

## 불완전한 채널 정보를 갖는 OFDMA 중계 네트워크를 위한 자원 할당 기법

이재호, 이재홍  
 서울대학교 전기컴퓨터공학부 뉴미디어통신공동연구소  
 jaeho2@snu.ac.kr, jhlee@snu.ac.kr

### Resource Allocation for OFDMA Relay Networks with Imperfect CSI

Jaeho Lee Jae Hong Lee  
 Department of Electrical Engineering and INMC, Seoul National University

#### 요 약

기존의 OFDMA 시스템에서의 자원할당 기술은 주로 완벽한 채널정보에 기반하여 송신 전력, 부반송파를 할당하였다. 하지만 실제 시스템에서는 사용자의 움직임이나 채널 피드백 지연에 의해 완전한 채널정보를 얻을 수 없다.

본 논문에서는 불완전한 채널 정보를 갖는 OFDMA 중계 네트워크를 위한 자원 할당 기법을 제안한다. 불완전한 채널 정보를 갖는 환경에서는 패킷 오류가 발생할 확률이 높기 때문에 이를 예측하여 적응적 데이터 전송률을 할당하는 기법이 필요하다. 제안된 알고리즘은 채널 정보를 예측하여 데이터 전송률, 그리고 부반송파 할당을 통해 유효처리율을 최대화시킨다. 모의 실험 결과 제안된 알고리즘은 채널정보를 예측하지 않는 단순한 알고리즘과 비교하여 더 높은 유효처리율을 갖음을 확인하였다.

#### 1. 서론

무선 통신 환경에서 다중 경로 전파에 의한 페이딩은 신호의 심각한 열화를 가져온다. 이를 극복하기 위하여 다중 안테나 다이버시티 기법에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 하지만, 다중 안테나 공간 다이버시티 기법에 관한 연구는 단말기의 크기, 비용 등에 의해 제한적일 수밖에 없다. 이에 반하여, 협력 다이버시티(cooperative diversity) 기법은 여러 개의 단말기가 안테나와 다른 자원들을 공유하여 가상의 안테나 배열을 형성해 공간 다이버시티 이득을 얻는다. 이러한 협력 다이버시티 기법은 증폭 후 재전송(amplify-and-forward), 복호 후 재전송(decode-and-forward) 기법으로 적용되고 있다 [1].

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 광대역 주파수 대역에서 효율적인 무선 전송 방식으로 주목을 받고 있다. 이 기술은 광대역 주파수를 여러 개의 부반송파로 나누어 전송하여 주파수 선택적 페이딩(frequency selective fading)의 문제를 효과적으로 해결 한다. 또한, 송신단에서 부반송파들의 계인을 아는 경우에는 적응적 전력 할당을 통해 많은 성능 이득을 얻을 수 있다.

OFDMA(Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access)는 OFDM 기법에 기반하여 여러 개의 부반송파 전송과 다중 접속을 지원하는 기법이다. 각각의 사용자에게 서로 다른 부반송파를 할당함으로써 주파수 자원의 효율적인

사용으로 이득을 얻을 수 있다. 이에 따라 OFDMA 에 의한 적응적 전력, 부반송파 할당을 통해 비례적 공정(proportional fairness), 전송률 최대화에 대한 연구가 진행되고 있다 [2].

기존의 OFDMA 시스템에서의 자원할당 기술은 주로 완벽한 채널정보에 기반하여 송신 전력, 부반송파, 전송률 등을 할당하였다. 하지만 실제 시스템에서는 사용자의 움직임이나 채널 피드백 지연에 의해 완전한 채널 정보를 얻을 수 없다. 따라서 불완전한 정보의 확률을 가정하고 완전한 채널정보를 예측하여 자원을 할당하는 방법이 연구되고 있다 [3], [4].

본 논문에서는 불완전한 채널 정보를 갖는 OFDMA 중계 네트워크를 위한 자원 할당 기법을 제안한다. 송신단은 예측된 채널 정보와 오차의 확률을 알고 있다고 가정한다. 이에 따라 제안된 알고리즘은 완전한 채널 정보를 예측하여 데이터 전송률, 그리고 부반송파 할당을 통해 유효처리율을 최대화시킨다.

#### 2. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1 과 같이 1 개의 기지국(BS), J 개의 중계기, K 개의 수신단말기를 가진 무선 통신시스템의 하향 링크를 고려한다. 또한 K 개의 수신단말기는 셀 안에 균일하게 분포하고 있다고 가정한다. 각 부반송파에서의 채널 이득은 하나의 프레임 동안 일정하다고 가정한다.

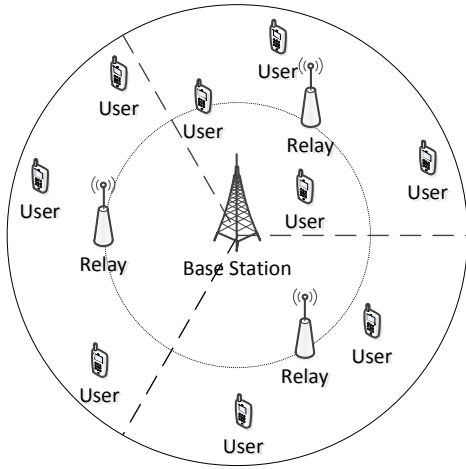


그림 1. 하향링크 OFDMA 중계 네트워크

제안되는 전송 방식은 증분형 중계방식과 유사하다 [1]. 기지국은 두 타임 슬롯을 통해 정보를 수신 단말기에 전송한다. 먼저 최적화 문제 풀이를 통하여 최적의 데이터 전송률과 부반송파를 할당한다. 그 다음, 첫번째 타임슬롯에서 기지국은 정보를 N 개의 부반송파에 나누어 중계기와 수신단말기에 동시에 전송한다. 수신단말기는 각각의 부반송파마다 신호에 오류가 없는지 확인한 다음, 부반송파마다 1 비트의 피드백 신호를 중계기에게 보낸다. 두 번째 타임슬롯에서 중계기는 첫번째 타임슬롯에서 전송에 실패한 정보만을 골라 수신단말기에 전송한다. 두 번째 타임슬롯에서 보내는 부반송파는 첫번째 타임슬롯에서 사용했던 부반송파와 관계없이 최적의 부반송파를 사용한다. 기지국과 중계기의 통신의 경우, 중계기는 움직임이 없기 때문에 완전한 채널정보를 가지고 있다고 가정한다. 하지만, 기지국과 수신단말기, 중계기와 수신단말기의 통신의 경우, 수신단말기의 움직임과 채널 피드백 지연에 의해 기지국과 중계기는 불완전한 채널정보를 가지고 있다고 가정한다.

$$H(n) = \hat{H}(n) + e(n), \quad (1)$$

불완전 채널은 수식 (1)과 같이 모델링 할 수 있다 [5]. 이 때,  $H(n)$ 은 n 번째 부반송파 채널의 완전한 채널 정보를 나타내고, 예측 채널 정보  $\hat{H}(n)$ 은  $\hat{H}(n) \sim CN(0, 1 - \sigma_e^2)$  으로 가정하고, 채널 오차 정보  $e(n)$ 은  $e(n) \sim CN(0, \sigma_e^2)$  으로 가정한다. 불완전한 채널 정보를 갖는 통신의 경우, 송신단은 채널 오차 정보의 분포와 예측 채널 정보를 알고 있다고 가정하게 된다.

### 3. 자원 할당 기법

본 절에서는 첫 번째 타임 슬롯에서 기지국이 정보를 전송할 때의 자원 할당과 두 번째 타임 슬롯에서 각각의 중계기가 개별적으로 정보를 전송할 때의 자원 할당에 관한 기법을 제시한다.

수신단에서 완벽한 채널 정보를 갖고 있는 경우, 첫 번째 타임 슬롯에서 n 번째 부반송파에 의한 기지국과 k 번째 수신단말기 사이의 최대 전송 정보량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{U_k}^{(1)}(n) = \log_2(1 + \gamma_{U_k}^{(1)}(n)) \quad (2)$$

여기서,  $\gamma_{U_k}^{(1)}(n) = P_{BS,U_k}(n) |H_{BS,U_k}(n)|^2 / \sigma_z^2$ 는 k 번째 수신단말기의 수신 SNR 을 나타낸다. 또한,  $P_{BS,U_k}(n)$ 은 n 번째 부반송파를 사용하여 기지국에서 k 번째 수신단말기로 보내는 송신전력을 나타낸다. 제안된 기법에서는 모든 부반송파가 동일한 송신전력을 사용한다고 가정하였다.  $l_{BS,U_k}$ 는 기지국과 k 번째 수신단말기 사이의 공간손실을 나타낸다.  $H_{BS,U_k}(n)$ 은 채널 계수이며,  $\sigma_z^2$ 는 복소 가산 백색 가우시안 잡음(complex additive white Gaussian noise)의 분산을 나타낸다.

기존의 OFDMA 시스템의 경우, 최대 전송 정보량의 합을 최대화 시키는 연구를 많이 진행하였다. 강력한 채널 부호를 사용한다면 데이터 전송률은 최대 전송 정보량에 근접한 값을 갖기 때문이다. 하지만 불완전한 정보를 갖는 OFDMA 시스템의 경우, 완벽한 채널 정보를 갖고 있지 못하기 때문에 데이터 전송률이 예측한 최대 전송 정보량보다 작을 경우 심각한 오류가 발생하게 된다. 따라서 우리는 유효처리량 (goodput)을 최대화시켜야 하고 이에 맞는 데이터 전송률을 할당해야 한다. n 번째 부반송파에 할당되는 k 번째 수신단말기에 대한 데이터 전송률이  $R_{U_k}(n)$ 일때, 첫 번째 타임 슬롯에서 n 번째 부반송파에 의한 기지국과 k 번째 수신단말기 사이의 유효처리량은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$G_{U_k}^{(1)}(n) = R_{U_k}(n) \times 1(R_{U_k}(n) \leq C_{U_k}^{(1)}(n)) \quad (3)$$

첫 번째 타임 슬롯에서 유효처리량을 최대화하기 위한 최적화 문제는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\max_{\rho_{U_k}^{(1)}(n), \rho_{U_k}^{(2)}(n)} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N E_{\gamma_{U_k}^{(1)}(n)} \{ \rho_{U_k}^{(1)}(n) G_{U_k}^{(1)}(n) | \hat{\gamma}_{U_k}^{(1)}(n) \} \quad (4)$$

$$\Pr[R_{U_k}(n) > C_{U_k}^{(1)}(n) | \hat{\gamma}_{U_k}^{(1)}(n)] \leq \varepsilon, \forall k, n \quad (5)$$

$$\rho_{U_k}^{(1)}(n) \in \{0, 1\}, \forall k, n \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^K \rho_{U_k}^{(1)}(n) = 1, \forall n \quad (7)$$

부반송파의 데이터 전송률이 예측한 최대 전송 정보량보다 클 확률이  $\varepsilon$  보다 작게 제한하였다.  $\rho_{U_k}^{(1)}$ 는 n 번째 부반송파 채널이 k 번째 수신 단말기에 할당 될 경우 1 이고, 그렇지 않을 경우 0 의 값을 갖는다.

위의 최적화 문제는 매우 높은 복잡도를 갖는다. 따라서 계산의 복잡도를 줄이기 위하여 부반송파와 데이터 전송률 할당을 나누어 차례로 수행한다.

부반송파 할당은 수식 (8)번과 같이 정의 된다.

$$\rho_{U_k}^{(1)}(n) = \begin{cases} 1, & k = \arg \max_k \left[ E_{\gamma_{U_k}^{(1)}(n)} \left\{ \log_2(1 + \gamma_{U_k}^{(1)}(n)) | \hat{\gamma}_{U_k}^{(1)}(n) \right\} \right] \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

데이터 전송률 할당은 수식 (9)번과 같이 정의 된다.

$$R_{U_k}(n) = \frac{1}{2} \log_2 \left( F_{|H_{BS,U_k}|^2}^{-1}(\varepsilon) \frac{P_{BS,U_k}(n) I_{BS,U_k}}{\sigma_z^2} + 1 \right) \quad (9)$$

두 번째 타임 슬롯에서는 수신단말기로부터 받은 피드백을 바탕으로 분산된 중계기들이 각각 수식 (8)번과 유사한 최적화 문제를 통해  $\rho_{U_k}^{(2)}$ 을 결정하여 신호를 전송 한다.

#### 4. 모의실험

모의실험에서는 그림 1 과 같이 1 개의 기지국, 3 개의 중계기, 9 개의 수신단말기로 구성된 단일 셀 OFDMA 중계 네트워크를 가정하였다. 또한 셀의 반경은 1km 이고 중계기는 기지국으로부터 0.5km 떨어진 지점에 위치한다. 채널 오차 정보,  $e(n)$ 의 분산은 0.01 이고,  $\varepsilon$ 은 0.2 로 가정하고, 기지국의 송신 전력은 중계기 송신 전력의 10 배를 갖는다고 가정하였다.

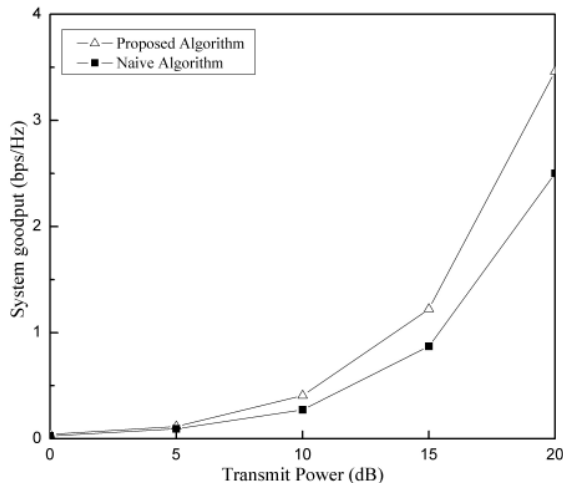


그림 2. 제안된 기법의 유효처리량

그림 2.에서 나타나듯이 제안된 기법은 채널 정보의 예측 없이 불완전한 채널 정보를 그대로 사용했을 경우에 비해 유효처리율이 증가함을 볼 수 있다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 불완전한 채널 정보를 갖는 OFDMA 중계 네트워크를 위한 자원 할당 기법을 제안하였다. 컴퓨터 모의실험을 통하여 제안된 기법은 불완전한 채널 정보를 그대로 사용했을 경우에 비해 유효처리율을 크게 향상시킴을 확인하였다.

#### 6. 감사의 글

이 논문은 2011 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-

0001274, 2011-0017437).

#### 참고문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] I. C. Wong and B. L. Evans, "Optimal resource allocation in the OFDMA downlink with imperfect knowledge," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 1, pp. 232–241, Jan. 2009.
- [4] Y. Cui, V. K. N. Lau, and R. Wang, "Distributive subband allocation, power and rate control for relay-assisted OFDMA cellular system with imperfect system state knowledge," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 10, pp. 5096–5102, Oct. 2009.
- [5] Z. Zhou and B. Vucetic, "Design of adaptive modulation using imperfect CSI in MIMO systems," *IEEE Electron.*, vol. 40, no. 17, pp. 1073–1075, Aug. 2004.