

다중사용자 협력 시스템에서 불능확률 기반의 사용자 선택 기법

이주현 이재홍

서울대학교 전기컴퓨터공학부 뉴미디어통신공동연구소

ljh1112@snu.ac.kr

Outage-based User Selection for Multiuser Cooperative System

Juhyun Lee Jae Hong Lee

Department of Electrical Engineering and INMC, Seoul National University

요약

기존의 협력통신 관련 연구는 주로 단일 송·수신기와 다중 중계기가 존재하는 시스템 상에서 최적의 중계기를 선택하여 협력전송을 하거나 다중 중계기 모두를 이용한 협력통신이 이루어지고 반대로 단일 수신기, 중계기와 다중 송신기가 존재하는 시스템에서 최적의 사용자를 선택하는 것에 관한 것이 대부분 이었다. 하지만 실질적으로 보았을 때는 시스템 전체적인 관점에서 보았을 때 각각의 사용자에게 대하여 최선의 중계기를 선택할 경우 오히려 전체적인 시스템 성능은 떨어질 수 있다.

본 논문에서는 다중사용자 협력시스템에서 각각의 사용자들이 자신들의 중계기 역할을 할 사용자를 선택하는 기법에 대하여 알아본다. 각 사용자에게 대하여 자신이 중계기 역할을 할 경우 복호및재전송 기법을 이용하여 중계역할을 하고 그렇지 않을 경우 자신의 신호를 재전송한다. 제안된 시스템에서의 각 사용자에게 대한 불능확률을 구하고 그것을 기반으로 사용자를 선택하게 된다. 모의실험을 통해 제안된 시스템에서의 사용자 선택 기법들의 성능을 알아보았고 이를 평균 불능확률로 나타내었다. 모의실험 결과 제안된 시스템에서 랜덤선택은 협력통신을 하지 않은 경우보다 안 좋은 성능을 보였고 나머지 기법들의 경우 협력통신을 하지 않은 경우보다 월등히 좋은 성능을 보였다.

1. 서론

무선통신 환경에서 문제시 되고 있는 다중경로 페이딩(multipath fading) 현상으로 인해 많은 성능의 열화가 발생한다. 이를 극복하고자 다중 입력 다중 출력(multiple input multiple output: MIMO) 기술을 이용한 송신 다이버시티(transmit diversity)에 관한 연구가 활발히 되어왔고 이는 통신의 안정성을 향상시켜주었다. 하지만 이러한 다이버시티 이득을 얻기 위해서는 각각의 안테나에 대하여 독립적인 페이딩 채널이 형성되어야 하지만 크기, 비용, 하드웨어의 제한(hardware limitation) 등으로 인해 단말기에 다중 안테나를 설치하는 것은 힘들다[1]. 그래서 이러한 MIMO 기술의 대안으로 협력다이버시티(cooperative diversity) 기법이 나타나게 되었고 이는 중계기(relay)의 도움을 받아 가상의 MIMO 시스템을 형성하여 성능을 향상시키는 기법이다. 이러한 협력 통신에 대하여 많은 연구가 되어 왔고 [2]에서 다루고 있는 증폭재전송(amplify-and-forward)기법과 복호화재전송(decode-and-forward)기법을 적용시킨 연구들이 많이 되어왔다.

기본적으로 협력통신을 하기 위해서는 중계기를 필요로 하기 때문에 이러한 중계기를 송신단 혹은 수신단에서 어떻게 선택을 할 것인가에 관한 연구가 많이 되어 왔다 [3], [4], [5]. [3]에서는 각각의 중계기들이 자신과 송·수신기 사이의 채널 정보를 이용하여 수신기에서 중계기를 선택하는 기법이 제안되었고 수신기에서의 피드백 정보 없이 다이버시티 효과를 얻을 수 있었다. [4]에서는 중계기를 선택하기 위해

서 각각의 중계기에서 백오프 타이머(back-off timer)를 사용하여 시간차를 두고 신호를 전송하여 중계기를 선택하는 방법이 사용되었다. 이와 같이 단일 송신기와 수신기에 대하여 다중 중계기가 존재하는 경우 최적의 전송률을 얻기 위한 방법들이 제안되었고 마찬가지로 다중 송신기와 단일 중계기, 수신기가 존재하는 시스템 상에서의 최적의 성능을 얻기 위한 연구도 많이 되어 왔다 [6]. 하지만 이러한 기법들은 단일 사용자에게 대한 최적의 성능을 보여주는 하였지만 전체적인 시스템 관점에서는 보지 않았다. 일반적으로 각 사용자가 최상의 성능을 얻기 위해서 중계기를 선택할 경우 그 선택의 다른 사용자의 중계기 선택에도 영향을 끼치기 때문에 전체적인 시스템 관점에서 볼 때는 그 중계기 선택이 최적의 시스템 전체 성능을 주지는 않을 것이다. 이와 관련하여 [7]에서는 협력통신을 하기 위해서 각각의 사용자에게 대한 파트너를 할당하여(partner assignment) 협력통신이 발생할 확률 등이 연구되었다.

본 논문에서는 다중 사용자와 단일 수신기가 존재하는 상향링크 시스템에 대하여 분석한다. 각 사용자는 상황에 따라 자신의 정보를 수신기에 보내거나 다른 사용자의 정보를 수신기로 전달하는 중계기 역할을 한다. 이러한 시스템 상황에서 outage 확률을 분석하고 각각의 사용자들을 할당하는 방법에 대하여 알아본다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 시스템 모델을 보인다. 3절에서는 불능 확률(outage probability)을 분석하고 각 사용자들을 할당하는 방법을 알아본다. 4절에서는 모의실험을 통해 제안된 시스템의 성능을 확인하며 5장에서 결론을 맺는다.

본 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2007-00-11844-0).

2. 시스템 모델

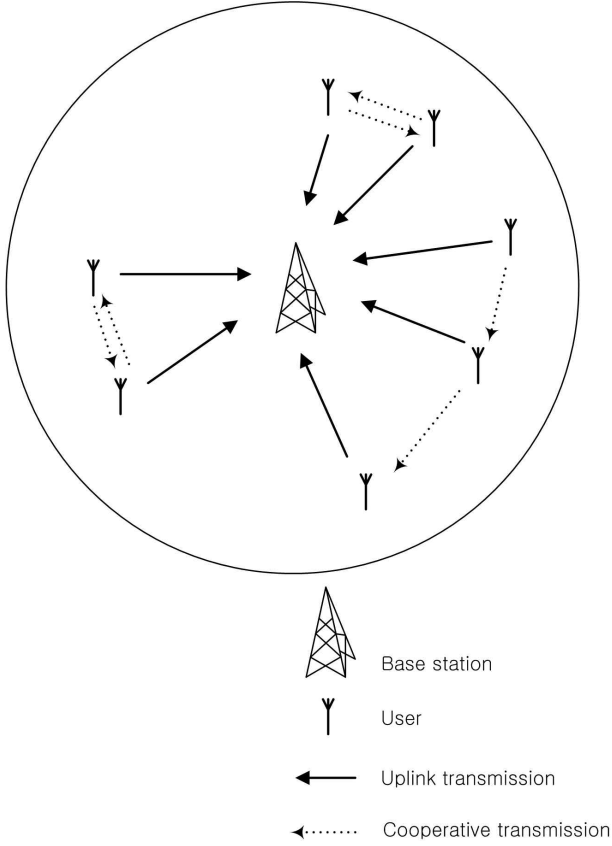


그림 1. 다중사용자가 존재하는 상향링크 시스템

본 논문에서는 그림 1과 같은 시스템 모델을 가정한다. 시스템에는 K 명의 사용자가 존재하는 상향링크 시스템을 가정하였다. 각각의 사용자들은 기지국을 중심으로 퍼져서 위치하고 있고 각 사용자들은 고유의 직교채널(orthogonal channel)을 사용한다고 가정한다. 신호의 전송은 두 phase에 걸쳐서 이루어지며 복호화재전송기법을 사용한다. 첫 번째 phase에서는 각각의 사용자들이 자신들의 채널을 사용하여 신호를 전송하고 두 번째 phase에서는 각각의 사용자들은 자신이 중계기 역할을 할 경우 다른 사용자로부터 전송받은 신호를 복호화한 뒤에 기지국으로 재전송을 하게 된다. 본 논문에서는 복잡도를 줄이기 위해서 각 사용자가 중계기 역할을 할 경우 하나의 사용자만을 중계할 수 있도록 가정하였다. 사용자가 중계기 역할을 받지 않은 경우 첫 번째 phase에서 보냈던 신호와 동일한 신호를 다시 보내게 된다. 그 뒤에 기지국에서는 각 사용자들로부터 받은 신호를 MRC(maximal ratio combining) 기법을 이용하여 원하는 정보를 얻게 된다.

위와 같은 시스템 모델에서 첫 번째 phase에서 각 사용자들과 기지국이 받는 신호는 다음과 같다.

$$y_{1ij} = h_{ij}x_i + n_{ij} \quad (1)$$

여기서 $i = 1, 2, \dots, K$ 이고, $j = 1, 2, \dots, K, D, j \neq i$ 이

다. x_i 는 사용자 i 가 보내는 신호이고 h_{ij} 는 사용자 i 와 j 사이의 복소 채널 계수를 의미한다. n_{ij} 는 사용자 i 와 j 사이의 평균이 0인 복소 가산 백색 가우시안 잡음(complex additive white Gaussian noise)이다. 각 사용자가 중계기 역할을 할 때 두 번째 phase에서 기지국이 수신 받는 신호는 다음과 같다.

$$y_{2iD} = h_{iD}\hat{x}_i + n_{iD} \quad (2)$$

여기서 \hat{x}_i 는 중계기 i 에서 복호화한 뒤 재전송되는 신호이다. 또한 사용자가 첫 번째 phase에 자신이 보냈던 신호를 재전송하는 경우 다음과 같은 신호를 기지국에서 받는다.

$$y_{2iD} = h_{iD}x + n_{iD} \quad (3)$$

여기서 채널 계수 h_{ij} 는 경로손실(path loss), 플랫 페이딩(flat fading)을 포함하고 있고 h_{ij} 의 분산이 σ_{ij}^2 이라고 가정한다.

3. 불능 확률 분석 및 사용자 할당

사용자 j 가 사용자 i 에 대한 중계기 역할을 할 때, 복호화재전송 기법을 사용하므로 최대 평균 전송 정보량(average mutual information)은 다음과 같이 주어진다 [2].

$$I_{ij}^{DF} = \min\left(\frac{1}{2}\log_2(1 + SNR|h_{ij}|^2), \frac{1}{2}\log_2(1 + SNR|h_{iD}|^2 + SNR|h_{jD}|^2)\right) \quad (4)$$

이 경우 주파수 효율 R 에 대하여 불능 확률은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$P_{ij}^{out} = \Pr[I_{ij}^{DF} < R] = \Pr[|h_{ij}|^2 < g(SNR)] + \Pr[|h_{ij}|^2 \geq g(SNR)] \cdot \Pr[|h_{iD}|^2 + |h_{jD}|^2 < g(SNR)] \quad (5)$$

여기서 $g(SNR) = (2^{2R} - 1)/SNR$ 이 된다. 채널 모델을 레일리 페이딩으로 가정을 하였기 때문에 $|h_{ij}|^2$ 은 지수 분포(exponentially distributed)를 가지게 되고 그로부터 (5)에서

$$P[|h_{ij}|^2 < g(SNR)] = 1 - \exp\left(-\frac{g(SNR)}{\sigma_{ij}}\right) \quad (6)$$

$$P[|h_{iD}|^2 + |h_{jD}|^2 < g(SNR)] = \frac{1}{\sigma_{iD} - \sigma_{jD}} [\sigma_{jD}\exp(-g(SNR)/\sigma_{jD}) - \sigma_{iD}\exp(-g(SNR)/\sigma_{iD})] + 1 \quad (7)$$

를 얻을 수 있고 이를 (5)에 대입하여 전개 하면 다음과 같은 불능 확률을 얻을 수 있다.

$$P_{ij}^{out} = 1 + \frac{\exp(-g(SNR)/\sigma_{ij})}{\sigma_{iD} - \sigma_{jD}} \cdot [\sigma_{jD}\exp(-g(SNR)/\sigma_{jD}) - \sigma_{iD}\exp(-g(SNR)/\sigma_{iD})] \quad (8)$$

$\sigma_{iD} = \sigma_{jD}$ 일 경우 불능 확률은 다음과 같다.

$$P_{ij}^{out} = 1 - \exp(-g(SNR)(1/\sigma_{ij} + 1/\sigma_{iD})) \cdot (g(SNR)/\sigma_{iD} + 1) \quad (9)$$

사용자 i 가 두 번째 phase에서 중계기 역할을 하지 않고 첫 번째 phase에서 보냈던 신호를 재전송 할 경우 다음과 같은 불능 확률을 얻을 수 있다.

$$P_{ii}^{out} = \Pr[I_{ii}^D < R] = 1 - \exp\left(-\frac{g(SNR)}{2\sigma_{iD}}\right) \quad (10)$$

이제 사용자 할당에 대하여 알아보도록 한다. 두 번째 phase에서 각각의 사용자들이 자신의 신호를 다시 재전송 할지 다른 사용자의 신호를 복호한 뒤에 전송할 지를 정하는 것은 수식 (8), (9), (10)에서 구한 불능 확률을 기준으로 정한다. 본 논문에서 사용자 할당의 목적은 전체적인 시스템 관점에서 전체 불능 확률을 최소화하는데 있다. 그러므로 사용자들을 할당하기 위해서 다음과 같은 식이 만족하도록 사용자 할당한다.

$$\min \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K \alpha_{ij} P_{ij}^{out} \quad (11)$$

여기서 $\sum_{i=1}^K \alpha_{ij} = 1$, $\sum_{j=1}^K \alpha_{ij} = 1$ 를 만족한다. 위의 식을 만족하는 최적의 α_{ij} 를 찾기 위해서는 $K!$ 만큼의 경우의 수가 나오므로 각각에 해당하는 값을 다 구한 뒤에 비교를 해야 하기 때문에 상당한 복잡도를 가지고 있다. 그러므로 위의 시스템에 대하여 여러 가지 선택 방법을 알아보도록 한다.

① 랜덤 선택

가장 간단한 방법으로 두 번째 phase에서 각 사용자의 역할을 임의로 배정한다. 그러므로 각각의 사용자는 불능 확률과는 상관없이 자신이 보냈던 신호를 재전송하거나 임의의 사용자에 대한 중계기 역할을 하게 된다.

② 최소 불능 확률 사용자를 먼저 선택

모든 경우의 수에 대하여 가장 작은 불능 확률을 가지는 순서쌍을 알아낸 뒤에 그 값에 따라 그 값을 가지는 사용자가 재전송할지 중계기 역할을 할지를 결정한다.

③ 임의의 사용자에게 대한 최소 불능 확률 선택

임의의 사용자 i 에 대하여 가장 작은 불능을 가지는 P_{ij} 값을 구하고 그에 따라 해당하는 α_{ij} 값을 1로 하여 재전송과 중계기 역할 중에 하나를 선택한다. 랜덤 선택보다는 복잡도가 높지만 ②의 방법보다는 낮은 복잡도를 가지게 된다.

4. 모의실험

총 $K=20$ 의 사용자가 존재하는 시스템을 고려하였고 모든 사용자들은 기지국을 중심으로 한 셀의 경계에 있다고 가정을 하였고 $R=1\text{bps/Hz}$ 로 두었다.

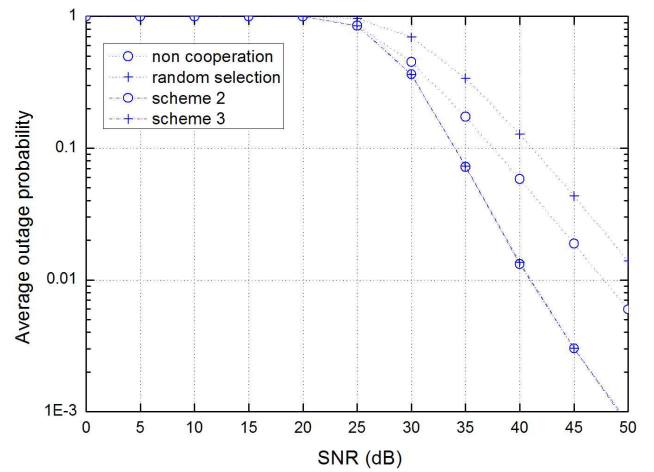


그림 2. 제안된 시스템에서의 평균 불능 확률

그림 2는 신호대잡음비에 따른 제안된 시스템에서의 평균 불능 확률을 보여준다. 그림을 보면 알 수 있듯이 제안된 시스템에서 사용자 선택을 랜덤 선택하였을 경우 협력전송을 안한 경우보다 못한 성능을 보였다. 그리고 ②, ③의 기법 모두 협력전송을 안한 경우보다 월등히 좋은 성능을 보였고 ③의 기법이 ②의 기법에 비해 낮은 복잡도를 가지고 있음에도 불구하고 성능차이는 없음을 알 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 다중사용자가 존재하는 협력 시스템에서 최소의 전체 outage 확률을 가지기 위한 사용자 할당 기법에 대하여 알아보았다. 제안된 시스템 상에서 각각의 경우에 대한 outage 확률을 구해 보았고 그 값을 이용하여 최소의 전체 outage 확률을 가지기 위한 여러 가지 사용자 선택 기법들을 알아보고 그에 대한 컴퓨터 모의실험을 실행하였다. 모의실험 결과 랜덤선택은 협력전송을 하지 않는 경우 보다 못한 성능을 보였고 나머지 선택 기법은 협력전송을 하지 않는 경우 보다 좋은 성능을 보였다.

참고문헌

- [1] A. Nosratinia, T. E. Hunter, and A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 74-80, Oct. 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] M. M. Fareed, and M. Uysal, "On Relay Selection for Decode-and-Forward Relaying," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 7, pp. 3341-3346, July 2009.
- [4] J. Liu, K. Lu, X. Cai, and M. N. Murthi, "Regenerative cooperative diversity with path selection and equal power consumption in wireless networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 8, pp. 3926-3932, Aug. 2009.
- [5] Y. Jing and H. Jafarkhani, "Single and multiple relay selection schemes and their achievable diversity orders," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 3, pp. 1414-1423, Mar. 2009.
- [6] A. Nosratinia and T. E. Hunter, "Grouping and Partner Selection in Cooperative Wireless Networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 369-378, Feb. 2007.
- [7] Y. S. Jung and J. H. Lee, "Partner assignment algorithm for cooperative diversity in mobile communication system," in *Proc. IEEE VTC 2006 Spring*, pp. 1610-1614, May 2006.