

이중 홉 무선 네트워크에서 누적분포함수 기반 중계기 선택 기법

*남응국, **이재홍

서울대학교 전기컴퓨터공학부 뉴미디어통신공동연구소

*eknam@snu.ac.kr

Proactive CDF-based Relay Selection for a Dual-hop Wireless Network

*Eungkuk Nam **Jae Hong Lee

Department of Electrical Engineering and Computer Science, INMC

Seoul National University

요 약

본 논문에서는 이중 홉 무선 네트워크에서 누적분포함수(cumulative distribution function) 기반 중계기 선택 기법을 제안한다. 제안된 기법은 수신 신호대잡음비(signal-to-noise ratio)의 누적분포함수 값에 따라 중계기를 선택한다. 본 논문에서는 제안한 기법의 중계기 공정성에 대한 분석을 통해 제안된 기법이 엄격하게 공정성을 달성할 수 있음을 보인다. 그리고 모의 실험에서는 round-robin 기법과 기회적 중계 기법을 제안된 기법과 총 타임 슬롯에 대한 각 중계기별 타임 슬롯 분배율, 평균 공정성, 불능확률 비교를 통해 제안된 기법이 엄격하게 공정성을 달성하는 것과, 기회적 중계 기법과 거의 동일한 기술기로 불능확률이 떨어지는 것을 확인한다.

1. 서론

협력 통신 기법(cooperative diversity)은 단일 안테나를 가진 통신 기기들이 가상 안테나 집합체(virtual antenna array)를 형성하여 다중 안테나 시스템(MIMO : Multiple Input Multiple Output)과 동일한 다이버시티(diversity)를 얻을 수 있는 기법으로 소개되면서 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 중계기로는 고정된 기지국, 중계기로서만 사용되는 통신 기기들 뿐만 아니라 서비스 수요자들의 통신 기기들도 중계기로 이용되므로, 최근에는 중계기 공정성(fairness)에 대한 관심도 커지고 있다[2].

협력 통신 기법 중 기회적 중계 기법(opportunistic relaying)은 채널 이득(channel gain)을 고려하여 가장 좋은 중계기를 하나만 선택한 다음 협력 통신 하는 방법으로, 다중 중계기를 이용하는 분산된 시공간 부호화 기법(distributed space-time coding)에 비해 상대적으로 더 낮은 복잡도로 동일한 다이버시티를 얻을 수 있고, 가장 낮은 불능확률을 달성한다는 장점이 있다[3]. 그러나 기회적 중계 기법은 중계기 공정성이 떨어지기 때문에, 중계기들이 배터리가 장착된 서비스 수요자의 통신 기기일 경우, 중계기들의 파워를 불공정하게 소모시킬 수 있다는 단점을 가진다. 중계기 공정성을 고려하는 기법에는 중계기들의 채널 상태를 고려하지 않고 순서대로 중계기를 사용하는 round-robin 기법이 있다. 이 기법은 중계기 공정성을 최적으로 보장하는 반면에 다이버시티를 얻지 못해 불능확률이 높다는 단점이 있다.

본 논문에서는 중계기 공정성을 보장하면서 기회적 중계 기법과 동일한 다이버시티를 얻을 수 있는 누적분포함수(cumulative distribution function) 기반 중계기 선택 기법을

제안한다. 제안된 기법은 중계기에서 서비스 제공자로부터 온 신호의 수신 신호대잡음비(signal-to-noise ratio)의 누적분포함수 값과 서비스 수요자에서 중계기로부터 온 신호의 수신 신호대잡음비의 누적분포함수 값 중 작은 값이 다른 중계기에 비해 가장 큰 중계기를 선택한다. 본 논문에서는 제안한 기법의 중계기 공정성에 대한 분석을 한다. 그리고 모의 실험에서는 round-robin 기법과 기회적 중계 기법을 제안된 기법과 총 타임 슬롯에 대한 각 중계기별 타임 슬롯 분배율, 평균 공정성, 불능확률을 비교한다.

2. 시스템 모델

하나의 서비스 제공자와 하나의 서비스 수요자가 존재하고 서비스 제공자와 서비스 수요자 사이에 중계기들이 존재하는 이중 홉 무선 네트워크를 고려하자. 각 통신 기기들은 단일 안테나를 가졌고, 모든 기기들은 송신과 수신을 동시에 할 수 없다고 가정한다. 또한 서비스 제공자와 서비스 수요자 사이에 직접적인 통신 경로는 없고 중계 방식은 복호후재전송 기법(decode-and-forward)기법을 사용한다고 가정한다. 서비스 제공자는 두 단계를 통하여 정보를 서비스 수요자에게 전달한다.

첫 번째 단계에서는 서비스 제공자가 정보를 먼저 선택된 중계기에게 정보를 전달한다. 서비스 제공자로부터 신호를 수신한 후, 선택된 중계기는 그 신호를 재부호화(re-encoding)를 한다. 두 번째 단계에서는 선택된 중계기가 재부호화한 신호를 서비스 수요자에게 송신한다.

3. 제안된 기법

각 중계기는 중계기에서 서비스 제공자로부터 온 신호의 수신 신호대잡음비(signal-to-noise)와 서비스 수요자에서 중계기로부터 온 신호의 수신 신호대잡음비의 분포를 안다고 가정한다. $F_{\Gamma_{k,1}}(\gamma_{k,1})$ 과 $F_{\Gamma_{k,2}}(\gamma_{k,2})$ 를 각각 중계기 r_k 에서 서비스 제공자로부터 온 신호의 수신 신호대잡음비 $\Gamma_{k,1}$ 와 서비스 수요자에서 중계기 r_k 로부터 온 신호의 수신 신호대잡음비 $\Gamma_{k,2}$ 와 누적분포함수(cumulative distribution function)라고 하자. 그러면 중계기는 다음과 같은 방법으로 선택된다.

$$r^* = \arg \max_{r_k} \left\{ \min \left\{ F_{\Gamma_{k,1}}(\gamma_{k,1}), F_{\Gamma_{k,2}}(\gamma_{k,2}) \right\} \right\}. \quad (1)$$

중계기가 선택이 되면 다른 중계기들은 가동되지 않은 상태가 되며, 서비스 제공자는 오직 선택된 중계기 r^* 에게만 정보를 송신한다. 선택된 중계기 r^* 는 수신한 정보를 복호 후 재부호화 한 후 서비스 수요자에게 정보를 제공한다.

3.1 중계기 공정성

중계기 선택에 대한 공정성 비교를 위한 척도로 논문 [4]에서 제안한 공정성 비교 척도를 이용한다. 중계기 r_k 의 자가 공정성(self-fairness)를 다음과 같이 정의한다.

$$f_k = -\frac{\log_2(\zeta_k)}{\log_2(K)}. \quad (2)$$

여기서, ζ_k 는 전송을 위해 중계기에 할당된 총 타임 슬롯 중 중계기 r_k 에 할당된 타임 슬롯의 비율을 의미한다. ζ_k 는 다음과 같다.

$$\zeta_k = \frac{\Pr(r^* = r_k)}{\sum_{j=1}^K \Pr(r^* = r_j)}. \quad (3)$$

총 K 개의 중계기를 갖는 네트워크의 평균 공정성은 다음과 같이 정의한다.

$$F = \sum_{k=1}^K \zeta_k f_k = -\sum_{k=1}^K \zeta_k \frac{\log_2(\zeta_k)}{\log_2(K)}. \quad (4)$$

만약 평균 공정성 F 는 1 의 값을 가지면, 중계기 사이에 공정성이 엄격하게 이루어짐을 의미한다. 제안된 기법에서는 아무 중계기도 선택되지 않는 경우는 없으므로, ζ_k 는 중계기 r_k 가 선택될 확률과 동일하다.

Γ_k 를 서비스 수요자에서 서비스 제공자로부터 중계기 r_k 를 거쳐 온 신호의 수신 신호대잡음비라고 하고, U_k 를 누적분포 함수로 $F_{U_k}(u_k) = \Pr\{\Gamma_k \leq F_{\Gamma_k}^{-1}(u_k)\}$ 를 갖는 랜덤변수라고 하자. 그러면, 중계기 r_k 가 선택될 확률은 다음과 같다.

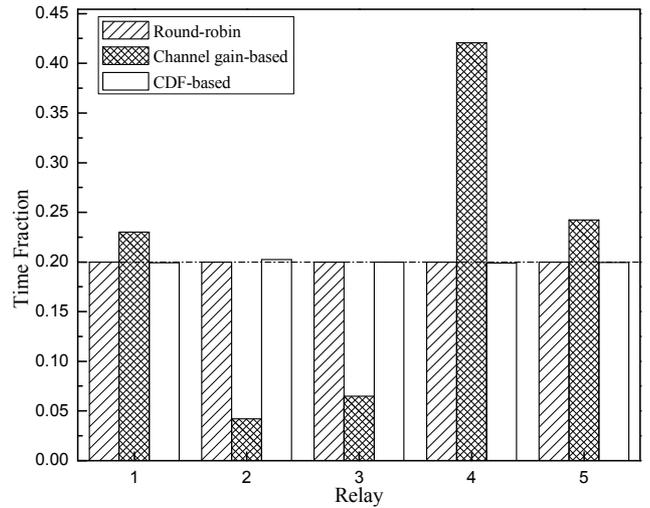


그림 1. 각 기법들에 대한 타임 슬롯 분배율

$$\Pr(r^* = r_k) = \int_0^1 \Pr(U_j < u_k, \forall r_j \neq r_k) f_{U_k}(u_k) du_k = \int_0^1 \left(\prod_{j=1, j \neq k}^K F_{U_j}(u_k) \right) f_{U_k}(u_k) du_k. \quad (5)$$

논문 [5]에서 U_k 는 0 과 1 사이에 서로 독립적인 균등분포를 가짐을 보였으므로, 중계기 r_k 가 선택될 확률은 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\Pr(r^* = r_k) = \int_0^1 (F_{U_k}(u_k))^{K-1} f_{U_k}(u_k) du_k = \frac{1}{K}. \quad (6)$$

수식 (6)에서 나온 결과를 평균 공정성 수식 (4)에 대입을 하면, 평균 공정성 F 는 1 의 값을 가지는 것을 알 수 있다. 따라서 제안된 기법은 공정성이 엄격하게 이루어짐을 알 수 있다.

4. 모의 실험

다음은 제안된 기법의 모의 실험 결과를 보이고자 한다. 서비스 제공자와 서비스 수요자 사이에 중계기는 총 5 개가 있다고 가정한다. 그리고 모든 채널은 블록 레일레이 페이딩을 가정한다. 서비스 제공자와 중계기들 사이의 채널 분산은 $0.2+i$, $i=1, 2, 3, 4, 5$ 로 설정하였고, 중계기들과 서비스 수요자 사이의 채널 분산도 $0.2+i$, $i=1, 2, 3, 4, 5$ 로 설정하였다.

그림 1 은 round-robin 기법, 기회적 중계 기법, 그리고 제안한 누적분포함수 기반 기법에 대한 총 타임 슬롯에 대한 각 중계기별 타임 슬롯 분배율을 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, round-robin 기법과 제안된 기법이 가장 공정하게 타임 슬롯이 분배되었고, 제안된 기법 또한 round-robin 기법과 마찬가지로 공정하게 타임 슬롯이 분배되었음을 볼 수 있다. 그러나 기회적 중계 기법은 각 중계기마다 서로 다르게 분배되고 있음을 볼 수 있다.

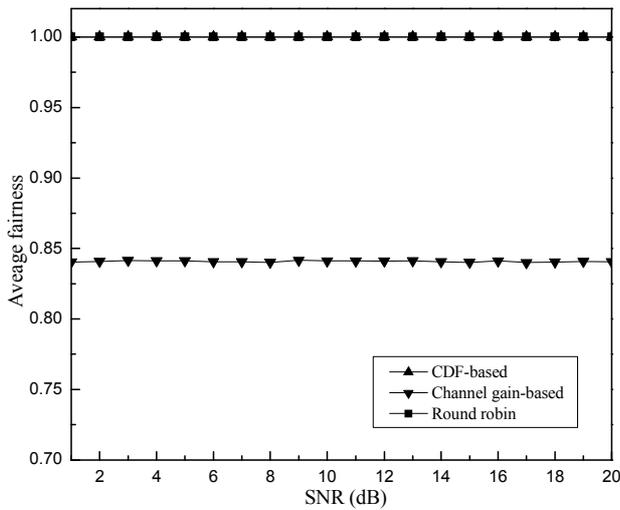


그림 2. 각 기법들에 대한 평균 공정성 비교

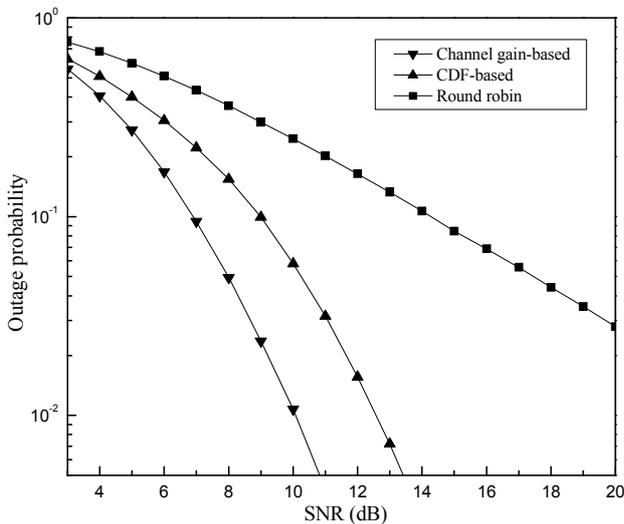


그림 3. 각 기법들에 대한 불능확률 비교

그림 2는 각 기법들에 대한 총 5개 중계기의 평균 공정성을 보여준다. 1에 가까울수록 더 엄격하게 공정성을 달성하는 것을 알 수 있다. 그림에서 보면, 가장 엄격하게 공정성이 달성되는 round-robin 기법과 마찬가지로, 제안된 누적분포함수 기반 기법도 엄격하게 공정성이 달성되는 것을 볼 수 있다. 이와 달리, 기회적 중계 기법은 다른 두 기법과 달리, 엄격하게 공정성이 달성되지 않는 것을 볼 수 있다.

그림 3은 각 기법들에 대한 불능확률에 대한 결과를 보여준다. 여기서 기회적 중계 기법이 가장 좋은 성능을 보이고 있음을 볼 수 있다. 그리고 가장 엄격하게 공정성을 달성한 round-robin 기법은 가장 열악한 성능을 보임을 알 수 있다. 반면에 제안된 기법은 비록 기회적 중계 기법보다는 성능이 열악하지만 round-robin 기법보다는 더 좋은 성능을 달성하고, 기회적 중계 기법과 거의 동일한 기율기로 불능확률이 떨어지는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 이중 홉 무선 네트워크에서 누적분포함수 기반 중계기 선택 기법이 제안되었다. 중계기에서 서비스 제공자로부터 온 신호의 수신 신호대잡음비의 누적분포함수 값과 서비스 수요자에서 중계기로부터 온 신호의 수신 신호대잡음비의 누적분포함수 값 중 작은 값이 다른 중계기에 비해 가장 큰 중계기를 선택하여 서비스 제공자의 정보를 서비스 수요자에게 전달하는 역할을 한다. 이와 관련하여 중계기 공정성에 대한 분석을 하였고, 제안된 기법이 엄격하게 공정성을 달성하였음을 알 수 있었다. 컴퓨터 모의 실험에서는 round-robin 기법, 기회적 중계 기법과 함께 총 타임 슬롯에 대한 각 중계기별 타임 슬롯 분배율, 평균 공정성, 불능확률을 비교하였다. 모의 실험에서 제안된 기법이 round-robin 기법과 함께 엄격하게 공정성을 달성하는 것을 볼 수 있었고, 기회적 중계 기법에 비해 불능확률 성능은 열악하지만 거의 동일한 기율기로 불능확률이 떨어지는 것을 볼 수 있었다.

6. 감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2012-0000919, 2012-0005692)

본 연구는 방송통신위원회의 차세대통신네트워크원천기술 개발사업의 연구결과로 수행되었음 (KCA-08-911-04-003)

Reference

- [1] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: effective protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dec. 2004.
- [2] M. Salem, A. Adinoyi, H. Yanikomeroglu, and D. Falconer, "Opportunities and challenges in OFDMA-based cellular relay networks: a radio resource management perspective," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 5, pp. 2496–2510, June 2010.
- [3] A. Bletsas, H. Shin, and M. Z. Win, "Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 9, pp. 3450–3460, Sep. 2007.
- [4] R. Elliott, "A measure of fairness of service for scheduling algorithms in multiuser systems," in *Proc. IEEE CCECE 2002*, Winnipeg, Canada, May 2002.
- [5] D. Park, H. Seo, H. Kwon, and B. G. Lee, "Wireless packet scheduling based on the cumulative distribution function of user transmission rates," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 11, pp. 1919–1929, Nov. 2005.