나카가미-m 페이딩 채널 환경을 가진 무선 중계 네트워크에서 reactive 누적분포함수 기반 중계기 선택 기법

*남응국, **박진현, 이재홍
서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소
*eknam@snu.ac.kr

Reactive CDF-based Relay Selection for Wireless Relay Networks over Nakakami-m Fading Channels

*Eungkuk Nam, **Jinhyun Park, and Jae Hong Lee
Department of Electrical and Computer Engineering, INMC
Seoul National University

요 약

본 논문에서는 나카가미-m 페이딩 채널 환경을 가진 무선 중계 네트워크에서 reactive 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 불능 확률(outage probability)과 다이버시티 차수(diversity order)를 분석한다. 제안된 기법이 얻을 수 있는 다이버시티 차수는 중계기의 개수와 페이딩 파라미터에 의해 결정되며 최대 다이버시티(full diversity)를 얻음을 볼 수 있다. 그리고 모의 실험에서는 분석된 불능 확률 및 다이버시티 차수가 정확하게 일치하는 것을 확인한다.

1. 서론

협력통신기법(cooperative diversity)은 중계기를 사용하여 발생할 수 있는 무선 장애(impairment)를 피하고, 공간 다이버시티(spatial diversity)를 얻을 수 있는 기법이다 [1]-[4]. 다중 중계기가 존재하는 무선 네트워크에서는 다양한 중계기 선택 기법이 연구되고 성능 분석되고 있다[2], [3].

협력통신에서는 고정된 기지국 뿐만 아니라 제한된 배터리 용량을 가진 단말기 등도 중계기로 이용될 수 있다 [4]. 제한된 배터리 용량을 가진 단말기가 중계기로 사용되는 네트워크에서는 네트워크 수명을 길게 유지하기 위해 정보 전달의 신뢰도 뿐 아니라 중계기 공정성 (relay fairness)도 함께 고려한 필요가 있다. 그러나 대부분의 중계기 선택 기법들은 수신자에서의 신뢰도 성능에 대부분 초점이 맞춰져 있다.

본 논문에서는 중계기 공정성을 보장하면서 채널 이득(channel gain) 기반 중계 기법과 같이 최대 다이버시티를 얻을 수 있는 누적분포함수 (cumulative distribution function) 기반 중계기 선택 기법을 제안한다. 그리고 제안된 기법의 불능 확률 및 다이버시티 차수를 분석한다. 컴퓨터 모의 실험에서는 분석된 불능 확률 및 다이버시티 차수가 정확하게 일치하는 것을 확인한다.

2. 시스템 모델

단일 송신기와 단일 수신기가 존재하고 송신자와 수신자 사이에 K 개 중계기 집합 $\mathrm{R}=\{r_1, r_2, \cdots, r_K\}$ 가 존재하는 무선 중계 네트워크를 고려하자. 각 통신 단말기들은 단일 안테나를 가졌고, 모든 단말기들은 송신과 수신을 동시에 할 수 없다고 가정한다. 또한 송신기와 수신기 사이에 직접적인 통신 경로는 없고 모든 채널은 나카가미(Nakagami)-m 페이딩 채널로 가정한다. 중계 방식은 복호후재전송(decode-and-forward) 기법을 사용한다고 가정한다.

송신기는 수신기와 두 개의 단계를 통해 정보를 전송한다. 첫 번째 단계에서는 송신기가 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

송신자는 두 단계를 통해 정보를 수신자에게 전달한다. 첫 번째 단계에서는 먼저 송신자가 정보를 모든 중계기에게 보낸다. 송신자로부터 온 신호를 받은 중계기들은 수신 신호의 복호화를 시도한다. 중계기들 중 수신 신호를 성공적으로 복호화한 중계기들의 집합을 C 로 놓자. 그리고 중계기 r_k

에서 수신자로 보낸 신호의 수신 신호대잡음비 $\Gamma_{r_k,D}$ 의 누적분포함수를 $F_{\Gamma_{r_k,D}}(\gamma_{r_k,D})$ 로 놓자. 그러면, 각 중계기의 순간 수신 신호대잡음비가 $\gamma_{r_k,D}$ 를 가질 때, 중계기는 다음과 같이 선택된다.

$$r^* = \arg\max_{r_k \in C} F_{\Gamma_{r_k,D}}(\gamma_{r_k,D}). \quad (1)$$

즉, 중계기 집합 C 에 속한 중계기 중, 중계기에서 수신자에 보낸 신호의 수신 신호대잡음비의 누적분포함수의 값이 가장 큰 중계기를 선택한다. 두 번째 단계에서 선택된 중계기는 수신한 신호를 재부호화를 한 후, 재부호화한 신호를 수신자에게 송신한다.

3.1 불능확률 분석

복호화에 성공한 중계기가 하나도 없거나 중계기가 선택은 되었으나 수신자에 보낸 신호의 수신 신호대잡음비가 임계값 γ_{th} 보다 작은 경우에 불능(outage)이 발생한다. 이를 토대로 불능 확률을 구하면 다음과 같다.

$$P_{out} = \sum_{k=1}^{K} \int_0^{\gamma_{th}} \Pr(r^* = r_k | \Gamma_{r_k,D} = \gamma) f_{\Gamma_{r_k,D}}(\gamma) d\gamma + \prod_{i=1}^{K} \Pr(\Gamma_{S,r_i} < \gamma_{th}). \quad (2)$$

여기서 $f_{\Gamma_{r_k,D}}(\cdot)$ 는 $\Gamma_{r_k,D}$ 의 확률밀도함수를 말한다. 중계기 집합 R 의 모든 부집합 중 r_k 를 갖고 원소의 개수 l 개를 가지는 부분집합은 총 ${}_{K-1}C_{l-1}$ 개를 가진다. $R_{l,n}^k$ 를 ${}_{K-1}C_{l-1}$ 개의 부집합 중 n 번째 부분집합이라고 놓자. 불능 확률은 다음과 같이 작성할 수 있다.

$$P_{out} = \sum_{k=1}^{K} \sum_{l=1}^{K} \sum_{n=1}^{{}_{K-1}C_{l-1}} \Pr(\mathrm{C}=\mathrm{R}_{l,n}^k) \int_0^{\gamma_{th}} \Pr(r^*=r_k | \Gamma_{r_k,D}=\gamma, \mathrm{C}=\mathrm{R}_{l,n}^k) \times f_{\Gamma_{r_k,D}}(\gamma) d\gamma + P_{nc}. \quad (3)$$

여기서 P_{nc} 는 모든 중계기들이 복호화에 실패할 확률을 말한다. 채널을 나카가미$-m$ 페이딩으로 가정하였으므로, 수신 신호대잡음비 $\Gamma_{i,j}$ 는 $m_{i,j}$ 를 파라미터로 가지는 감마 분포 랜덤 변수이다. 따라서, 확률 P_{nc} 는 다음과 같이 구해진다.

$$P_{nc} = \prod_{i=1}^{K} \frac{\gamma\left(m_{S,r_i}, \frac{m_{S,r_i}\gamma_{th}}{\overline{\gamma}_{S,r_i}}\right)}{\Gamma(m_{S,r_i})}. \quad (4)$$

여기서, $\overline{\gamma}_{S,r_k}$ 는 평균 SNR 을 의미한다. 수식 (2)에서 $\Gamma_{r_k,D} = \gamma, \mathrm{C} = \mathrm{R}_{m,n}^k$ 조건 하에 중계기 r_k 가 선택될 확률은 다음과 같다.

$$\Pr(r^* = r_k | \Gamma_{r_k,D} = \gamma, \mathrm{C} = \mathrm{R}_{m,n}^k) = (F_{\Gamma_{r_k,D}}(\gamma))^{l-1}. \quad (5)$$

수식 (3)과 (5)를 통해 불능확률을 구하면 다음과 같다.

$$P_{out} = \sum_{k=1}^{K} \sum_{m=1}^{K} \sum_{n=1}^{\binom{K-1}{m-1}} \Pr(C = R_{m,n}^k) \int_0^{\gamma_{th}} (F_{\Gamma_{r_k,D}}(\gamma))^{m-1} f_{\Gamma_{r_k,D}}(\gamma) d\gamma + P_{nc} = \sum_{k=1}^{K} \sum_{m=1}^{K} \sum_{n=1}^{\binom{K-1}{m-1}} \frac{1}{m} \Pr(C = R_{m,n}^k) (F_{\Gamma_{r_k,D}}(\gamma_{th}))^m + P_{nc}. \quad (6)$$

높은 SNR 영역에서는 불완전 감마 함수는 다음과 같이 근사된다 [5].

$$\gamma\left(m_{i,j}, \frac{m_{i,j}x}{\overline{\gamma}_{i,j}}\right) \approx \frac{1}{m_{i,j}} \left(\frac{m_{i,j}x}{\overline{\gamma}_{i,j}}\right)^{m_{i,j}}. \quad (7)$$

따라서, 수식 (3)과 (7)을 통해 불능확률은 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$P_{out} \approx \sum_{k=1}^{K} \sum_{m=1}^{K} \sum_{n=1}^{\binom{K-1}{m-1}} \frac{1}{m} \left\{ \frac{1}{m_{r_k,D}\Gamma(m_{r_k,D})} \left(\frac{m_{r_k,D}\gamma_{th}}{\overline{\gamma}_{r_k,D}}\right)^{m_{r_k,D}} \right\}^m \times \prod_{r_j \notin R_{m,n}^k} \frac{1}{m_{S,r_j}\Gamma(m_{S,r_j})} \left(\frac{m_{S,r_j}\gamma_{th}}{\overline{\gamma}_{S,r_k}}\right)^{m_{S,r_j}} + \prod_{i=1}^{K} \frac{1}{m_{S,r_i}\Gamma(m_{S,r_i})} \left(\frac{m_{S,r_i}\gamma_{th}}{\overline{\gamma}_{S,r_k}}\right)^{m_{S,r_i}}. \quad (7)$$

수식 (7)번을 통해 다이버시티 차수는 다음과 같이 구해진다.

$$d = \min\left\{ K \min\{m_{r_1,D}, m_{r_2,D}, \cdots, m_{r_K,D}\}, \sum_{i=1}^{K} m_{S,r_i} \right\}. \quad (8)$$

4. 모의 실험

그림 1 은 중계기의 수와 파라미터 값을 변화시킴에 따른 불능 확률을 나타내는 그래프이다. 간단히 하기 위해 $m = m_{S,r_k} = m_{r_k,D}$ 로 놓자. 그림 1 에서 보는 바와 같이, 모의 실험 결과와 수식이 서로 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 그리고 m 값이 커질수록, 중계기 수가 증가할수록 다이버시티 차수가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그림 2 는 송신기와 중계기, 중계기와 수신기 사이의 다양한 파라미터 값을 통한 불능 확률을 비교한 그래프이다. $\mathbf{m}_{S,r_k}$, $\mathbf{m}_{r_k,D}$ 를 다음과 같이 $\mathbf{m}_{S,r_k} = \{m_{S,r_1}, m_{S,r_2}, \cdots, m_{S,r_K}\}$ 와 $\mathbf{m}_{r_k,D} = \{m_{r_1,D}, m_{r_2,D}, \cdots, m_{r_K,D}\}$ 로 놓자. 그림 2 에서 보는 바와 같이, 수식(7)에서 구한 다이버시티 차수와 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 또한 파라미터 값이 클수록 더 큰 코딩 이득을 획득하는 것을 확인할 수 있다.

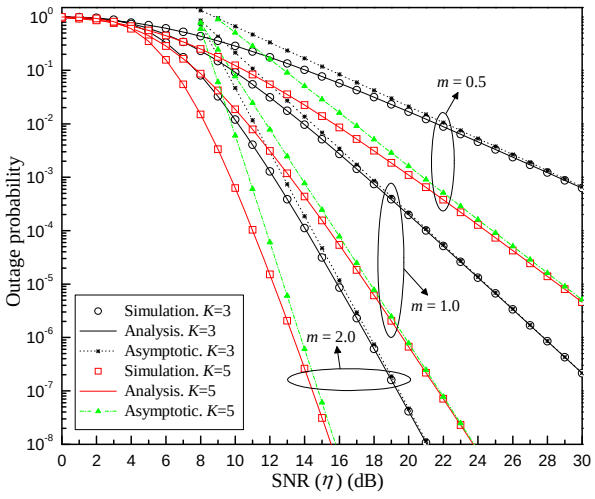

그림 1. 중계기 수와 파라미터에 의한 불능확률 비교

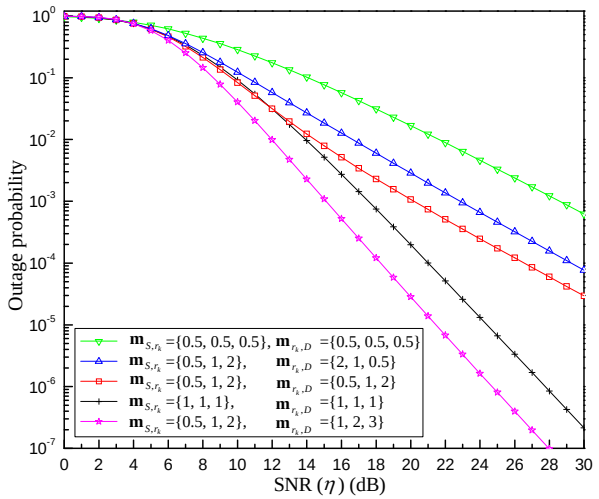

그림 2. 다양한 파라미터에 의한 불능확률 비교

5. 결론

본 논문에서는 나카가미-m 페이딩 채널 환경을 고려한 무선 중계 네트워크에서 수신 신호대잡음비의 누적분포함수 기반 중계기 선택 기법이 제안되었다. 송신기로부터 온 신호에 대한 복호화를 성공한 중계기들 중에서 수신기에서 중계기로부터 온 신호의 수신 신호대잡음비의 누적분포함수 값이 가장 큰 중계기를 선택하여 수신기에게 정보를 전달한다. 제안된 기법에 대하여 불능 확률 및 다이버시티 차수를 분석하였다. 컴퓨터 모의 실험에서는 분석한 결과와 정확히 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 분석한 결과와 같이 파라미터 값이 증가할수록, 중계기의 수가 증가할수록 더 작은 불능확률을 얻는 것을 확인할 수 있었다.

6. 감사의 글

이 논문은 2015 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0083495, 2011-0017437)

References

[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] 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.

[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] D. Soldani and S. Dixit, "Wireless relays for broadband access," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 3, pp. 58-66, Mar. 2008.

[5] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, 7/e. Academic Press, 2007.