

다중 사용자 간섭이 존재하는 복호 후 전송 협력통신 시스템의 비트오류율 분석

김성일 허준

고려대학교

{dudux, junheo}@korea.ac.kr

Exact Bit Error Probability of Opportunistic Decode-and-Forward Cooperative System with Multiple Interferers

Kim, Sung-Il Heo, Jun

Korea University

요약

본 논문에서는 다중 사용자 간섭이 존재하는 복호 후 전송 협력통신 시스템의 비트오류율에 대해 기술한다. 최근 공간 다이버시티를 위한 협력통신 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있고 모바일 사용자의 수와 요구가 점점 증가하고 있는 추세이다. 한정된 자원 및 공간에서 모바일 사용자가 증가함에 따라 사용자 간의 간섭현상이 더욱 빈번하게 나타나게 되는데 이는 무선통신 시스템의 중요한 문제 중 하나이다. 따라서 릴레이(Relay) 기반 협력통신 시스템에서도 일반적인 무선통신 시스템과 같이 다중 사용자 간섭을 고려하는 것이 필요하다고 볼 수 있다. 본 논문에서는 다중 릴레이 기반 복호 후 전송(Decode-and-Forward) 프로토콜에서 릴레이 및 목적노드에 다중 간섭이 존재하는 경우의 비트오류율에 대해 분석한다.

1. 서론

최근 이동통신 시스템에서는 공간 다이버시티(Spatial diversity)의 효과를 얻기 위해 다중 릴레이 네트워크에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이를 통해 셀의 전송범위의 확장이나 네트워크의 성능 향상, 전송량 증대, 다이버시티 효과 등을 얻을 수 있다[1]. 릴레이의 방식 중 복호 후 전송(Decode-and-Forward) 방식은 릴레이로 전송된 정보를 복호 한 후 다시 목적노드로 전송하는 방식을 의미하며 가장 보편적인 릴레이 송신 방식 중 하나이다. 복호 후 전송 방식의 릴레이를 이용하는 협력통신 시스템의 성능을 향상시키는 방법으로 다중 릴레이를 사용하는 프로토콜이 많이 연구 되어 왔다. 다중 릴레이를 사용하는 방식 중 opportunistic relaying은 다중의 릴레이 경로 중 가장 좋은 성능을 보장하는 경로로 정보를 전송함으로써 효율적인 전송을 가능하게 한다[2]. Opportunistic relaying을 사용함으로써 협력통신 시스템은 하나의 릴레이 선택만으로도 space-time-coding을 이용한 협력통신 시스템[3]과 같은 다이버시티 효과를 가지게 된다.

무선통신 시스템에서 간섭신호의 영향은 중요한 문제 중 하나이다. 모바일 사용자가 늘어남에 따라 한정된 자원 및 공간에 따른 간섭현상의 증가는 필연적이기 때문에 릴레이를 이용한 협력통신 시스템에서도 간섭신호에 의한 영향을 고려하는 것이 필요하며 기존의 연구에서 몇 가지 릴레이 프로토콜에서의 간섭의 영향을 고려하였다[4]-[7]. 기존의 연구에서는 다중 증폭 후 전송(Amplify-and-Forward) 릴레이 네트워크에서의 릴레이 선택 방법 및 outage 확률 분석[4], [5]에 관한 연구가 진행 되었고 다중 복호 후 전송 릴레이 네트워크의 outage 확률[6], [7]에 관한 연구가 진행되었다. 기존의 연구에서는 다중 릴레이 환경에서 opportunistic relaying을 이용하여 릴레이

이 선택을 하였을 경우 릴레이 및 목적노드에 가해지는 간섭 신호에 의한 협력통신 시스템의 성능 열화 정도에 대해 분석하였다. 하지만 복호 후 전송 다중 릴레이 네트워크에서 간섭 신호에 의한 효과를 물리 계층에서의 중요한 성능 측정 지표인 비트오류율(Bit error rate)에 대해 분석한 연구는 아직 진행되지 않았다.

본 논문에서는 다중 사용자 간섭이 존재하는 복호 후 전송 협력통신 시스템의 비트오류율에 대해 분석한다. 각각의 릴레이 및 목적노드에 서로 다른 다중 간섭이 존재할 경우의 성능 열화 정도에 대해 비트오류율을 바탕으로 한 분석을 제시한다. 다중 간섭신호의 고려를 통해 다중 릴레이 네트워크의 보다 실제적인 성능 예측에 본 연구결과가 도움이 될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 하나의 송신단(S)과 M 개의 릴레이(R), 하나의 목적노드(D)가 존재하는 릴레이 네트워크를 가정하였다. 간섭신호는 각 릴레이 마다 N_R 개의 서로 다른 간섭이 존재하며 N_D 개의 서로 다른 간섭이 목적노드에 존재한다고 가정하였다. 각 릴레이는 half-duplex로 동작하며 각 채널은 독립적인 Rayleigh fading을 따른다.

각 릴레이 및 목적노드에서의 받은 신호는 다음과 같다.

$$y_{sr_i} = h_{sr_i} \sqrt{P_{sr_i}} x + \sum_{j=1}^{N_R} h_{r_j}^I \sqrt{P_{r_j}^I} x'_{r_j} + n_i, \quad (1)$$

$$y_{r,d} = h_{r,d} \sqrt{P_{r,d}} x + \sum_{j=1}^{N_D} h_{d_j}^I \sqrt{P_{d_j}^I} x'_{d_j} + n_d \quad (2)$$

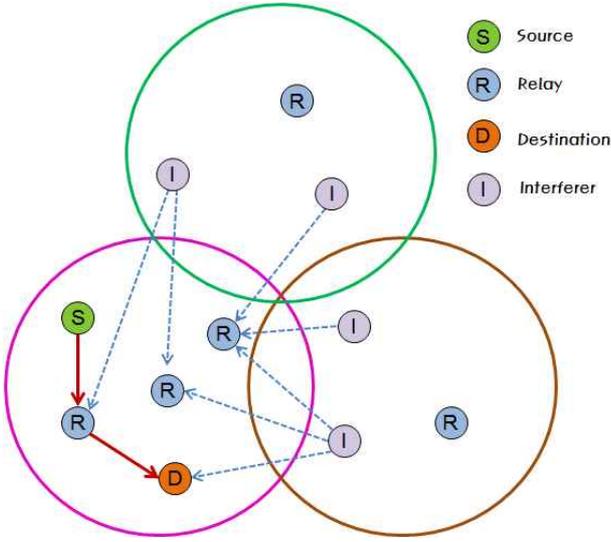


그림 1. 간섭이 존재하는 다중 릴레이 네트워크

여기서 x 는 보내고자 하는 신호, h 와 h^I 는 각 채널과 간섭신호 채널의 계수, P 와 P^I 는 각 채널과 간섭신호의 세기를 의미하고 n 은 백색 가우시안 잡음(Additive white Gaussian noise)을 의미한다. 따라서 각 수신 단에서의 신호 대 간섭신호 및 잡음비(Signal to noise and interference ratio : SINR)은 다음과 같다.

$$\gamma_{SR_i} = \frac{\gamma_{sr_i}}{\sum_{j=1}^{N_R} \gamma_{r_j}^I + 1}, \gamma_{R_iD} = \frac{\gamma_{r_i,d}}{\sum_{j=1}^{N_D} \gamma_{d_j}^I + 1} \quad (3)$$

γ 와 γ^I 는 각 채널 및 간섭 신호의 신호 대 잡음비(Signal to noise ratio : SNR)를 의미하며, 신호 대 간섭신호 및 잡음비와 간섭신호의 세기를 제외한 신호 대 잡음비는 γ 의 첨자의 대소문자로 구분한다. 복호 후 전송을 이용하는 다중 릴레이의 선택은 다음과 같은 순서를 따른다. 먼저 송신단은 모든 릴레이로 전송하고자 하는 정보를 동시에 전송한다(broadcast). 그 후 릴레이에서 복호에 성공한 릴레이 중 가장 좋은 신호 대 잡음비를 가지는 릴레이-목적노드 경로를 선택해 정보를 전송한다. 릴레이 선택 과정은 아래 식과 같이 나타난다.

$$b = \operatorname{argmax}_j \{ \gamma_{r,d} \} \quad (4)$$

b 는 가장 좋은 신호 대 잡음비를 가지는 R-D 경로를 의미한다.

3. 성능 분석

앞에서 보인 복호 후 전송 릴레이 프로토콜의 성능 분석을 위해 S-R 경로의 신호 대 간섭신호 및 잡음비의 확률밀도함수(Probability density function : PDF)는 다음과 같이 나타난다[8].

$$f_{\gamma_{SR_i}}(x) = \frac{\exp(-x/\lambda_{sr_i})}{\lambda_{sr_i}} \sum_{j=1}^{N_R} \sum_{p=1}^2 \left(\prod_{\substack{k=1, \\ k \neq j}}^{N_R} \frac{\lambda_{r_j}^I}{\lambda_{r_j}^I - \lambda_{r_k}^I} \right) \times \frac{(\lambda_{sr_i})^p}{\lambda_{r_j}^I (x + \lambda_{sr_i}/\lambda_{r_j}^I)^p} \quad (5)$$

λ 와 λ^I 는 각 채널과 간섭신호의 평균 신호 대 잡음 비를 의미한다. 확률 밀도함수 (5)의 적률생성함수(Moment generating function)은 다음과 같이 나타난다.

$$M_{\gamma_{SR_i}}(s) = E(\exp(-sx)) = \sum_{j=1}^{N_R} \left(\prod_{\substack{k=1, \\ k \neq j}}^{N_R} \frac{\lambda_{r_j}^I}{\lambda_{r_j}^I - \lambda_{r_k}^I} \right) \left[1 + \frac{\lambda_{sr_j} s}{\lambda_{r_j}^I} \times \exp\left(\frac{1 + \lambda_{sr_j} s}{\lambda_{r_j}^I} \right) Ei\left(\frac{-1}{\lambda_{r_j}^I} (1 + \lambda_{sr_j} s) \right) \right] \quad (6)$$

$Ei(\cdot)$ 는 지수 적분 함수(exponential integral function)으로 다음과 같이 정의된다[9].

$$Ei(x) = \int_{-\infty}^x e^t/t dt \quad (7)$$

이를 바탕으로 한 S-R 경로의 비트오류율은 다음과 같다[10].

$$P_{SR_i} = E_i = \sum_{j=1}^{N_R} \left(\prod_{\substack{k=1, \\ k \neq j}}^{N_R} \frac{\lambda_{r_j}^I}{\lambda_{r_j}^I - \lambda_{r_k}^I} \right) \phi(\alpha, \beta, \lambda_{sr_i}, \lambda_{r_j}^I) \quad (8)$$

α, β 는 다양한 변조 기법을 나타내기 위한 식 $P_b = \alpha Q(\sqrt{\beta\gamma})$ 의 계수를 의미하며 ($Q(x) = (1/\sqrt{2\pi}) \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt$)는 q-함수를 나타냄[9]) 정의된 식 $\phi(\alpha, \beta, \gamma, \eta)$ 은 다음과 같다.

$$\phi(\alpha, \beta, \gamma, \eta) = \frac{\alpha}{2} + \frac{\alpha\gamma}{2\eta} \exp\left(\frac{1}{\eta}\right) \int_0^{\pi/2} \frac{\beta}{2\sin^2\theta} \times \exp\left(\frac{\gamma\beta}{2\eta\sin^2\theta}\right) Ei\left(-\frac{1}{\eta} \left(1 + \frac{\gamma\beta}{2\sin^2\theta}\right)\right) d\theta \quad (9)$$

시스템 모델에서 제시한 복호 후 전송 릴레이 네트워크의 성능을 나타내기 위해 목적노드에서의 최종 신호 및 간섭신호 및 잡음비를 나타내면 다음과 같다.

$$\gamma_D = \frac{\gamma_t}{\sum_{j=1}^{N_D} \gamma_{d_j}^I + 1} \quad (10)$$

릴레이 중 R-D의 신호 대 잡음비가 가장 좋은 경로(선택된 R-D 경로)의 신호 대 잡음비를 나타내는 $\gamma_{r_b,d}$ 의 확률 밀도함수는 [11]을 참조하면 다음과 같이 나타난다.

$$f_{\gamma_{r_b,d}}(x) = \left(\prod_{i=1}^M E_i \right) \delta(x) + \sum_{k=1}^M S_k \sum_{\substack{S_k \subseteq \{1, \dots, M\}, \\ |S_k|=k}} (-1)^{k+1} \times \prod_{p \in S_k} (1 - E_p) \exp\left(-\frac{x}{\lambda_{r_b,d}}\right) \sum_{p \in S_k} \frac{1}{\lambda_{r_b,d}} \quad (11)$$

$\gamma_{r_b,d}$ 와 S-D 경로의 신호 대 잡음비를 나타내는 γ_{sd} (지수분포를 가짐)의 합을 의미하는 γ_t 의 신호 대 잡음비의 확률밀도 함수도 $\gamma_{r_b,d}$ 와 γ_{sd} 의 확률밀도함수의 컨벌루션(convolution) 적분을 통해 나타낼 수

$$f_{\gamma_D}(x) = \left(\prod_{i=1}^M E_i \right) \frac{\exp(-x/\lambda_{sd})}{\lambda_{sd}} \sum_{j=1}^{N_D} \sum_{p=1}^2 \left(\prod_{\substack{k=1, \\ k \neq j}}^{N_D} \frac{\lambda_{d_j}^I}{\lambda_{d_j}^I - \lambda_{d_k}^I} \right) \frac{(\lambda_{sd})^p}{\lambda_{d_j}^I (x + \lambda_{sd}/\lambda_{d_j}^I)^p} + \sum_{k=1}^M \sum_{\substack{S_k \subseteq \{1, \dots, M\}, \\ |S_k|=k}} (-1)^{k+1} \times \frac{\prod_{p \in S_k} (1 - E_p)}{(1/\zeta_p) - \lambda_{sd}} \sum_{j=1}^{N_D} \sum_{p=1}^2 \left(\prod_{\substack{k=1, \\ k \neq j}}^{N_D} \frac{\lambda_{d_j}^I}{\lambda_{d_j}^I - \lambda_{d_k}^I} \right) \left[\exp(-\zeta_p x) \frac{1}{\lambda_{d_j}^I (\zeta_p (x + \lambda_{sd}/\lambda_{d_j}^I \zeta_p))^p} - \exp\left(\frac{-x}{\lambda_{sd}}\right) \frac{(\lambda_{sd})^p}{\lambda_{d_j}^I (x + \lambda_{sd}/\lambda_{d_j}^I)^p} \right] \quad (13)$$

$$P_e = \left(\prod_{i=1}^M E_i \right) \sum_{j=1}^{N_D} \left(\prod_{\substack{k=1, \\ k \neq j}}^{N_D} \frac{\lambda_{d_j}^I}{\lambda_{d_j}^I - \lambda_{d_k}^I} \right) \phi(\alpha, \beta, \lambda_{sd}, \lambda_{d_j}^I) + \sum_{k=1}^M \sum_{\substack{S_k \subseteq \{1, \dots, M\}, \\ |S_k|=k}} (-1)^{k+1} \frac{\prod_{p \in S_k} (1 - E_p)}{(1/\zeta_p) - \lambda_{sd}} \times \sum_{j=1}^{N_D} \left(\prod_{\substack{k=1, \\ k \neq j}}^{N_D} \frac{\lambda_{d_j}^I}{\lambda_{d_j}^I - \lambda_{d_k}^I} \right) \left[\frac{1}{\zeta_p} \phi(\alpha, \beta, 1/\zeta_p, \lambda_{d_j}^I) - \lambda_{sd} \phi(\alpha, \beta, \lambda_{sd}, \lambda_{d_j}^I) \right] \quad (14)$$

있다. 이 결과를 [11]을 참조하여 나타내면 다음과 같다.

$$f_{\gamma_i}(x) = \left(\prod_{i=1}^M E_i \right) \frac{1}{\lambda_{sd}} \exp\left(\frac{-x}{\lambda_{sd}}\right) + \sum_{k=1}^M \sum_{\substack{S_k \subseteq \{1, \dots, M\}, \\ |S_k|=k}} (-1)^{k+1} \frac{\prod_{p \in S_k} (1 - E_p)}{(1/\zeta_p)} \left[\exp(-\zeta_p x) - \exp\left(\frac{-x}{\lambda_{sd}}\right) \right] \quad (12)$$

위의 결과에서 정의된 계수 $\zeta_p = \sum_{p \in S_k} (1/\lambda_{r,p})$ 와 같이 나타난다. 결과 식 (12)는 지수분포를 가지기 때문에 앞에서 제시한 S-R 경로의 신호 대 간섭신호 및 잡음비의 확률밀도함수 (5)를 참고하면 목적노드에서의 최종 신호 대 간섭신호 및 잡음비 (10)의 확률밀도함수는 위의 (13)과 같이 나타낼 수 있다. 이를 바탕으로 (8)의 비트오류율 유도 방식을 이용하여 γ_d 의 비트오류율을 구하면 위의 (14)의 결과와 같이 나타난다. 위의 결과 (14)를 이용하여 시스템 모델에서 제시한 복호 후 전송 릴레이 프로토콜의 비트오류율을 측정할 수 있다.

4. 수치적 결과

위에서 제시한 비트오류율의 수치적 해석을 위해 다음과 같은 환경을 가정하였다. 각 채널은 모두 같은 평균 신호 대 잡음비를 가진다고 가정하였다. 이에 채널과 간섭신호간의 평균 신호 대 잡음비를 $L = \lambda/\lambda^I$ 로 가정하였고 $P = \lambda/\lambda_{sd}$ 로 각 채널과 S-D경로의 평균 신호 대 잡음비를 비율로 나타내어 비교적 거리가 먼 S-D경로의 특성을 고려하여 수치적 결과를 제시하였다.

그림 2는 간섭세기의 변화에 따른 비트오류율의 변화를 나타낸다. 이 실험에서는 총 릴레이의 개수는 3, 간섭신호는 릴레이와 목적노드에 각각 2개, $P = 8$ 로 가정하였고 binary phase shift keying(BPSK)의 전송 방식을 이용하였다. 각 채널과 간섭신호간의 평균 신호 대 잡음비를 일정하게 가정하였기 때문에 높은 신호 대 잡음비 구간에서 비트오류율이 일정한 현상(error floor)이 발생한다. 간섭신호의 세기를 약하게 하였을 경우 전 구간에서 비트오류율이 개선되는 결과를 볼 수 있다. 이 결과를 바탕으로 간섭신호의 세기에 따라 릴레이 프로토콜의 성능이 많은 변화를 줄 수 있다는 사실을 발견할 수 있다. 그림 3은 간섭

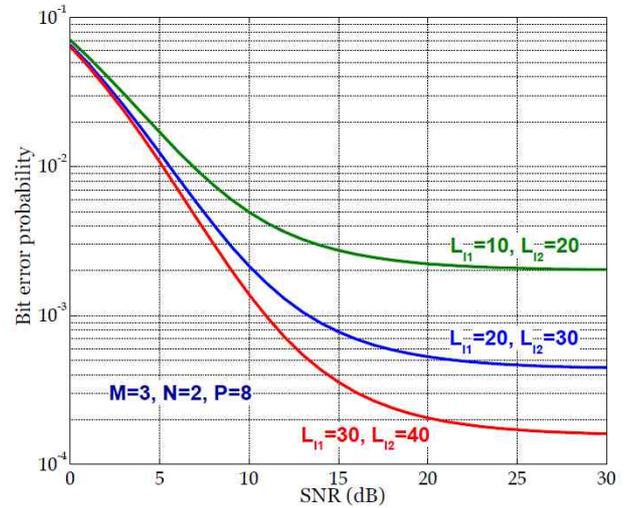


그림 2. 간섭세기의 변화에 따른 비트오류율 곡선. x축의 SNR은 $\lambda_{sr} = \lambda_{rd} = \lambda$ 를 의미하고 $L = \lambda/\lambda^I$ 를 나타냄. $P = \lambda/\lambda_{sd}$ 로 각 채널과 S-D경로의 평균 신호 대 잡음비를 나타냄.

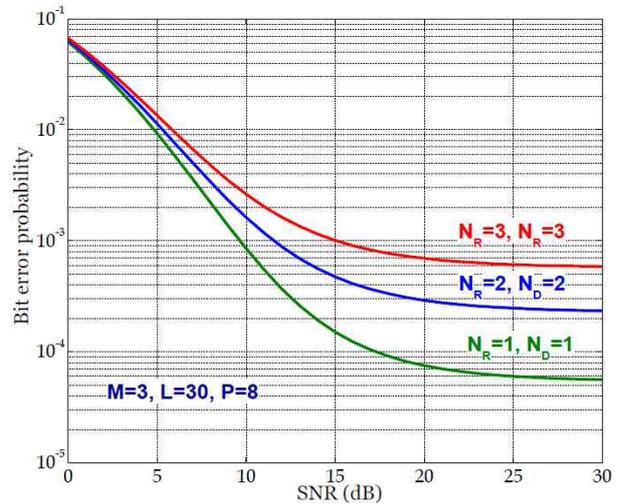


그림 3. 간섭신호 개수의 변화에 따른 비트오류율 곡선.

신호 개수의 변화에 따른 비트오류율을 보여준다. 이 실험에서는 총 릴레이의 개수는 3, $L = 30$, $P = 8$ 로 가정하였고 BPSK의 전송 방식을 이용하였다. 결과를 통해 간섭신호의 개수가 많아질수록 비트가 오류를 가질 확률이 높아진다는 사실을 볼 수 있음을 확인하였다. 위의 실험 결과들을 통해 간섭신호가 있는 릴레이 네트워크의 설계에는 간섭의 세기와 개수가 성능변화의 중요한 요소가 됨을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 다중 사용자 간섭이 존재하는 복호 후 전송 협력통신 시스템의 비트오류율에 대해 분석하였다. 다중 간섭신호가 각각 다른 세기 및 개수를 가지는 경우의 비트오류율에 대한 분석을 통해 복호 후 전송 릴레이 네트워크에서 릴레이 선택을 이용할 경우의 간섭신호의 영향을 나타내었다. 위에서 제시한 결과들을 통해 보다 실제적인 네트워크의 성능 분석을 가능하게 하였고 간섭의 세기 및 개수가 전체 협력통신의 성능에 중요한 요소가 됨을 확인 하였다.

Acknowledgement

“본 연구는 방송통신위원회의 차세대통신네트워크원천기술개발사업의 연구결과로 수행되었음” (KCA-2011-08913-04002)

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. 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 entwork path selection,” *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 659–672, Mar. 2006.
- [3] J. N. Laneman and G. W. Wornell, “Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2415–2525, Oct. 2003.
- [4] I. Krikidis, J. Thomson, S. McLaughlin, and N. Goertz, “Max-min relay selection for legacy amplify-and-forward systems with interference,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 6, pp. 3016–3027, Jun. 2009.
- [5] D. Lee and J. Lee, “Outage probability for dual-hop relaying systems with multiple interferers over Rayleigh fading channels,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 333–338, Jan. 2011.
- [6] J. -B. Kim and D. Kim, “Exact and closed-form outage probability of opportunistic decode-and-forward relaying with unequal-power interferers,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 12, pp. 3601–3606, Dec. 2010.
- [7] S. -I. Kim and J. Heo, “An efficient relay selection strategy for interference limited relaying networks,” in *Proc. IEEE PIMRC 2010*.
- [8] C. Chayawan and A. Aalo, “Average error probability of digital cellular radio systems using MRC diversity in the presence of multiple interferers,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 5, pp. 860–864, Sep. 2003.
- [9] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, 7th ed. San Diego, CA:Academic, 2007.
- [10] M. K. Simon and M. S. Alouini, *Digital Communication over Fading Channels*, New York: Willey, 2000.
- [11] S. S. Ikki and M. H. Ahmed, “Performance analysis of adaptive decode-and-forward cooperative diversity networks with the best relay selection scheme,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 1, pp. 69–72, Jan. 2010.