

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.1.61>

IIBC 2016-1-8

Rayleigh 페이딩 채널에서 랜덤한 릴레이를 갖는 기회전송 증가 릴레이 시스템의 성능

Performance of Opportunistic Incremental Relaying Systems with Random Relays in Rayleigh Fading Channels

김남수*

Nam-Soo Kim*

요 약 기회전송 증가 릴레이 시스템은 무선채널의 페이딩을 효과적으로 극복하고 무선 자원을 효율적으로 사용할 수 있는 장점을 갖는다. 그러나 지금까지 기회전송 증가 릴레이 시스템 연구에서는 릴레이의 위치가 공간적으로 고정되어 있는 것을 가정하였다. 일반적으로 모바일 환경에서는 사용자 터미널이 릴레이로 사용되는데, 사용자 터미널은 계속해서 움직이기 때문에 고정된 릴레이를 가정하는 것은 현실적이지 않다. 따라서 본 논문은 공간적으로 랜덤하게 분포된 사용자 터미널의 위치를 포아송 포인트 프로세스 (Poisson point process)로 모델링하고, 기회전송 증가 릴레이 시스템의 성능을 유도하였다. 유도 결과 릴레이가 랜덤하게 분포된 경우에도 릴레이가 고정된 경우와 마찬가지로 시스템의 성능이 향상되었으며, 릴레이의 밀도와 송수신 각도가 시스템의 성능에 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 또한 최대비 결합과 선택결합 수신방법에 따른 시스템의 성능을 비교하였다.

Abstract Opportunistic incremental relaying (OIR) system effectively overcomes the degradations caused by the fading of the wireless channel, and efficiently utilizes the wireless resources. Most of the OIR studies, however, assume spatially fixed relays. The user terminals which are usually served as relays move continuously, the assumption that the relays are fixed is not realistic. In this paper, the location of the spatially random user terminals are modeled by the Poisson point process, and the performance of an OIR system is derived. We noticed that the performance of the OIR system improves with the spatially random relays as well as with the fixed relays. Also the intensity of the relays and the transmitting directions toward the destination affect the performances. The performances of the maximal ratio combining (MRC) and the selection combining (SC) at the destination are compared.

Key Words : Opportunistic relaying, Incremental relaying, Fading channel, Random relay.

1. 서 론

무선 페이딩 채널에서 발생하는 수신 신호세기의 빠르고 급격한 변화는 통신 시스템의 성능을 나쁘게 하는

데, 최근에는 이를 효과적으로 극복하여 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 공간 다이버시티를 활용하고 있다. 대표적인 것이 MIMO (Multiple input multiple output)나 릴레이 시스템인데[1], 이동 휴대형 통신기기는 크기가

*정회원, 청주대학교 전자공학과

접수일자: 2014년 12월 24일, 수정완료: 2016년 1월 24일

게재확정일자: 2016년 2월 5일

Received: 24 December, 2015 / Revised: 24 January, 2016 /

Accepted: 5 February, 2016

*Corresponding Author: nskim@cju.ac.kr

Dept. of Electronic Engineering, Cheongju University, Korea

작아서 충분한 거리를 확보하기 어렵기 때문에 안테나 요소간이 일정거리를 요구하는 MIMO 시스템보다 릴레이를 이용한 협동 릴레이 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

협동 릴레이 시스템 중에서 여러 개의 릴레이가 동시에 송신하는 것 보다는 선택된 하나의 릴레이가 스스로부터 수신한 정보를 목적으로 전송하는 기회전송 릴레이 시스템이 주목 받고 있다. 그 이유는 기회전송 릴레이 방법이 공간 다이버시티 효과를 충분히 유지하면서 통신자원을 효율적으로 사용하기 때문이다[2].

그러나 좀 더 최근에는 기회전송 릴레이 시스템의 장점을 유지하면서 통신 자원을 더욱 효율적으로 사용할 수 있는 기회전송 증가 릴레이 (OIR, Opportunistic incremental relay) 시스템이 제안 되고 연구되었다 [3],[4],[5]. 기회전송 증가 릴레이 시스템은 먼저 소스에서 목적으로 정보를 전송하고, 목적지에서 수신한 신호-대-잡음비(SNR)가 임계값보다 작으면 성공적으로 수신하지 못한 것으로 판단하고 간단한 피드백 신호를 발생한다. 이때 선택된 릴레이가 스스로부터 받은 정보를 목적으로 전송한다. 만일 목적지에서 수신한 SNR이 임계값보다 크면 성공적으로 통신한 것으로 판단하고 릴레이는 소스의 정보를 전송하지 않는다. 따라서 기회전송 증가 릴레이 시스템은 릴레이가 직접경로의 통신이 실패하였을 때만 전송하기 때문에 통신자원을 더욱 효율적으로 사용할 수 있는 장점을 갖는다[3],[4].

한편 지금까지의 대부분의 릴레이 시스템의 분석들은 릴레이의 위치가 고정되었다고 가정하여 시스템의 성능을 유도하였는데, 이동통신 시스템이나 이동 방송 시스템에서는 릴레이로 사용되는 사용자 터미널이 계속해서 이동하기 때문에 릴레이의 위치가 고정되었다는 가정은 현실적이지 못하다.

따라서 최근에는 사용자 터미널이 공간적으로 랜덤한 위치에 있다고 가정하고 협동 릴레이 시스템의 성능을 분석한 논문들이 발표되고 있다[6]~[9]: H. Wang 등은 기회 전송 협동 릴레이 시스템에서 선택 결합방법을 사용하였을 때 복조 후 전송 (DF, decode-and-forward) 릴레이의 선택 방법에 따른 성능을 분석 하였다[6]. 그리고 Behnad 등은 증폭 후 전송 (AF, amplify-and-forward) 릴레이 시스템에서 간접경로(소스-릴레이-목적지)의 SNR이 최대가 되는 릴레이를 선택하였을 때의 성능을 해석하였다[7]. 한편 [8]은 전체 채널 정보가 필요한 중앙

컨트롤러가 없이 거리, 섹터, 그리고 지역 SNR을 기준으로 분산적으로 릴레이를 선택하는 3가지 방법을 제안하고 각각의 성능을 분석하였다. 최근 [9]는 직접경로는 없다고 가정하고 정확한 CSI(Channel state information) 및 부정확한 CSI에 의한 기회전송 DF 릴레이의 오수신율을 유도하였다. 그러나 저자가 파악하기에는 공간적으로 랜덤한 릴레이의 위치에 따른 기회전송 증가 릴레이 시스템의 성능을 유도한 연구는 아직까지 발표되지 않고 있다.

따라서 본 논문에서는 사용자 터미널이 공간적으로 랜덤하게 분포된 모바일 환경을 포아송 포인트 프로세스 (Poisson point process)로 모델링하고, 이 환경에서 기회전송 증가 DF 릴레이 시스템의 성능을 해석하고자 한다. 그리고 간접경로와 직접 경로의 신호를 최대비 결합 (MRC, Maximal ratio combining) 한 경우와 선택결합 (Selection combining)한 경우의 성능도 비교하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서 랜덤하게 위치한 사용자 터미널의 시스템 모델을 설명하고 릴레이 선택법을 설명한다. 제3장에서 고려하는 시스템의 오수신율을 유도하였으며, 제4장에서 수치적인 예와 얻은 결과에 대한 고찰을 서술하였다. 마지막으로 제5장에서 본 논문의 결과를 서술하였다.

II. 시스템 모델

그림 1은 공간상에 랜덤하게 위치한 사용자 터미널을 나타내고 있는데, 여기서 S 는 소스, D 는 목적지, L 은 소스와 목적지 사이의 거리, 그리고 R_i ($i = 1, 2, \dots, N$)는 릴레이를 나타낸다. 여기서 N 은 전체 릴레이의 수를 나타낸다.

소스에서 목적지까지 정보를 전송하기 위해서 첫째 방송 단계와, 둘째 릴레이 단계의 두 단계를 갖는다.

첫째, 방송단계에서는 소스가 정보를 송신하고 목적지 및 릴레이가 수신한다. 만일 목적지에서 수신한 SNR이 임계값보다 크면 정보전송을 종료하고, 반대로 임계값보다 작으면 정보전송에 실패하였다는 피드백 비트를 소스 및 릴레이로 송신한다.

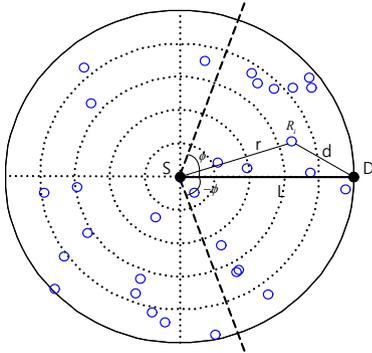


그림 1. 시스템 모델
 Fig. 1. System model

둘째, 릴레이 단계에서 릴레이가 목적지로부터 피드백 신호를 수신하면 최적의 릴레이로 선택된 릴레이가 소스로부터 수신한 정보를 목적지로 재전송한다. 목적지에서는 직접경로(S-D 경로)와 간접경로(S-R-D 경로)에서 수신한 신호를 최대비 결합하여 수신한다.

1. 최대-최소 (Maxmin) SNR 릴레이 선택법

기회전송 릴레이 시스템에서는 가장 적합한 릴레이를 선정하기 위하여 여러 가지 선택법이 사용되고 있는데, 여기서는 각각의 간접 경로를 형성하는 전방경로(S-R_i 경로)나 후방경로(R_i-D 경로) 중 SNR이 약한 경로를 먼저 선정하고, 각각의 간접경로에서 선정된 약한 경로를 서로 비교하여 가장 큰 SNR을 갖는 간접경로에 위치한 릴레이를 최적의 릴레이로 선택하는 방법으로 이 때 선택된 최적 릴레이의 인덱스는 다음과 같이 쓸 수 있다 [10].

$$k = \arg \max_{i=1,2,\dots,N} \min \{ \gamma_{SR_i}, \gamma_{R_iD} \} \quad (1)$$

이 선택 방법은 시스템 내에 존재하는 모든 경로의 채널 정보를 파악하여 릴레이를 선택하고, 선택된 릴레이를 알려주어야 하는 중앙 컨트롤러가 필요한 단점이 있다. 그러나 노드의 위치가 고정된 시스템에서는 최대-최소 릴레이 선택법은 전방경로나 후방경로 중 하나를 지정하여 최대의 SNR을 갖는 경로를 하나 정하는 최대 (Max) 선택법 보다 성능이 우수하다[2].

2. 경로 손실을 고려한 수신신호

수신한 SNR은 거리에 따른 전파손실과 무선 채널의 다중 경로에 의한 페이딩의 영향을 받으므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\gamma_{xy} = \frac{P_x}{N_0} \|x-y\|^{-\alpha} h_{xy} \quad (2)$$

여기서 P_x 는 송신하는 x 노드의 송신전력이고, N_0 은 수신노드인 y 의 잡음전력이다. 여기서는 모든 수신기의 잡음은 동일하다고 가정하자. 그리고 $\|x-y\|$ 는 x 노드와 y 노드 사이의 거리이며, α 는 전파환경에 따른 전파감쇄 상수인데, 보통 이동통신 환경에서 3 ~ 6 사이의 값을 갖는다[11]. 그리고 h_{xy} 는 분산이 1인 채널 전력이득을 말하며 Rayleigh 페이딩 채널에서는 확률밀도함수가 지수분포를 갖는다.

III. OIR 시스템의 성능분석

기회전송 증가 릴레이 시스템의 오수신율은 목적지에서 수신된 SNR이 임계값보다 작을 때를 말하므로, 직접 경로와 간접경로에서 수신한 SNR이 모두 임계값보다 작으면 오수신이 발생되므로 다음과 같은 결합확률로 나타낼 수 있다.

$$P_{out} = \Pr(\gamma_{SD} \leq \Gamma_1, \gamma_{ind} \leq \Gamma_2) \quad (3)$$

여기서 γ_{SD} 는 직접경로에서 수신한 SNR이다. 그리고

$$\gamma_{ind} = \max_{r_i \in \Psi_r} \min(\gamma_{SR_i}, \gamma_{R_iD} + \gamma_{SD}), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

는 최대-최소 선택방법에 의해서 선택된 릴레이의 SNR이다. 그런데, 여기서 (1)과는 다르게 γ_{R_iD} 대신에 $\gamma_{R_iD} + \gamma_{SD}$ 를 사용한 이유는 목적지에서 직접경로와 간접 경로로부터 수신한 신호를 최대비 결합한다고 가정하였기 때문이다. 그리고 Γ_1 과 Γ_2 는 각각 직접경로의 임계값과 간접경로의 임계값을 나타내는데, 목적지에서 요구하는 스펙트럼 효율을 $R[\text{bits}/\text{sec}/\text{Hz}]$ 라고 하면

$\Gamma_1 = 2^R - 1$ 이 되고, 간접경로는 소스-릴레이-목적지 경로에서 2 타임슬롯을 사용하기 때문에 $\Gamma_2 = 2^{2R} - 1$ 이 된다.

참고로 목적지에서 직접 경로와 간접 경로로부터 수신한 SNR을 최대비 결합하지 않는다면 γ_{ind} 는 (1)로부터

$$\gamma_{ind_sc} = \max_{r_i \in \Psi_r} \min(\gamma_{SR_i}, \gamma_{R_iD}), i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

로 교체할 수 있다. 따라서 (5)을 (3)에 대입하면 결국 목적지에서 직접경로 및 간접경로로 부터 수신한 신호를 선택결합(Selection combining)하는 결과가 된다[12].

그런데, (3)에서 $\Pr(\gamma_{SD} \leq \Gamma_1)$ 과 $\Pr(\gamma_{ind} \leq \Gamma_2)$ 가 서로 독립이 아니므로 (4)를 (3)에 대입하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{out} = \int_0^{\Gamma_1} f_{SD}(u) E_{\Psi_r} \Pr(\gamma_{ind} \leq \Gamma_2 | \gamma_{SD} = u) du \quad (6)$$

여기서 $f_{SD}(u)$ 는 소스-목적지 경로의 확률밀도함수이다. (6)에서

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_{ind} \leq \Gamma_2 | \gamma_{SD} = u) &= \Pr\left\{ \max_{r_i \in \Psi_r} \min(\gamma_{SR_i}, \gamma_{R_iD} + u) < \Gamma_2, i = 1, 2, \dots, N \right\} \\ &= \prod_{r_i \in \Psi_r} \Pr\left\{ \min(\gamma_{SR_i}, \gamma_{R_iD} + u) < \Gamma_2 \right\} \\ &= \prod_{r_i \in \Psi_r} \left\{ 1 - \Pr(\gamma_{SR_i} \geq \Gamma_2) \Pr(\gamma_{R_iD} \geq \Gamma_2 - u) \right\} \\ &= \prod_{r_i \in \Psi_r} \left\{ 1 - e^{-\Gamma_2 \left(\frac{1}{\gamma_{SR_i}} + \frac{1}{\gamma_{R_iD}} \right) + \frac{u}{\gamma_{R_iD}}} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 (7)의 마지막 식은 Rayleigh 페이딩 채널에서

$$\Pr(\gamma \leq \Gamma) = 1 - e^{-\Gamma/\bar{\gamma}} \quad (8)$$

을 대입하였다. 여기서 Γ 는 임계값이고, $\bar{\gamma}$ 는 평균 SNR이다. 그러므로 (7)를 (6)에 대입하면,

$$P_{out} = \int_0^{\Gamma_1} E_{\Psi_r} \prod_{r_i \in \Psi_r} \left\{ 1 - e^{-\Gamma_2 \left(\frac{1}{\gamma_{SR_i}} + \frac{1}{\gamma_{R_iD}} \right) + \frac{u}{\gamma_{R_iD}}} \right\} \frac{L^\alpha}{\rho_S} \exp\left(-\frac{L^\alpha u}{\rho_S}\right) du \quad (9)$$

여기서 $\rho_S = P_S/N_0$ 는 소스의 송신 SNR(Tx SNR)인데, P_S 는 소스의 송신전력이다. 마찬가지로 $\rho_R = P_R/N_0$ 은 릴레이의 송신 SNR이며, P_R 은 릴레이의 송신전력이다. 그리고 모든 노드에서 잡음 전력은 동일하다고 가정한다. 시스템에서 전체 송신 전력이 $P_T = P_S + P_R$ 로 제한되면, 소스의 송신전력비는 $\beta = P_S/P_T$ 가 되고 릴레이의 송신전력비는 $1 - \beta$ 가 된다. 그리고 d 는 그림 1에 나타난 릴레이와 목적지 사이의 거리인데, 다음과 같다.

$$d = \|R - D\| = \sqrt{r^2 + L^2 - 2rL \cos \theta} \quad (10)$$

한편 $\Phi = \{x_n\}$ 가 밀도 λ 를 갖는 포아송 포인트 프로세스이면, $0 \leq \nu \leq 1$ 이고 $\int |1 - \nu(x)| dx < \infty$ 일 때, 생성함수 $E\left[\prod_{x \in \Phi} \nu(x)\right]$ 는 다음과 같다[13, p.116], [14, p.31].

$$E\left[\prod_{x \in \Phi} \nu(x)\right] = \exp\left[-\lambda \int \{1 - \nu(x)\} dx\right] \quad (11)$$

그러므로 (9)에 (11)을 적용하면, 기회전송 증가 릴레이 시스템의 오수신율은

$$P_{out} = \frac{L^\alpha}{\rho_S} \int_0^{\Gamma_1} \exp\left[-\lambda \int_0^L \int_{-\phi}^{\phi} e^{-\Gamma_2 \left(\frac{r^\alpha}{\rho_S} + \frac{d^\alpha}{\rho_R} \right) + \frac{d^\alpha u}{\rho_R}} r dr d\theta\right] \exp\left(-\frac{L^\alpha u}{\rho_S}\right) du \quad (12)$$

으로 쓸 수 있다. (12)는 삼중적분을 해야 하므로, 오수신율을 얻으려면 계산시간이 매우 오래 걸린다. 따라서 $\alpha = 2$ 이고, $\phi = \pi$ 인 특별한 경우를 가정하면 (12)는 다음과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$P_{out} = \frac{L^2}{\rho_S} \int_0^{\Gamma_1} \exp\left[-2\lambda \int_0^L e^{-\Gamma_2 \left(\frac{r^2}{\rho_S} + \frac{r^2 + L^2}{\rho_R} \right) + \frac{(r^2 + L^2)u}{\rho_R}} \left(\int_0^\pi e^{-(\Gamma_2 - u) \frac{2rL \cos \theta}{\rho_R}} d\theta \right) r dr\right] \exp\left(-\frac{L^2 u}{\rho_S}\right) du \quad (13)$$

그런데 0차 변형 베셀함수[15, (8.431.3)]

$$I_0(z) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi e^{\pm z \cos \theta} d\theta$$

는 이므로, (13)은

$$P_{out} = \frac{L^2}{\rho_S} \int_0^{\Gamma_1} \exp \left[-2\pi\lambda \int_0^L e^{-\Gamma_2 \left(\frac{r^2}{\rho_S} + \frac{r^2+L^2}{\rho_R} \right) + \frac{L^2+L^2}{\rho_R} u} I_0 \left\{ \left(\Gamma_2 - u \right) \frac{2rL}{\rho_R} \right\} r dr \right] \times \exp \left(-\frac{L^2 u}{\rho_S} \right) du \quad (14)$$

으로 쓸 수 있다. 여기서 베셀함수는 기존의 Matlab 등의 프로그램에서 제공하고 있는 라이브러리를 이용하면 수신율을 간단히 계산할 수 있다.

IV. 수치적인 예 및 고찰

그림2는 $\alpha=2$ 이고, $\varnothing = \pi$ 인 경우, 릴레이 밀도에 따른 증가 릴레이 시스템의 수신율을 나타내고 있다. 예측하고 있듯이 소스와 목적지 사이의 거리가 멀고 릴레이의 밀도가 작을수록 수신율은 증가하는 것을 볼 수 있다.

이 그림에서 “direct”는 전체전력을 직접 경로로만 전송하였을 경우인데, 직접경로만 사용할 때보다 소스 및 릴레이로 전력을 분산하여 간접경로를 사용하는 것이 항상 성능이 우수함을 알 수 있다. 즉, 송신전력이 소스와 릴레이로 양분되어도 간접경로를 활용함으로써 얻는 다이버시티 효과가 전체전력을 직접경로로 전송하는 경우보다 크기 때문이며, 결국 페이딩의 영향을 더욱 잘 극복하기 때문이다.

또한 소스와 목적지 사이의 거리가 가까울수록 시스템의 성능은 포아송 분포의 밀도의 변화에 더 많은 영향을 받는 것을 알 수 있다.

그림3은 소스와 목적지 사이의 송신각도가 작을수록 수신율이 증가하는 것을 나타내고 있다. 이는 각도가 적을수록 릴레이 대상이 되는 사용자 터미널이 줄어들기 때문이다 (그러나 지향성 안테나 등을 사용하여 송신각도를 좁히는 경우에는 지향성이득 때문에 통화영역이 확장되므로 수신율이 증가하지는 않는다).

그림4는 결합방법에 따른 수신율의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 MRC는 (14)로부터 얻은 결과이고, SC는 (5)를 (3)에 대입하여 얻은 결과이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 MRC 결합한 결과가 항상 성능이 우수하지만, 그 차이는 크지 않음을 알 수 있다.

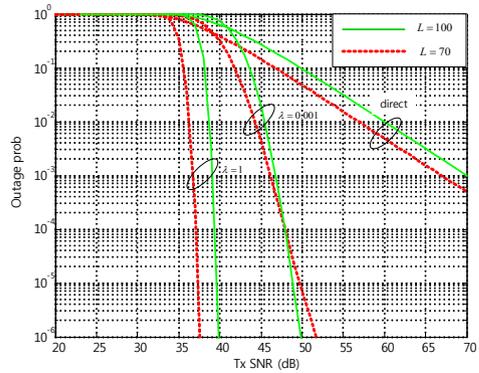


그림 2. 릴레이 밀도에 따른 시스템의 수신율 ($\alpha = 2, \varnothing = \pi, \beta = 0.5, R = 1$)

Fig 2. Outage probability for different intensities of relays ($\alpha = 2, \varnothing = \pi, \beta = 0.5, R = 1$)

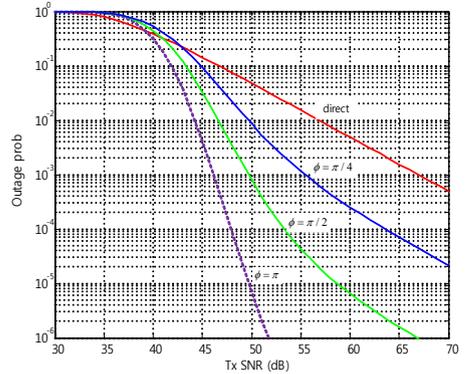


그림 3. 송신 각도에 따른 시스템의 수신율 ($\alpha = 2, \beta = 0.5, R = 1, \lambda = 0.001, L = 70$)

Fig 3. Outage probability for different transmit angles ($\alpha = 2, \beta = 0.5, R = 1, \lambda = 0.001, L = 70$)

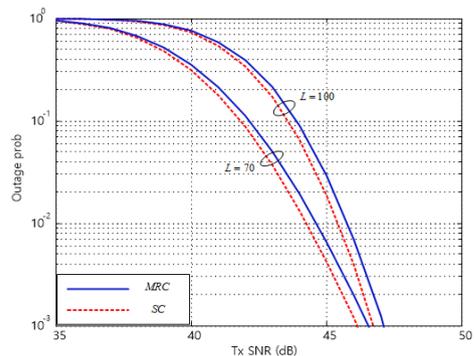


그림 4. 결합방법에 따른 수신율 ($\alpha = 2, \beta = 0.5, \varnothing = \pi, R = 1, \lambda = 0.001$)

Fig 4. Outage probability for different combining methods ($\alpha = 2, \beta = 0.5, \varnothing = \pi, R = 1, \lambda = 0.001$)

V. 결론

지금까지 기회전송 증가 릴레이 시스템을 해석할 때에는 주로 고정된 릴레이 환경을 가정하였다. 그러나 모바일 환경에서는 사용자 터미널이 계속해서 움직이므로, 보다 현실적인 환경을 가정하기 위하여 사용자 터미널을 공간적으로 랜덤하게 분포된 포아송 분포로 가정하였다. 이 가정 하에서 기회전송 증가 DF 릴레이 시스템의 성능을 수식적으로 유도하고, 수치적인 예로 분석하였다. 분석결과 릴레이가 랜덤한 위치에 있을 때에도 릴레이 없이 직접경로만 사용하여 정보를 전송하는 경우보다 릴레이를 사용하여 직접 및 간접경로를 사용할 때 시스템의 성능이 향상 되는 것을 알 수 있었다.

또한 시스템의 오수신율은 랜덤하게 분포된 릴레이의 밀도와 송수신 각도에 영향을 받았는데, 이는 릴레이 과정에 참여하는 사용자 터미널의 수가 변하기 때문으로 해석되었다.

마지막으로 MRC 수신인 경우와 SC 수신인 경우를 비교하였다. 비교결과 MRC 수신인 경우가 SC 보다 항상 성능은 우수하였지만 주어진 조건하에서 그 차이는 크지 않았다.

References

- [1] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. in Information Theory*, vol.50, no.12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [2] A. Bletsas, H. Shin, M. Z. Win, "Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol.6, no.9, pp.3450-3460, Sep. 2007.
- [3] S. S. Ikki and M. H. Ahmed, "Performance analysis of incremental-relaying cooperative-diversity networks over Rayleigh fading channels," *IET Commun.*, vol.5, no.3, pp.337-349, Feb. 2011.
- [4] K. Tourki, H.-C. Yang, and M.-S. Alouini, "Accurate outage analysis of incremental decode-and-forward opportunistic relaying," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol.10, no.4, pp.1021-1025, April 2011.
- [5] Nam-Soo Kim, "Performance evaluation of opportunistic incremental relay systems by using partial and full channel information in Rayleigh fading channels," *Journal of Institute of Internet, Broadcasting and Commun.*, vol.13, no.6, pp. 71-78, Dec. 2013.
- [6] H. Wang, S. Ma, T.-S. Ng, and H. V. Poor, "A general analytical approach for opportunistic cooperative systems with spatially random relays," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol.10, no.12, pp.4122-4129, Dec. 2011.
- [7] A. Behnad, A. M. Rabeii, N. C. Beaulieu, "Performance analysis of opportunistic relaying in a Poisson field of amplify-and-forward relay," *IEEE Trans. on Commun.*, vol.61, no.1, pp. 97-107, Jan. 2013.
- [8] C. Zhai, W. Zhang, and G. Mao, "Uncoordinated cooperative communications with spatially random relays," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, vol.11, no.9, pp.3126-3135, Sep. 2012.
- [9] A. Tukmanov, S. Boussakta, Z. Ding, and A. Jamalipour, "Outage performance of imperfect-CSI-based selection cooperation in random networks," *IEEE Trans. on Commun.*, vol.62, no.8, pp.2747-2756, Aug. 2014.
- [10] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.24, pp.659-672, Mar. 2006.
- [11] G. L. Stuber, *Principles of mobile communication*, 2nd Ed., Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [12] Andrea Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge Univ. Press, 2005.
- [13] D. Stoyan, W. Kendall, and J. Mecke, *Stochastic geometry and its applications*, John Wiley and Sons Ltd, 1995.
- [14] J. Kingman, *Poisson Process*, ch.5, Oxford university press, 1993.
- [15] I. S. Gradshteyn and I.M. Ryzhik, *Table of*

integrals, series, and products, 6th Ed., Academic Press, 2000.

저자 소개

김 남 수(정회원)



- 1986년 ~ 1994년 : ETRI(전자 통신 연구원) 이동통신 연구단 무선기술 실장 역임
- 1991년 : 연세대학교 대학원 전자공학과 공학박사
- 1991년 ~ 1991년 : BNR(Bell Northern Research) 방문연구원
- 2002년 ~ 2003년 : NJIT(New Jersey Institute of Technology) 교환교수
- 1994년 ~ 현 재 : 청주대학교 전자공학과 교수
- 2006년 ~ 2007년 : 청주대학교 학술정보처장
- 2010년 ~ 2010년 : 청주대학교 입학처장

※ 이 논문은 2015~2017학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.