^{(n)} + P_{kd}^{(n)}) \quad (4)$$

여기서 $\rho_k^{(n)}$ 는 n 번째 부반송파에서 중계기 k 의 선택 지시 변수이다 (즉, 중계기 k 를 n 번째 부반송파에 선택한 경우 $\rho_k^{(n)} = 1$, 그렇지 않은 경우 $\rho_k^{(n)} = 0$)^[3].

각 부반송파의 배타적 할당을 보장하기 위해 각 부반송파에서 오직 하나의 중계기만이 선택된다고 가정 한

다 (즉, $\sum_{k=1}^K \rho_k^{(n)} = 1, \forall n$).

최대 용량 조건과 부반송파의 배타적 할당 특성을 이

용하면 n 번째 부반송파에서 최대 시스템 용량은 다음과 같이 주어진다.

$$c^{*(n)} = \sum_{k=1}^n \rho_k^{(n)} c_k^{(n)} = c_{R^{(n)}}^{(n)} \quad (5)$$

$$= \frac{1}{2} \log_2(1 + \mu_{R^{(n)}}^{(n)} P^{(n)})$$

여기서 $R^{(n)}$ 은 n 번째 부반송파에서 선택된 중계기이고, $\mu_k^{(n)} = a_k^{(n)} b_k^{(n)} / (a_k^{(n)} + b_k^{(n)})$ 이다.

n 번째 부반송파에서 최대 시스템 용량이 $P^{(n)}$ 과 $R^{(n)}$ 에 의해 결정되는 것을 주목할 필요가 있다. 최적의 전송 전력 $P^{(n)}$ 역시 선택된 중계기 $R^{(n)}$ 의 채널 이득 계수에 의존한다는 것을 고려한다면^[5~7], 시스템 용량은 각 부반송파의 중계기 선택에 의해 좌우된다.

III. 공평한 중계기 선택

1. 제안된 공평한 중계기 선택 기법 (ARSF)

가. 첫 번째 단계 : 공평성 제한 없는 중계기 선택

제안된 중계기 선택 기법은 두 단계로 구성된다. 첫 번째 단계에서는 부반송파 간 일정 전력 할당 가정 하에 전체 시스템 용량을 최대화하도록 M 개의 중계기를 선택한다. 부반송파 n 의 중계기 선택 기준은 수식 (6) 과 같이 주어진다.

$$R^{(n)} = \arg \max_k (\mu_k^{(n)}) \quad (6)$$

그런 후, 선택 지시 함수를 다음과 같이 업데이트 한다.
: $\rho_{R^{(n)}}^{(n)} = 1$ 그리고 $\rho_k^{(n)} = 0 \quad \forall k \neq R^{(n)}$

수식 (6)에 의해 각각의 부반송파에 선택된 중계기들이 주어진 중계기들 분포에 대한 최대 시스템 용량을 달성하며, 제안된 중계기 선택 기법의 성능 상한을 의미함에 주목한다.

중계기 k 에 할당된 부반송파 수를 l_k 라 하고, 이는 수식 (7)과 같이 주어진다.

$$l_k = \sum_{n=1}^N \rho_k^{(n)} \quad (7)$$

전체 K 개의 중계기들 중에서 데이터를 전송하도록 선택된 중계기들의 수 M 은 다음 수식 (8)과 같이 계산된다.

$$M = \sum_{k=1}^K \eta_k \quad (8)$$

여기서 $\eta_k = \begin{cases} 0, & \text{if } l_k = 0, \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}$ 이다.

나. 두 번째 단계 : 부반송파 재 할당

두 번째 단계에서는 선택된 중계기 사이에서 공평성 제한을 만족하는 동시에 전체 시스템 용량 감소를 최소화 하도록 부반송파 재 할당이 이루어진다. 부반송파 n 에서 중계기 k_0 대신 중계기 k' 을 선택했을 때 야기되는 시스템 용량 감소의 비용 함수는 수식 (9) 와 같이 계산 될 수 있다^[8].

$$e_k^{(n)} = \frac{\mu_{k_0}^{(n)} - \mu_{k'}^{(n)}}{\mu_{k'}^{(n)}} \quad \forall n \quad (9)$$

위의 비용 함수는 n 과 k' 에 의존함을 주목한다.

중계기 k 가 선택된 모든 부반송파 지수들의 집합을 다음과 같이 정의된다.

$$S_k = \{n | \rho_k^{(n)} = 1, n = 1, \dots, N\} \quad (10)$$

재 할당되는 부반송파에 선택되어지는 것이 가능한 중계기들의 집합은 다음과 같이 정의된다.

$$\psi = \{k | l_k < l_k^{\max}, k = 1, \dots, M\} \quad (11)$$

여기에서 l_k^{\max} 는 중계기 k 에 할당될 수 있는 최대 부반송파수의 제한으로서 네트워크의 공평성 정도를 결정한다.

그러면 중계기 k_0 의 비용 함수를 최소화 하는 문제의 가능 해들의 집합(feasible set)은 다음 수식의 (12) 와 같이 주어진다.

$$F_{k_0} = \{(n, k') | n \in S_{k_0}, k' \in \psi\} \quad (12)$$

부반송파 재 할당에 의한 시스템 용량의 감소를 최소화 하여야만 준 최적해(suboptimal solution)를 얻을 수 있다.

가능 해들의 집합 F_{k_0} 의 원소들 중 비용 함수를 최소화 하는 (n^*, k^*) 을 다음 수식 (13)에 의해 얻어진다.

$$(n^*, k^*) = \arg \min_{(n, k) \in F_{k_0}} e_k^{(n)} \quad (13)$$

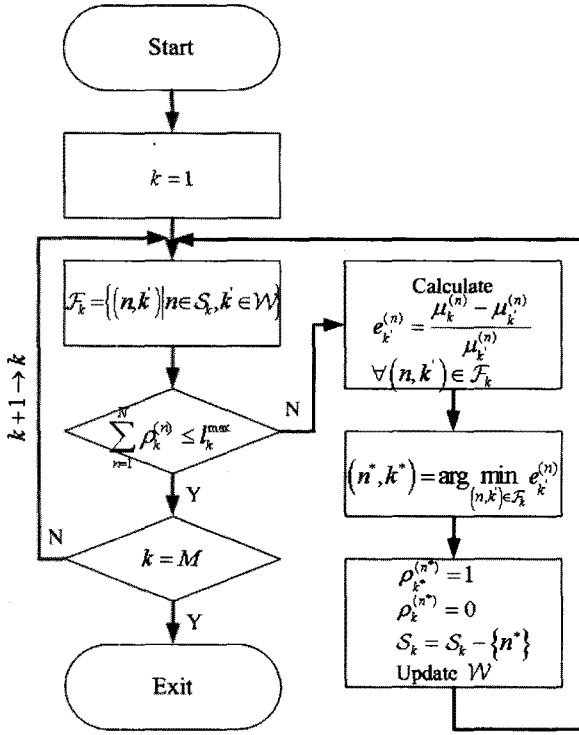


그림 2. 부반송파 재할당 기법의 흐름도
Fig. 2. Flow chart of subcarrier reallocation scheme.

그러면 n^* 번째 부반송파에 선택된 중계기 $R^{(n^*)}$ 은 k_0 대신에 k^* 이 되게 된다. 선택 지시 함수를 다음과 같이 업데이트 한다: $\rho_{R^{(n^*)}}^{(n^*)} = 1$ 그리고 $\rho_{k_0}^{(n^*)} = 0$

부반송파들은 M 개의 선택된 중계기들 모두가 공평성 제한을 만족할 때까지 재 할당 된다. 부반송파 재 할당 기법의 자세한 흐름도는 그림 2와 같다.

2. 전력 할당 기법

각각의 부반송파에 대한 중계기가 모두 선택된 다음에는 워터필링 (water-filling) 방법을 이용하여 부반송파에 전력이 할당된다.

n 번째 부반송파에 할당되는 총 전송 전력의 최적 해는 수식 (14) 같이 주어진다^[5].

$$P^{*(n)} = \left(\lambda - \frac{1}{\mu_{R^{(n)}}^{(n)}} \right)^+ \quad (14)$$

여기서 x^+ 은 $\max(0, x)$ 를 의미하고 λ 는 라그랑주 의 제곱수 (Lagrange Multiplier) 로 전체 전력 제한조건이 만족하도록 선택되어 진다.

n 번째 부반송파에 대한 소스와 중계기 각각의 전송 전력은 다음의 수식 (15), (16) 같이 계산된다.

$$P_{sk}^{*(n)} = \frac{b_k^{(n)}}{a_k^{(n)} + b_k^{(n)}} P^{*(n)} \quad (15)$$

$$P_{kd}^{*(n)} = \frac{a_k^{(n)}}{a_k^{(n)} + b_k^{(n)}} P^{*(n)} \quad (16)$$

3. 제안된 중계기 선택 기법의 개선 (Joint ARSF)
공평성 제한이 같은 경우, 선택된 중계기들의 수 M 이 클수록 보다 많은 다중사용자 다이버시티를 얻게 되어 향상된 시스템 성능을 가질 수 있다.

이를 바탕으로 1절에서 제안한 기법 (ARSF)의 개선된 기법 (Joint ARSF)이 연구되었다.

ARSF는 중계기 선택과 공평성 제한의 만족이 두 단계로 나누어 이루어지는 반면, Joint ARSF에서는 중계기 선택과 공평성 제한이 동시에 고려된다.

Joint ARSF에서도 ARSF와 같은 정도의 공평성을 보장하기 위해 각 중계기들은 1절에서와 동일한 I_k^{max} 를 가짐을 가정한다.

개선된 기법에서 n 번째 부반송파에 대한 중계기 선택의 다음 수식 (17) 과 같이 주어진다.

$$R_{joint}^{(n)} = \arg \max_{k \in \psi} (\mu_k^{(n)}) \quad (17)$$

여기에서 ψ 는 수식 (11) 로부터 구한다.

개선된 기법에서는 선택되는 총 중계기들 수가 ARSF의 그것보다 항상 크다는 점을 주목한다.

IV. 컴퓨터 모의실험 결과

네트워크의 주파수 선택적 채널들은 같은 크기를 갖는 4개의 독립적인 경로로 구성된다고 가정한다.

제안된 기법의 성능 비교를 위해 몬테카를로 모의실험법(Monte Carlo Method)을 사용하였다. 전체 부반송파 수 N 은 128, 소스와 테스트네이션의 거리는 1000 m, 경로 감수 계수는 4, 불능 확률(outage probability)을 계산하기 위한 주파수 효율(spectral efficiency) R 은 1 bps/Hz, 각 중계기에게 할당될 수 있는 최대 부반송파수의 제한은 $\lceil M/N \rceil$ 이라고 가정하였다.

그림 3은 전체 가능 중계기 수 K 가 100일 때 신호 대 잡음비(SNR)에 대한 불능 확률을 나타낸다. 10^{-3} 의 불능 확률에서 제안된 기법은 기존 기회 중계(opportunistic relaying) 기법에 비해 대략 2.5 dB 정도의 SNR 이득을

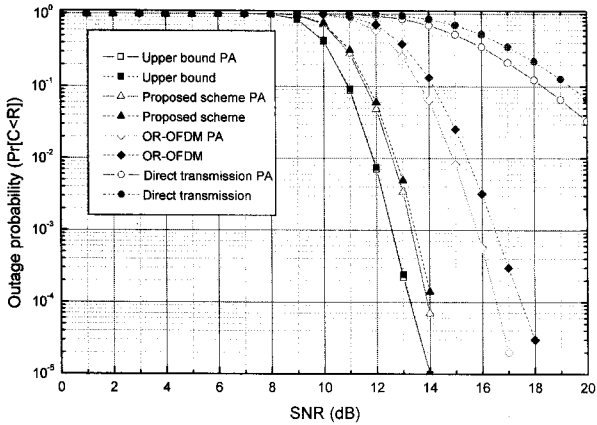


그림 3. 신호 대 잡음비에 대한 불능 확률. ($K=100$)
 Fig. 3. Outage probability vs. SNR ($K=100$).

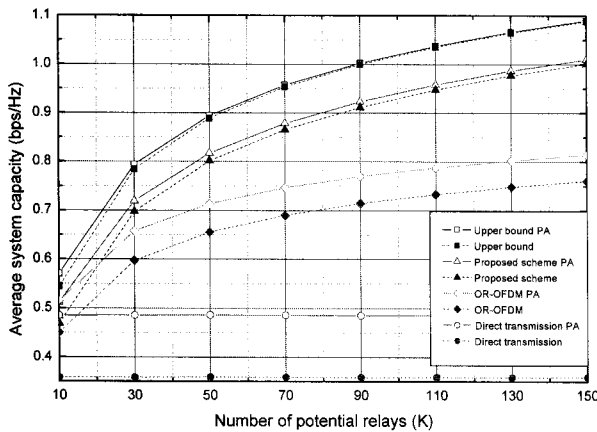


그림 4. 가능 중계기 수에 대한 부반송파 당 평균 시스템 용량 ($SNR=10$ dB)
 Fig. 4. Average system capacity vs. number of potential relays ($SNR=10$ dB).

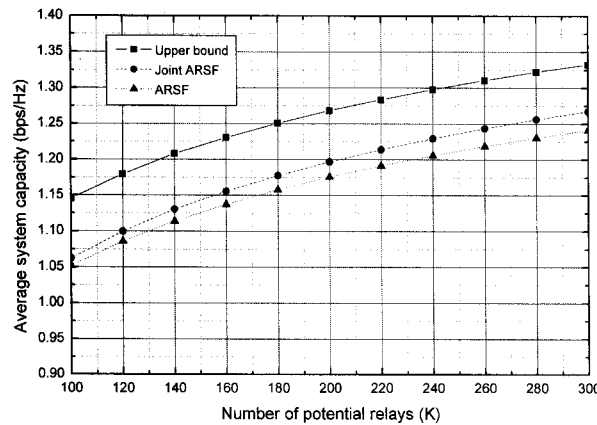


그림 5. ARSF와 Joint ARSF의 가능 중계기 수에 대한 부반송파 당 평균 시스템 용량 비교 ($SNR=11$ dB)
 Fig. 5. Average system capacity comparison of ARSF and Joint ARSF ($SNR=11$ dB).

가진다. 또한, 제안된 기법은 기회 중계 기법이나 직접 전송과는 달리 전력 할당 여부와 관계없이 거의 동일한 성능을 가짐을 확인 할 수 있다.

그림 4는 SNR이 10 dB 일 때 가능 중계기 수에 대한 부반송파 당 평균 시스템 용량을 나타낸다. 가능 중계기 수가 증가함에 따라 부반송파 당 평균 시스템 용량 또한 증가함을 볼 수 있다. 제안된 기법이 기회 중계 기법에 비해 보다 큰 곡선 기울기를 가짐을 보임으로써 보다 높은 다이버시티 이득을 제공함을 확인한다.

그림 5는 SNR이 11 dB 일 때 ARSF와 Joint ARSF의 가능 중계기 수에 대한 부반송파 당 평균 시스템용량 비교를 나타낸다. 모든 가능 중계기 수 범위에서 Joint ARSF가 ARSF에 비해 뛰어난 성능을 가진다. 이는 전

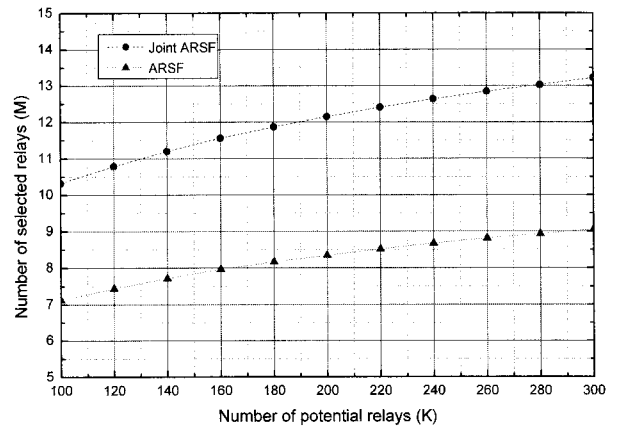


그림 6. ARSF 와 Joint ARSF 의 가능 중계기 수에 대한 선택된 중계기 수 비교 ($SNR=11$ dB)
 Fig. 6. Number of selected relays comparison of ARSF and Joint ARSF ($SNR=11$ dB).

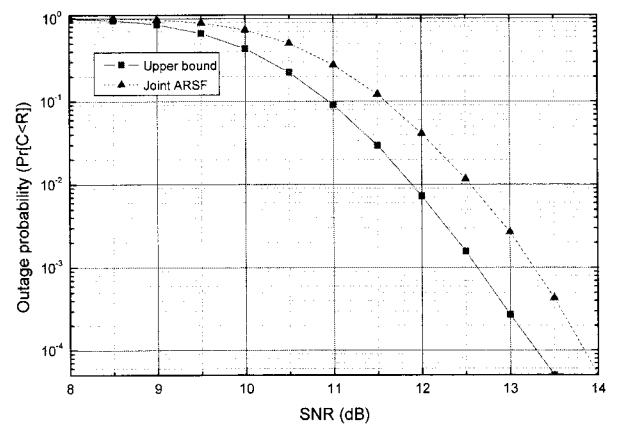


그림 7. Joint ARSF 의 신호 대 잡음비에 대한 아웃티지 확률 ($K=100$)
 Fig. 7. Outage probability vs. SNR of Joint ARSF ($K=100$).

자가 후자에 비해 보다 높은 다중 사용자 다이버시티 이득을 가짐을 보인다.

그림 6은 SNR이 11 dB일 때 ARSF와 Joint ARSF의 가능 중계기 수에 대한 선택된 중계기 수의 비교를 나타낸다. Joint ARSF가 ARSF에 비해 대략 3에서 4 정도 더 많은 중계기를 선택함을 볼 수 있다. 이로 인해 Joint ARSF가 ARSF에 비해 보다 높은 다이버시티 이득을 취함을 확인 가능하다.

그림 7은 전체 가능 중계기 수 K 가 100일 때 Joint ARSF의 SNR에 대한 불능 확률을 나타낸다. 불능 확률 10^{-3} 에서 제안된 기법은 기존의 기회 중계 기법에 비해 대략 2.5 dB 정도의 SNR 이득을 갖는다.

VI. 결 론

본 논문은 재생 OFDMA 중계 네트워크에서 새로운 공평한 중계기 선택 기법을 제안하였다. 최적화 문제가 갖는 높은 계산 복잡도 때문에 간단하고 효율적인 준 최적화 기법을 제안하였고, 컴퓨터 모의실험을 통해 제안된 기법이 기존 기법들에 비해 향상된 시스템 용량과 불능 확률을 가짐을 확인하였다. 제안된 기법은 고정 전력 할당으로 갖는 손해가 미비하며, 가능 중계기 수가 증가함에 따라 더욱 뛰어난 성능을 나타내는 다중 사용자 다이버시티를 갖는다. 그러나 제안 기법은 네트워크의 순간 채널 이득 계수에 근거하므로 상당량의 신호 오버헤드가 불가피한 단점이 있다. 이에 분산 중계기 선택 기법이 향후 연구의 주요 주제가 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] R. Pabst, et al., "Relay-based deployment concept for wireless and broadband radio," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 9, 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. Inform. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [3] J. Cai, X. Shen, J. W. Mark, and A. S. Alfa, "Resource allocation in wireless relay networks," in *proc. of IEEE GLOBECOM '06*, San Francisco, CA, Nov. 27-Dec. 1, 2006.
- [4] G. Li and H. Liu, "Resource allocation for

OFDMA relay networks with fairness constraints," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 11, pp. 2061-2069, Nov. 2006

- [5] W. Ying, Q. Xin-chun, W. Tong, and L. Bao-ling, "Power allocation and subcarrier pairing algorithm for regenerative OFDM relay system," in *Proc. IEEE VTC '07-Spring*, Dublin, Ireland, Apr. 22 - 25, 2007, pp. 2727-2731.
- [6] I. Hammerstrom and A. Wittneben, "On the optimal power allocation for nonregenerative OFDM relay links," in *Proc. IEEE ICC '06, Istanbul, Turkey*, Jun. 11-15, 2006, pp. 4463-4468.
- [7] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 659-672, Mar. 2006.
- [8] Y. J. Zhang and K. B. Letaief, "Multiuser adaptive subcarrier-and-bit allocation with adaptive cell selection for OFDM systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 5, pp. 1566-1575, Sep. 2004.

저 자 소 개



정 하 린(정회원)
 2006년 서울대학교 전기공학부
 학사 졸업.
 2008년 서울대학교 전기컴퓨터
 공학부 석사 졸업.
 2009년~현재 KIS 채권평가(주)
 과생상품팀.

<주관심분야 : Relay network, OFDMA, 시공간
 부호>



김 진 수(학생회원)
 2003년 고려대학교 전기전자전파
 공학부 학사 졸업
 2006년 서울대학교 전기컴퓨터
 공학부 석사 졸업.
 2006년~현재 서울대학교 전기
 컴퓨터공학부 박사 과정.

<주관심분야 : 시공간 부호, OFDM, Cooperative
 Diversity>



이 재 흥(정회원)
 1976년 서울대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1978년 서울대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 1986년 Univ. of Michigan, Ann
 Arbor, 전기공학과
 박사 졸업.

1987년~현재 서울대학교 전기공학부 교수.
 2007년~현재 IEEE Vehicular Technology
 Society 수석부회장.
 2009년 현재 대한전자공학회 회장.
 <주관심분야 : 디지털통신, 부호이론, MIMO,
 OFDM, Cooperative Diversity>