

Rician fading 채널기반 Hybrid relaying의 Outage 분석

*정용래 **이재영 ***김성일 ****허준

고려대학교

*ultra@korea.ac.kr, **jy4213@korea.ac.kr, ***dudux@korea.ac.kr, ****junheo@korea.ac.kr

Outage analysis of Hybrid relaying over Rician fading channel

*Cheong, Yong-Lae **Lee, Jae-Young ***Kim, Sung-Il ***Heo, Jun

Korea University

요약

협력 통신을 위한 프로토콜로 제안된 Hybrid relaying은 Source로부터 relay로 전송된 정보의 복호 성공 여부에 따라 증폭 후 전송 (AF) 기법과 복호 후 전송 (DF) 기법을 선택적으로 이용하여 전송한다. 최근 초고속 근거리 무선통신을 위한 테라 헤르츠 대역의 반송파를 이용한 연구가 활발해 지면서 Rician fading 채널 기반의 통신 기법 연구들이 중요 해 지고 있다. 본 논문에서는 각 노드간의 채널환경이 Rician fading 으로 모델링 되는 경우에 Hybrid relaying을 이용한 협력통신 기법의 outage probability를 분석한다.

1. 서론

무선통신에서 페이딩 채널을 극복하고 공간 다이버시티 효과를 얻기 위한 방법으로 소스노드와 목적노드 사이에 릴레이를 이용하는 협력통신이 제안되었으며[1]. 이를 바탕으로 다양한 협력통신 방식과 이들의 Outage probability가 분석되었다[2]. 이러한 협력 통신 방식은 증폭 후 전송(AF) 과 복호 후 전송(DF)의 두 가지 프로토콜로 크게 분류 된다. 증폭 후 전송 방식은 릴레이에서의 노이즈 까지 증폭시킨다는 단점이 존재하지만 구현하기 간단하다는 장점이 있고, 복호 후 전송 방식은 다소 복잡하지만 릴레이에서 복호에 성공할 경우 증폭 후 전송보다 우수한 성능을 나타내는 장점이 있다. 이러한 두가지 전송 프로토콜들의 장점을 활용하기 위하여 Hybrid relaying이 제안되었다[3]. Hybrid relaying에서는 릴레이에서 복호가 성공했을 경우 성능이 우수한 복호 후 전송 방식을 선택하고, 복호에 실패 하였을 경우는 증폭 후 전송을 이용하여 정보를 전송한다. Hybrid relaying은 기존의 프로토콜 보다 Rayleigh fading 환경에서 성능이 우수하다고 알려져 있다[3][4].

한편, 테라 헤르츠 대역을 이용한 초고속의 근거리 무선 통신시스템에 대한 연구가 WPAN과 WLAN 등의 분야에서 활발하게 연구되고 있다[5][6]. 테라 헤르츠 대역의 높은 반송파 대역에서는 신호의 직진성이 강하게 나타나기 때문에 LOS(Line-of-Sight)에 의해서 대부분의 정보가 전송되므로 Rician fading 채널 모델이 적합하다. 그리고 테라 헤르츠 대역의 특징은 강한 직진성으로 인하여 LOS가 블로킹되기 쉽다는 것이다. LOS의 사용이 불가능 할 경우 릴레이를 이용한 정보

전송이 반드시 필요하다고 볼 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 특성들을 반영하여 Rician fading 채널 기반의 Hybrid relaying의 outage probability를 분석하였다.

2. 본론

2.1 시스템 모델

본 논문에서는 하나의 소스노드, 목적노드, 릴레이가 존재하는 협력 통신 네트워크를 가정한다. 모든 노드간의 채널은 slow fading을 가지는 Rician fading을 가정하고 릴레이는 half-duplex로 동작한다. 각 노드에서 받는 신호는 아래 식과 같이 표현 할 수 있다.

$$r_{ij} = h_{ij}x_j + n_j \quad (1)$$

이때, r_{ij} 는 node i와 j사이의 받은 신호를 나타내며, h_{ij} 는 node i와 j사이의 채널 계수를 나타낸다. 또한 n_j 는 백색 가우시안 잡음(AWGN)을 나타낸다. 본 논문에서는 fading 채널의 $|h_{ij}|^2 SNR$ 를 순시 신호 대 잡음비 γ_{ij} 로 정의한다.

일반적인 채널의 용량(Capacity)은 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$C(\gamma) = \log_2(1 + \gamma)(b/s/Hz) \quad (2)$$

이때 채널 용량이 특정한 비율 R보다 작을 경우 outage가 발생한다고 정의 하며, $C(\gamma) < R$, 확률 분포 함수를 통해서 나타낸 outage probability는 다음과 같다.

* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터지원 사업의 연구결과로 수행되었습니다. (NIPA-2010-C1090-1031-0009)

$$P_{out} = \Pr\{\gamma < 2^R - 1\} = \int_0^{2^R - 1} p_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (3)$$

본 논문에서 가정하고 있는 Rician fading 채널 기반의 확률 분포 함수는 다음과 같은 non-central chi-square 확률분포를 이용하여 나타낸다.

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{(1+K)e^{-K}}{\Gamma} e^{-\frac{(1+K)\gamma}{\Gamma}} I_0\left(2\sqrt{\frac{K(1+K)\gamma}{\Gamma}}\right) \quad (4)$$

이때, K는 전체 채널 중 LOS가 차지하는 비율을 나타내는 Rician K-factor이고, γ 는 instantaneous 신호 대 잡음비, Γ 는 fading channel사이의 평균 신호 대 잡음비, $I_0(\cdot)$ 는 first kind의 0번째 차수 modified Bessel function을 나타낸다. 위의 확률 분포 함수(4)를 바탕으로 Rician fading에서의 outage probability를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= \Pr\{\gamma_{ij} < 2^R - 1\} \\ &= \int_0^{2^R - 1} \frac{(1+K_{ij})e^{-K_{ij}}}{\Gamma_{ij}} e^{-\frac{(1+K_{ij})\gamma_{ij}}{\Gamma_{ij}}} I_0\left(2\sqrt{\frac{K_{ij}(1+K_{ij})\gamma_{ij}}{\Gamma_{ij}}}\right) d\gamma_{ij} \\ &= 1 - Q_1(\sqrt{2K_{ij}}, \sqrt{2r/\mu_{ij}}) \end{aligned} \quad (5)$$

이때, i, j는 네트워크에 있는 각 노드를 나타내고, $r = 2^R - 1$, $\mu_{ij} = \Gamma_{ij}/(1+K_{ij})$, Q_1 은 first order Marquon-Q function [7]이다.

2.2 Hybrid relaying의 outage probability

기존의 릴레이 프로토콜의 전송 방식은 소스노드의 신호를 복호 후 재전송하는 복호 후 전송 방식과 소스노드의 신호를 그대로 증폭하여 전송하는 증폭 후 전송 방식을 이용하였다. 이러한 전송 방식을 효율적으로 이용하는 전송 방식으로 복호 후 전송과 증폭 후 전송을 선택적으로 사용하는 Hybrid relaying이 제안되었다[3]. Hybrid relaying은 첫 번째 프레임에서 소스노드가 릴레이와 목적노드로 정보를 전송하며 릴레이에서 수신된 신호의 복호가 성공할 경우 두 번째 프레임에 복호 후 전송을 이용하여 정보를 전송하고 경우 수신 신호를 증폭 후 전송을 이용하여 전송하는 알고리즘이다.

그림 1은 Hybrid relaying의 릴레이에서의 복호 성공 여부에 따라서 나뉜 2가지 경우를 나타낸다. 각 경우를 결정하는 노드 사이의 채널 용량은 $\log_2(1+\gamma_{12})$ 로 나타나며 각 case에 대한 outage probability는 $\theta \in \{1, 2\}$ 을 통해서 나타낼 수 있다.

릴레이가 첫 번째 전송한 정보에서 복호에 성공한 case1의 경우 목적노드에서 각 유저의 outage 발생은 다음과 같다.

$$C_{sd}(\theta = 1) = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{rd}) < R \quad (7)$$

이 때, 아래첨자 rd는 릴레이와 목적노드 사이의 채널을 나타낸다.

Case 2는 릴레이에 전송된 신호에서 복호에 실패한 경우를 의미한다. 따라서 두 번째 프레임에서 릴레이는 수신 신호를 증폭 후 전송하고 이때 목적노드에서의 outage 발생은 다음과 같다.

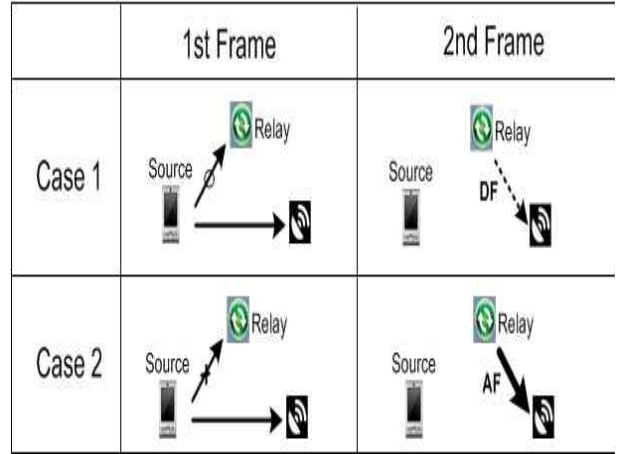


그림 1. Hybrid relaying의 전송 프로토콜

$$C_{sd}(\theta = 2) = \frac{1}{2} \log_2\left(1 + \frac{\gamma_{sr}\gamma_{rd}}{1 + \gamma_{sr} + \gamma_{rd}}\right) < R \quad (8)$$

Case 2의 릴레이에서 증폭된 신호의 SNR값을 다음과 같이 정의 한다.

$$\gamma_{AF} = \frac{\gamma_{sr}\gamma_{rd}}{1 + \gamma_{sr} + \gamma_{rd}}$$

위의 두 경우를 통해서 Hybrid relaying에 대한 전체 outage probability P_{outH} 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{outH} &= \Pr\{\gamma_{sr} > 2^R - 1\} \Pr\{\gamma_{rd} < 2^R - 1\} \\ &\quad + \Pr\{\gamma_{sr} < 2^R - 1\} \Pr\{\gamma_{AF} < 2^R - 1\} \end{aligned} \quad (9)$$

2.3 Rician fading 채널 기반의 AF Relaying의 outage probability 분석

본 절에서는 앞 절에서 제시한 hybrid relaying에서 증폭 후 전송(case 2)을 이용할 경우 Rician fading에 기반 한 outage probability ($\Pr\{\gamma_{AF} < 2^R - 1\}$)를 분석 한다.

증폭 후 전송 시 순시 SNR γ 에 대한 PDF는 [5, eq.(12)]에 의거 하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} p_\gamma(\gamma) &= \frac{1}{\mu_{sr}\mu_{rd}} \exp(-K_{sr} - K_{rd} - \frac{\gamma}{\mu_{sr}} - \frac{\gamma}{\mu_{rd}}) \\ &\quad \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^m \frac{1}{[n!(m-n)!]^2} \left[\frac{K_{sr}}{\mu_{rd}}\right]^n \left[\frac{K_{rd}}{\mu_{sr}}\right]^{m-n} \sum_{k=0}^{m+2} \binom{m+2}{k} \\ &\quad 2\gamma^{m+1} \left(\sqrt{\frac{\mu_{rd}}{\mu_{sr}}}\right)^{m-n-k+1} K_{m-n-k+1}(2\gamma\sqrt{\frac{1}{\mu_{sr}\mu_{rd}}}) \end{aligned} \quad (10)$$

이때 $K_\nu(\cdot)$ 는 second kind의 ν 번째 차수 modified Bessel function 이고, K_{sr} 와 K_{rd} 는 소스와 릴레이, 릴레이와 목적 노드 간 Rician K-factor 이다. Outage는 식(3)에 의거 (10)을 적분한 값이지만 이 적분에 관한 Closed-form을 구하는 것은 매우 어렵다. 따라서 $\nu > 0$ 고 정해진 x , $K_\nu(x)$ 에 대하여 $K_\nu(x)$ 를 [8]과 같이 점근적으로 근사할 수 있다.

$$K_\nu(x) \propto \frac{(v-1)!}{2} \left(\frac{x}{2}\right)^{-v} \quad (11)$$

(11)을 적용하여 (10)을 정리하면

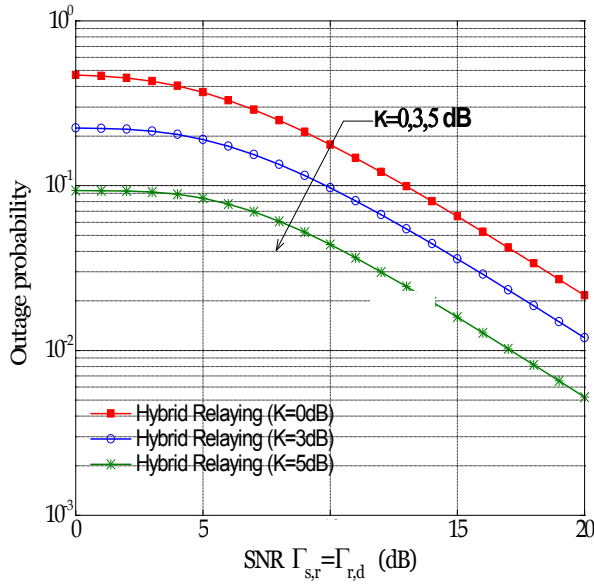


그림 2. 채널의 K factor의 변화에 따른 Outage Probability

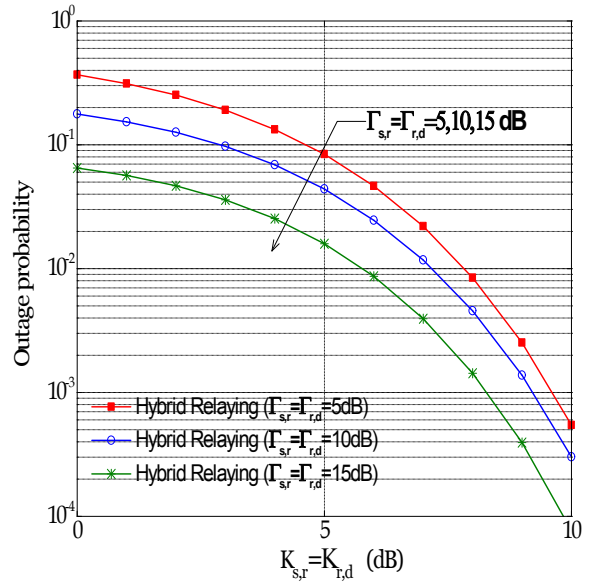


그림 3 채널의 평균 SNR의 변화에 따른 Outage Probability

$$p_\gamma(\gamma) \propto \frac{1}{\mu_{sr}\mu_{rd}} \exp(-K_{sr} - K_{rd}) \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^m \frac{1}{[n!(m-n)!]^2} \left[\frac{K_{sr}}{\mu_{sr}} \right]^n \left[\frac{K_{rd}}{\mu_{rd}} \right]^{m-n} \sum_{k=0}^{m+2} \binom{m+2}{k} \gamma^{n+k} \exp\left(-\left(\frac{1}{\mu_{sr}} + \frac{1}{\mu_{rd}}\right)\gamma\right) (\mu_{rd})^{m-n-k+1} (m-n-k)! \quad (12)$$

이고 이때 outage 확률 P_{outAF} 은 다음과 같다.

$$P_{outAF} = \Pr\{\gamma < 2^{2R} - 1\} = \int_0^{2^{2R}-1} p_\gamma(\gamma) d\gamma \propto \frac{1}{\mu_{sr}\mu_{rd}} \exp(-K_{sr} - K_{rd}) \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^m \frac{1}{[n!(m-n)!]^2} \left[\frac{K_{sr}}{\mu_{sr}} \right]^n \left[\frac{K_{rd}}{\mu_{rd}} \right]^{m-n} \sum_{k=0}^{m+2} \binom{m+2}{k} (\mu_{rd})^{m-n-k+1} (m-n-k)! \int_0^{2^{2R}-1} \gamma^{n+k} \exp\left(-\left(\frac{1}{\mu_{sr}} + \frac{1}{\mu_{rd}}\right)\gamma\right) d\gamma \quad (13)$$

식 (13)을 [9, eq.(3.351-1)]에 의해 정리하면

$$P_{outAF} \propto \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^m \sum_{k=0}^{m+2} \frac{1}{\mu_{sr}\mu_{rd}} \exp(-K_{sr} - K_{rd}) \frac{1}{[n!(m-n)!]^2} \left[\frac{K_{sr}}{\mu_{sr}} \right]^n \left[\frac{K_{rd}}{\mu_{rd}} \right]^{m-n} \binom{m+2}{k} (\mu_{rd})^{m-n-k+1} (m-n-k)! \left(\frac{1}{\mu_{sr}} + \frac{1}{\mu_{rd}} \right)^{-n-k-1} \gamma(n+k+1, \left(\frac{1}{\mu_{sr}} + \frac{1}{\mu_{rd}}\right)(2^{2R}-1)). \quad (14)$$

여기서 $\gamma(\cdot)$ 는 $\gamma(\alpha, x) = \int_0^x e^{-t} t^{\alpha-1} dt$ 이다.

따라서 (9)는 (5)와 (14)를 이용하여 Hybrid relaying의 Rician fading 채널에서의 outage 확률을 다음과 같이 나타 낼 수 있다.

$$P_{outH} = Q_1\left(\sqrt{2K_{sr}}, \sqrt{\frac{2r}{\mu_{sr}}}\right) \cdot \left[1 - Q_1\left(\sqrt{2K_{rd}}, \sqrt{\frac{2r}{\mu_{rd}}}\right) \right] + \left[1 - Q_1\left(\sqrt{2K_{sr}}, \sqrt{\frac{2r}{\mu_{sr}}}\right) \right] \cdot P_{outAF} \quad (15)$$

여기서 $r = 2^{2R} - 1$, $\mu_{ij} = \Gamma_{ij} / (1 + K_{ij})$ 을 나타낸다.

3. 수치적 결과

본 절에서는 앞 절에서 분석한 Rician fading 기반 hybrid relaying의 outage probability의 수치적 결과를 보여준다. 먼저, 그림 2는 Rician fading 채널에서의 K factor의 변화에 따른 outage probability를 보여 준다. 그리고 고정된 K factor에서 평균 SNR의 변화에 따른 outage probability를 나타내고 있다. 이 결과는 Rician fading의 K factor가 증가할수록, 채널의 평균 SNR이 증가할수록 outage probability가 감소하는 것을 보여주고 있다. 이 결과를 통해 K factor의 변화에 따른 hybrid relaying의 outage probability의 변화 정도를 파악할 수 있다.

그림 3은 채널의 평균 SNR의 변화에 따른 hybrid relaying의 outage probability의 변화정도를 보여준다. 마찬가지로 고정된 평균 SNR값에서 K factor의 변화(K=0,3,5 dB)에 따른 outage probability 역시 나타내고 있다. 이 결과 역시 Rician fading의 K factor가 증가할수록, 채널의 평균 SNR이 증가할수록 더 낮은 outage probability를 보이고 있으며, 평균 SNR의 변화에 따른 hybrid relaying의 outage probability의 변화를 파악하는데 이용할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 Rician fading 채널에 기반 한 hybrid relaying의 outage probability를 분석하였다. 효과적인 릴레이에서의 전송을 위해 릴레이에서 복호 후 전송과 증폭 후 전송을 선택적으로 사용하는 hybrid relaying을 이용 하였다. Hybrid relaying을 이용할 경우 증폭 후 전송과 복호 후 전송을 이용하는 경우의 outage probability의 수학적 분석을 제시하였으며 이를 수치적인 결과로 제시 하였다. 제시된 결과에서는 Rician fading의 K factor가 증가할수록, 채널의 평균 SNR이 증가할수록 outage probability가 증가하는 결과를 보였다. 이러한 결과는 테라 헤르츠 대역 등의 Rician fading을 기반으로 한 협력 통신에서 hybrid relaying을 이용할 경우의 성능을 파악하는데 이용 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity—Part 1: System description," *IEEE Transaction on Communication*, Vol.51, No.11, pp.1927–1938, Nov. 2003.
- [2] J. Nicholas Laneman, David N.C.Tse, Gregory W. Wornell, "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient protocols and Outage Behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.50, No.12, December 2004.
- [3] Todd E. Hunter, Shahab Sanayei, Aria Nosratinia, "Outage Analysis of Hybrid coded cooperation," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.52, No.2, Feb. 2006.
- [4] J. Lee, S. Kim, and J. Heo, "Performance analysis of hybrid coded cooperation in wireless networks," in Proc. APWCS 2010. Apr. 2010.
- [5] Limpakom, W., Yu-Dong Yao, Hong Man, "Outage Probability Analysis of Wireless Relay and Cooperative Networks in Rician Fading Channels with Different K-Factors," *IEEE Vehicular Technology Conference*, 2009. VTC Spring 2009.
- [6] 이재영, 김성일, 임현호, 허준, "Rician fading 채널에서 협력통신을 위한 coded cooperation의 성능분석" *한국통신학회논문지*, Vol. 35, No. 3. Mar. 2010.
- [7] Giovanni. E. Corazza, Gianluigi Ferrari, "New Bounds for the Marcum Q-Function," *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol.48, No.11, November 2002.
- [8] R. Penfold, J.-M. Vanden-Broeck, and S. Grandison, "Monotonicity of some modified Bessel function products," *Integral Transforms and Special Functions*, vol. 18, no. 2, pp. 139–144, Feb. 2007.
- [9] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, California: Academic Press, 7th Edition, 2007.