

# 다중사용자 OFDMA 시스템에서 양방향 중계를 위한 자원 할당 기법

신한목 이관형 이재홍

서울대학교 전기컴퓨터공학부 뉴미디어통신공동연구소

[hmshin@snu.ac.kr](mailto:hmshin@snu.ac.kr)

## Resource Allocation for Multiuser Two-Way OFDMA Relay Networks with Fairness Constraints

Hanmok Shin Panhyung Lee Jae Hong Lee

Department of Electrical Engineering and INMC, Seoul National University

### 요약

기존의 반이중방식 단방향 중계 네트워크는 하나의 정보를 두 개의 시간 슬롯 동안에 보내므로 주파수 효율에서 감소가 생기게 된다. 이러한 주파수 효율의 감소를 막기 위해 제안된 양방향 중계 네트워크는 중계기에 중첩 부호화 또는 네트워크 부호화를 적용함으로써 단방향 중계 네트워크에 비해 향상된 주파수 효율을 제공한다. 한편, OFDMA 네트워크는 사용자에게 부반송파, 전력 등의 자원을 적응적으로 할당하여 네트워크의 성능 향상을 얻을 수 있다.

본 논문에서는 다중사용자 다중중계기 양방향 OFDMA 중계 네트워크를 위한 새로운 적응적 부반송파 할당 알고리즘을 제안한다. 먼저 모든 사용자 쌍에 대한 달성 합 전송속도(achievable sum-rate over all user pairs)를 최대화하기 위한 최적화 문제를 정형화한다. 시스템의 수명을 늘리고 각 사용자의 최소 전송속도를 보장하기 위해 공정성 제한을 고려한다. 그리고 이로부터 새로운 적응적 부반송파 할당 알고리즘을 제안한다. 모의실험을 통해 제안된 알고리즘이 정적 알고리즘과 그리디 알고리즘, 두 알고리즘 모두 보다 훨씬 낮은 불능확률을 얻음을 확인한다.

### 1. 서론

다이버시티(diversity) 기법은 무선 통신 네트워크에서 다중경로 페이딩(multipath fading)에 의해 발생하는 성능 감소를 완화시키기 위해 널리 이용된다. 무선 통신 네트워크에서 다중송수신안테나(MIMO: multiple input multiple output)는 공간 다이버시티(spatial diversity) 이득을 얻을 수 있으며, 따라서 네트워크의 주파수 효율(spectral efficiency)과 안정성(reliability)이 향상된다. 그러나 사용자의 크기, 전력, 그리고 복잡도 등의 제한 조건 때문에 사용자에 다중 안테나를 설치하는 것은 비현실적이다. 그 대안으로 제안된 협력 다이버시티(cooperative diversity) 기법에서는 하나의 안테나를 가진 사용자들과 중계기들이 서로 자원을 공유하여 가상의 안테나 배열(virtual antenna array)을 형성하며, 따라서 사용자와 중계기에 다중 안테나를 설치하지 않고도 공간 다이버시티 이득을 얻을 수 있다 [1], [2].

OFDMA(orthogonal frequency division multiple access)는 주파수 선택적 페이딩(frequency selective fading)과 심볼간 간섭(ISI: inter-symbol interference)의 문제를 해결하기 위한 효과적인 방법 중 하나로 많은 관심을 받고 있다. OFDMA 네트워크에서 총 대역폭은 많은 수의 부반송파로 쪼개어지고, 다중 사용자는 서로 다른 부반송파를 이용해 동시에 정보를 송신한다. OFDMA 네트워크는 사용자에게 부반송파, 전력 등의 자원을 적응적으로 할당하여 네트워크의 성능 향상을 얻을 수 있음이 알려져 있다 [3], [4].

기존의 반이중방식(half duplex) 단방향 중계 네트워크는 하나의 정보를 두 개의 시간 슬롯 동안에 보내므로 추가적인 자원을 필요로 하며 이로 인해 주파수 효율에서 감소가 생기게 된다. 이러한 주파수 효율의 감소를 없애기 위해 제안된 양방향 중계 네트워크는 중계기에 중첩 부호화(superposition coding) 또는 네트워크 부호화(network coding)를 적용함으로써 단방향 중계 네트워크에 비해 향상된 주파수 효율을 제공한다 [5]. [6]에서는 한 개의 사용자 쌍과 한 개의 중계기가 존재하는 양방향 OFDM 중계 네트워크에서 적응적 전력 할당과 부반송파 치환(subcarrier permutation)을 이용하여 합 채널용량(sum-capacity)을 최대화하는 기법에 대해 연구하였다.

본 논문에서는 다중 사용자 쌍과 다중 중계기가 존재하는 양방향 OFDMA 중계 네트워크를 위한 적응적 부반송파 할당 기법을 제안한다. 먼저 모든 사용자 쌍에 대한 달성 합 전송속도(achievable sum-rate over all user pairs)를 최대화하기 위한 최적화 문제를 정형화한다. 시스템의 수명을 늘리고 각 사용자의 최소 전송속도를 보장하기 위해 공정성 제한을 고려한다. 그리고 이로부터 새로운 적응적 부반송파 할당 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘을 불능확률 측면에서 기존의 기법과 비교한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 시스템 모델을 보인다. 3절에서는 공정성 제한을 고려한 최적화 문제를 정형화하고, 새로운 적응적 부반송파 할당 알고리즘을 제안한다. 4절에서는 모의실험을 통해 제안된 기법의 성능을 확인하며 5장에서 결론을 맺는다.

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R01-2007-000-11844-0).

## 2. 시스템 모델

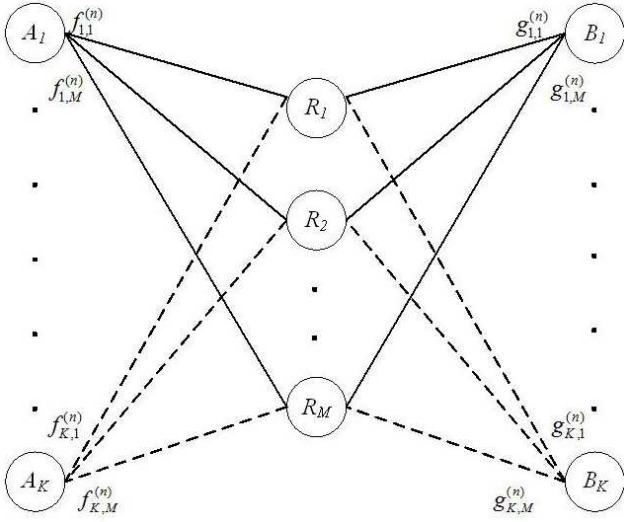


그림 1. 다중사용자 다중중계기 양방향 중계 네트워크

그림 1과 같이  $K$ 명의 사용자 쌍과  $M$ 명의 중계기가 존재하는 다중사용자 양방향 중계 네트워크를 고려한다. 다중 접속 방식으로 총  $N$ 개의 부반송파를 갖는 OFDMA 방식을 사용한다.  $k$ 번째 사용자 쌍의 두 사용자,  $A_k$ 와  $B_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ , 는 한 개 또는 그 이상의 중계기의 도움을 받아 서로의 정보를 교환한다. 각 사용자 간의 직접 경로는 없다고 가정한다. 또한 각 사용자와 중계기는 한 개의 안테나를 가지고 있으며 송신과 수신을 동시에 할 수 없다고 가정한다.

무선통신 채널은 주파수 선택적 레일리 페이딩(frequency selective Rayleigh fading)을 가정한다. 또한 각 부반송파의 대역폭은 채널의 상관 대역폭(coherence bandwidth)보다 훨씬 작으며 따라서 각 부반송파의 채널은 평면 페이딩(flat fading)을 갖는다고 가정한다. 사용자  $A_k$ 와 중계기  $R_m$  사이의  $n$ 번째 부반송파의 채널을  $f_{k,m}^{(n)}$  라 하고, 사용자  $B_k$ 와 중계기  $R_m$  사이의  $n$ 번째 부반송파의 채널을  $g_{k,m}^{(n)}$  라 한다.

양방향 중계에서 두 사용자는 다중접속단계(multiple-access phase)와 방송단계(broadcast phase), 두 단계에 걸쳐서 서로 데이터를 교환한다. 다중접속단계에서 모든 사용자는 자신의 데이터를 동시에 중계기로 전송한다.  $n$ 번째 부반송파에 대한 중계기  $R_m$ 에서의 수신 신호 다음과 같다.

$$y_{R_m}^{(n)} = \sqrt{p_{A_k}^{(n)}} f_{k,m}^{(n)} x_{A_k}^{(n)} + \sqrt{p_{B_k}^{(n)}} g_{k,m}^{(n)} x_{B_k}^{(n)} + n_{R_m}^{(n)}. \quad (1)$$

$p_{A_k}^{(n)}$ ,  $p_{B_k}^{(n)}$ 는 각각 사용자  $A_k$ 와  $B_k$ 가 부반송파  $n$ 에 정보를 실어 보낼 때의 송신 파워이며,  $x_{A_k}^{(n)}$ ,  $x_{B_k}^{(n)}$ 는 각각 사용자  $A_k$ 와  $B_k$ 가 부반송파  $n$ 에 실어 보내는 전송 심볼이다. 또한  $n_{R_m}^{(n)}$ 은  $n$ 번째 부반송파에 대한 중계기  $R_m$ 에서의 복소 가산 백색 가우시안 잡음(complex additive white Gaussian noise)으로 평균은 0이고 분산은  $\sigma^2$ 이다.

방송단계에서 각 중계기는 다중접속단계에서 수신한 신호를 증폭 계수  $\beta_{k,m}^{(n)}$ 를 이용하여 증폭한 뒤 똑같은 부반송파를 이용해 사용자들에게 방송한다.  $n$ 번째 부반송파에 대한 사용자  $A_k$ 와  $B_k$ 에서의 수신 신호는 각각 다음과 같다.

$$y_{A_k}^{(n)} = \beta_{k,m}^{(n)} f_{k,m}^{(n)} y_{R_m}^{(n)} + n_{A_k}^{(n)} \quad (2)$$

$$y_{B_k}^{(n)} = \beta_{k,m}^{(n)} g_{k,m}^{(n)} y_{R_m}^{(n)} + n_{B_k}^{(n)}. \quad (3)$$

$n_{A_k}^{(n)}$ ,  $n_{B_k}^{(n)}$ 는 각각  $n$ 번째 부 반송파에 대한 사용자  $A_k$ 와  $B_k$ 에서의 복소 가산 백색 가우시안 잡음(complex additive white Gaussian noise)으로 평균은 0이고 분산은  $\sigma^2$ 이다. 그리고 증폭 계수  $\beta_{k,m}^{(n)}$ 는 다음과 같다.

$$\beta_{k,m}^{(n)} = \sqrt{\frac{p_{R_m}^{(n)}}{p_{A_k}^{(n)} |f_{k,m}^{(n)}|^2 + p_{B_k}^{(n)} |g_{k,m}^{(n)}|^2 + \sigma^2}}. \quad (4)$$

양방향 통신에서는 사용자가 다중접속단계에서 송신한 신호가 중계기에서 중첩 부호화 또는 네트워크 부호화를 이용해 다른 사용자가 송신한 신호와 결합되어 방송단계에서 그 결합된 신호를 수신하게 된다. 이 과정에서 자신이 송신한 신호를 다시 수신하게 되는데 이를 자기간섭(self-interference)라 한다. 본 논문에서는 자기간섭을 완벽하게 제거할 수 있다고 가정한다. 즉, 사용자  $A_k$ 는 방송단계에서 수신한 신호  $y_{A_k}^{(n)}$ 에서  $x_{A_k}^{(n)}$  성분을 완벽하게 제거할 수 있으며,  $B_k$  역시 마찬가지이다. 자기간섭을 완벽하게 제거한 후,  $n$ 번째 부반송파에 대한 사용자  $A_k$ 와  $B_k$ 에서의 수신 신호대잡음비(received SNR)는 다음과 같다.

$$\text{SNR}_{A_k}^{(n)} = \frac{|\beta_{k,m}^{(n)} f_{k,m}^{(n)} g_{k,m}^{(n)}|^2 p_{B_k}^{(n)}}{(|\beta_{k,m}^{(n)} f_{k,m}^{(n)}|^2 + 1) \sigma^2} \quad (5)$$

$$\text{SNR}_{B_k}^{(n)} = \frac{|\beta_{k,m}^{(n)} f_{k,m}^{(n)} g_{k,m}^{(n)}|^2 p_{A_k}^{(n)}}{(|\beta_{k,m}^{(n)} g_{k,m}^{(n)}|^2 + 1) \sigma^2}. \quad (6)$$

이로부터,  $k$ 번째 사용자 쌍이  $n$ 번째 부반송파를 이용하여  $m$ 번째 릴레이의 도움을 받아 통신하는 경우의 순시 전송속도(instantaneous rate)는 다음과 같다 [5].

$$r_{k,m}^{(n)} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \text{SNR}_{A_k}^{(n)}) + \frac{1}{2} \log_2(1 + \text{SNR}_{B_k}^{(n)}). \quad (7)$$

그리고  $k$ 번째 사용자 쌍의 달성 전송속도(achievable rate)는 다음과 같다.

$$r_k = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{k,m}^{(n)} r_{k,m}^{(n)}. \quad (8)$$

여기서  $\rho_{k,m}^{(n)}$  는 부반송파 할당 표시 변수(subcarrier assignment indicator variable)이다. 만약 부반송파  $n$  이 사용자 쌍  $(A_k, B_k)$  와 중계기  $R_m$  에 할당되면  $\rho_{k,m}^{(n)}$  는 1의 값을 가지게 된다. 그렇지 않으면  $\rho_{k,m}^{(n)}$  는 0의 값을 가지게 된다. 한 개의 부반송파는 오직 한 사용자 쌍과 한 중계기에만 할당된다고 가정한다. 즉,  $\rho_{k,m}^{(n)}$  이 1의 값을 가지면  $k' \neq k$ 이고  $m' \neq m$ 인 모든  $k', m'$  에 대하여  $\rho_{k',m'}^{(n)}$  은 0의 값을 가지게 된다. 따라서 모든 사용자 간 그리고 모든 중계기 간에는 간섭이 없다고 가정한다.

모든 사용자 쌍에 대한 달성 합 전송속도(achievable sum-rate over all user pairs)는 다음과 같다.

$$r = \sum_{k=1}^K r_k. \quad (9)$$

### 3. 새로운 부반송파 할당 알고리즘 제안

다중사용자가 존재하는 네트워크에서 사용자간의 공정성을 고려하지 않을 경우 많은 부반송파를 할당 받은 사용자는 높은 전송속도를 달성하지만 적은 부반송파를 할당 받은 사용자는 원활한 통신을 할 수 없게 된다. 또한 다중중계기가 존재하는 경우 특정 중계기가 많은 부반송파를 중계하게 되면 많은 전력을 사용하므로 네트워크의 수명(lifetime)이 짧아지게 된다.

사용자간의 공정성을 향상하기 위해 최소 전송속도를 만족하도록 부반송파를 할당하며, 중계기간의 공정성을 향상하기 위해 모든 중계기가 사용할 수 있는 송신 파워의 최대값을 동일하게 제한하였다. 각 사용자의 최소 전송속도 조건을  $r_{\min}$  이라 하며, 사용자와 중계기에서의 최대 송신 파워를 각각  $P_U, P_R$  이라 한다. 그러면, 모든 사용자 쌍에 대한 달성 합 전송속도를 최대화하기 위한 최적화 문제를 다음과 같이 정형화할 수 있다 [3].

$$r^* = \max \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{k,m}^{(n)} r_{k,m}^{(n)} \quad (10)$$

$$\text{제한조건 : } \rho_{k,m}^{(n)} \in \{0,1\}, \forall k, m, n \quad (11a)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{k,m}^{(n)} = 1, \forall k \quad (11b)$$

$$\sum_{n=1}^N p_{A_k}^{(n)} \leq P_U, \forall k \quad (11c)$$

$$\sum_{n=1}^N p_{B_k}^{(n)} \leq P_U, \forall k \quad (11d)$$

$$\sum_{n=1}^N p_{R_m}^{(n)} \leq P_R, \forall m \quad (11e)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_{k,m}^{(n)} r_{k,m}^{(n)} \geq r_{\min}, \forall k \quad (11f)$$

$$p_{A_k}^{(n)}, p_{B_k}^{(n)}, p_{R_m}^{(n)} \geq 0, \forall k, m, n \quad (11g)$$

수식 (10)의 최적화 문제는 이산변수와 연속변수를 함께 포함하고 있는 결합 최적화 문제이다. 이 문제는 높은 복잡도 때문에 최적의 값을 얻기가 어려움이 알려져 있다 [3]. 복잡도를 줄이기 위해 최적의 값을 찾는 대신 낮은 복잡도를 가지는 새로운 부반송파 할당 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘에서는 모든 부반송파가 동일한 송신 파워에 의해 송신된다고 가정한다.

제안된 새로운 부반송파 할당 알고리즘은 아래와 같이 총 세 단계로 이루어진다.

#### Step 1: 초기화

모든 집합 및 변수를 초기화한다.

#### Step 2: 최초 부반송파 할당

각 사용자 쌍의 순시 전송속도를 최대화하는 부반송파 및 중계기를 하나씩 할당한다.

#### Step 3: 남은 부반송파 할당

최소 전송속도 조건을 만족하지 못한 사용자 쌍이 있는 경우, 가장 작은 달성 전송속도를 가지는 사용자 쌍에 부반송파 및 중계기를 할당한다. 모든 사용자 쌍이 최소 전송속도 조건을 만족한 경우, 전송속도 향상이 가장 큰 사용자 쌍에 부반송파 및 중계기를 할당한다. 이 단계는 모든 부반송파가 할당될 때까지 진행된다.

### 4. 모의실험

$200m \times 200m$ 의 2차원 공간에 사용자와 중계기가 분포되어 있다고 가정하였다. 중계기는 총 3개의 고정된 중계기가 있으며, 영역의 중간에 세로로 일정한 간격만큼 떨어져서 위치하고 있다. 총 9쌍의 사용자 쌍이 존재하며, 한 사용자 쌍의 두 사용자는 각각 중계기의 오른쪽 영역과 왼쪽 영역에 균등하게 분포한다. 총 128개의 부반송파가 존재하며, 각 사용자의 최소 전송속도 조건은 2.5 Mbps 라고 가정하였다. 또한 모든 사용자와 중계기는 동일한 최대 송신 파워를 가진다고 가정하였다.

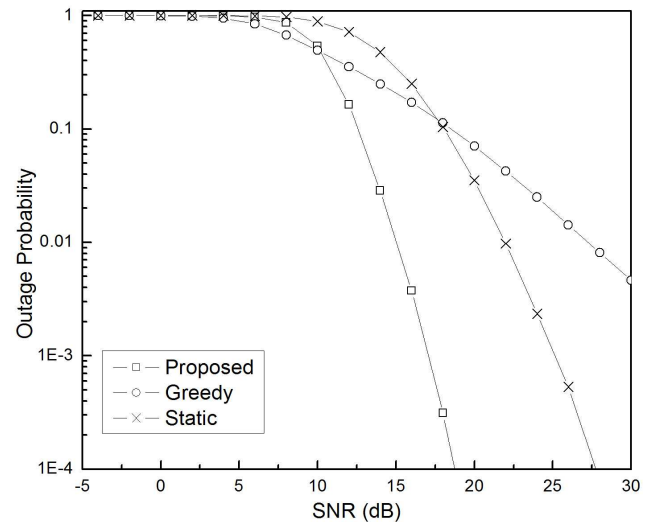


그림 2. 제안된 알고리즘의 불능확률

그림 2는 신호대잡음비에 따른 제안된 알고리즘의 불능확률 (outage probability)을 보여준다. 본 논문에서 불능확률은 각 사용자가 최소 전송속도 조건인  $r_{\min}$ 을 달성하지 못할 확률로 정의한다. 제안된 알고리즘은 정적 알고리즘과 그리디 알고리즘, 두 알고리즘 모두 보다 훨씬 낮은 불능확률을 보임을 알 수 있다.  $10^{-3}$ 의 불능확률에서 제안된 알고리즘은 정적 알고리즘에 비해 8 dB의 신호대잡음비 이득을 얻음을 알 수 있다. 그리고 그리디 알고리즘의 경우에는 낮은 신호대잡음비에서는 제안된 알고리즘과 비슷하거나 조금 더 나은 성능을 보여주지만 신호대잡음비가 커질수록 성능이 급격히 떨어짐을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 논문에서는 다중사용자 양방향 OFDMA 중계 네트워크를 위한 새로운 적응적 부반송파 할당 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘에서, 최소 전송속도를 만족시키지 못한 사용자 쌍이 있을 경우 부반송파는 가장 낮은 달성 전송속도를 가지는 사용자 쌍이 최소 전송속도 조건을 만족시킬 수 있도록 부반송파를 할당한다. 모든 사용자가 최소 전송속도 조건을 만족시키면 남은 부반송파는 전송속도 향상이 가장 큰 사용자 쌍에 할당된다. 모의실험을 통해 제안된 알고리즘이 정적 알고리즘과 그리디 알고리즘, 두 알고리즘 모두 보다 훨씬 낮은 불능확률을 얻음을 확인하였다.

## 참고문헌

- [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. Inform. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [3] C. Y. Wong, R. S. Cheng, K. B. Letaief, and R. D. Murch, "Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit, and power allocation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 17, no. 10, pp. 1747-1758, Oct. 1999.
- [4] G. Li and H. Liu, "Resource allocation for OFDMA relay networks with fairness constraints," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 11, pp. 2061-2069, Nov. 2006.
- [5] B. Rankov and A. Wittneben, "Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 379-389, May 2007.
- [6] C. K. Ho, R. Zhang, and Y. C. Liang, "Two-way relaying over OFDM: Optimized tone permutation and power allocation," in *Proc. IEEE ICC 2008*, Beijing, China, May 2008, pp. 3908-3912.