

<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.6.71>

JIIBC 2013-6-9

레이레이 페이딩 채널에서 부분 및 전체 채널 정보를 이용하는 기회전송 증가 릴레이 시스템의 성능

Performance Evaluation of Opportunistic Incremental Relaying Systems by using Partial and Full Channel Information in Rayleigh Fading Channels

김남수*

Nam-Soo Kim

요 약 최근 기회전송 증가 릴레이 시스템은 무선 페이딩 채널에서 시스템 성능을 효과적으로 개선하기 위하여 많은 연구가 되고 있다. 그러나 대부분의 기회전송 증가 릴레이 시스템 연구는 소스-목적지 사이에 직접 경로가 존재하는 시스템을 대상으로 성능을 해석하고 있고 직접 경로가 없이 소스-릴레이-목적지의 간접 경로만 존재하는 시스템에 대한 해석은 매우 적다. 따라서 본 논문에서는 직접 경로가 존재하지 않는 기회전송 증가 릴레이 시스템에서 먼저 부분적인 채널 정보만으로 릴레이를 선택하여 전송하고, 만약 통신이 실패하면 전체 채널정보를 이용하여 최적의 증가 릴레이를 사용하여 정보를 전송하는 프로토콜을 제안하였다. 그리고 제안한 전송 프로토콜을 적용한 시스템의 성능을 해석적으로 유도하고 그 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 유도결과를 입증하였다. 본 논문의 결과는 소스-목적지 간에 직접 경로가 존재하지 않는 이동통신 시스템과 양방향 TV 방송 시스템에 기회전송 증가 릴레이 시스템을 도입하였을 경우 시스템 설계 및 성능 예측에 직접 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

Abstract Recently, the opportunistic incremental relaying systems have been studied to improve the system performance effectively in wireless fading channel. Most of the performance analysis of the system includes a source-destination direct link. And there are few analysis which consider source-relay-destination indirect paths only. Therefore this paper proposes a transmission protocol which relays the source information using the selected relay from the partial channel information at the first stage in an opportunistic incremental relaying system. If the transmission fails, the selected best relay from the full channel information retransmits the information to the destination incrementally. The performance of the proposed system is derived analytically and verified from Monte Carlo simulation. The derived results can be applied to the system design and the performance estimation of the mobile systems and the bidirectional TV broadcasting systems which adapt an opportunistic incremental relaying system.

Key Words : Opportunistic relaying, Incremental relaying, Indirect link, Fading channel.

*정회원, 청주대학교 전자공학과
접수일자 2013년 10월 24일, 수정완료 2013년 11월 24일
게재확정일자 2013년 12월 13일

Received: 24 October, 2013 / Revised: 24 November, 2013
Accepted: 13 December, 2013

*Corresponding Author: nskim@cju.ac.kr

Dept. of Electronic Engineering, Cheongju University, Korea

I. 서론

최근 이동통신 환경에서 통신의 신뢰도를 높이고 통화 거리를 연장할 뿐만 아니라 전력소모를 줄이기 위한 방법의 하나로 릴레이를 이용한 통신에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[1],[2]}. 릴레이 통신 연구 초기에는 무선 페이딩 채널에 의한 신호저하를 개선하기 위하여 여러 개의 병렬 릴레이가 여러 개의 직교 채널을 이용하여 순차적으로 정보를 전송하는 방식을 사용하였으나^{[3],[4],[5]} 직교 채널로 사용되는 주파수, 시간 및 코드 등의 통신자원을 절약하기 위하여 릴레이를 하나만 사용하는 기회 전송방식이 도입되기 시작하였다^{[6],[7]}.

일반적으로 기회전송 방식은 소스에서 목적지로 정보를 전송하는데 소스-목적지의 직접 경로와 소스-릴레이-목적지의 간접경로 두 가지를 사용하며, 간접 경로에서는 시스템의 성능을 극대화하기 위하여 최적의 릴레이를 선택하여 정보를 중계한다. 이 때 최적의 릴레이를 선택하기 위하여 소스-릴레이-목적지의 전체 채널 정보를 이용하는 방법^{[7],[8]}과 소스-릴레이 또는 릴레이-목적지 사이의 부분적인 채널 정보를 사용하는 방법^[9]이 있다.

먼저 전체 채널 정보를 이용하여 최적의 릴레이를 선택하는 경우 대표적인 2 가지의 릴레이 선택 방법이 있는데, 첫 째로, 최대-최소 선택 (Max-min selection) 방법과 두 번째, 최대 합성 평균 선택(Maximize harmonic mean selection) 방법이다. 최대-최소 선택 방법은 각각의 릴레이에 대하여 소스-릴레이 경로와 릴레이-목적지 경로 중 신호 대 잡음비(Signal-to-noise ratio, SNR)가 낮은 하나의 링크를 선택하고, 선택된 전체의 링크 중 SNR이 큰 릴레이를 선택한다. 즉 정보 전송 시 병목현상(bottle neck)을 최소화하는 릴레이를 선택한다^[7]. 그리고 최대 합성 평균 선택 방법은 소스-릴레이 경로와 릴레이-목적지 경로의 합성된 SNR을 고려하여 릴레이를 선택한다^[10]. 전체 채널정보를 이용하여 릴레이를 선택하는 방법은 부분적인 채널 정보를 사용하는 방법보다 성능 향상에 효과적이지만 시스템의 복잡도 증가 및 오버헤드 정보의 급증과 같은 단점이 있다.

이와 같은 단점을 극복하기 위하여 최근 부분적인 채널 정보를 이용하여 릴레이를 선택하는 방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^[9]. 그러나 이 방법은 전체 채널 정보를 사용 시의 단점인 시스템의 복잡도나 오버헤드를 줄일 수 있기 때문에 빠르게 변화하는 페이딩 채널

에서 실용적인 방법이기도 하지만, 상대적으로 시스템의 성능향상이 크지 않다는 단점이 있다.

한편 지금까지의 기회전송에 관한 대부분의 논문들은 소스-목적지의 직접 경로와 소스-릴레이-목적지의 간접 경로로부터 수신한 신호를 최대비 합성 결합(Maximal Ratio Combining, MRC)하는 시스템을 주로 해석하였다^{[9],[10],[11]}. 그러나 소스와 목적지 사이의 거리가 먼 경우나 장애물이 있는 경우 직접 경로가 존재하기가 어렵다.

따라서 본 논문에서는 소스와 목적지 사이에 직접 경로가 존재하지 않는 경우 기회전송 증가 릴레이 시스템의 성능을 분석하였다. 특히 시스템의 복잡도를 줄이기 위하여 먼저 부분적인 채널정보를 이용하여 릴레이 통신하고, 통신 실패 시 전체 채널 정보를 이용하여 릴레이 경로를 추가하는 전송프로토콜을 제안하고 시스템의 성능을 해석적으로 유도하였다. 본 논문에서는 각 채널은 독립적이고 동일한 Rayleigh 분포를 하고, 복조 후 재전송(Decode-and-Forward, DF) 릴레이를 사용한다고 가정하였다.

본 논문의 구성은 제2장에서 해석하고자 하는 시스템 모델을 설명하고, 릴레이 전송 프로토콜과 릴레이 선택 방법을 서술하였다. 제3장에서 제안한 전송프로토콜에 따른 시스템의 성능을 해석적으로 유도하였다. 그리고 제4장에서 해석적으로 유도한 결과와 시뮬레이션 결과를 예를 들어서 비교 설명하고, 얻어진 결과를 고찰하였다. 마지막으로 제5장에서 본 논문의 결과를 서술하였다.

II. 시스템 모델

그림1은 본 논문에서 고려하고자 하는 시스템 모델인데, 소스(S)와 목적지(D), 그리고 $M+1$ 개의 릴레이($R_i, i=1,2,\dots,M$)로 구성되어있다.

그림에서 $S-R_0-D$ 경로에서 굵은 실선($S-R_0$ 경로)은 소스-릴레이 경로의 부분적인 채널정보를 이용하여 릴레이를 선택한 예를 나타내는데, S 가 송신할 때 $M+1$ 개의 릴레이 중 수신한 SNR이 가장 큰 경로를 나타낸다. 그리고 점선은 소스-릴레이-목적지 경로의 전체 채널정보를 이용하여 나머지 M 개의 릴레이 중 릴레이 선택 법칙에 의하여 선택된 릴레이 경로,

$S-R_m-D$ 경로를 나타낸다.

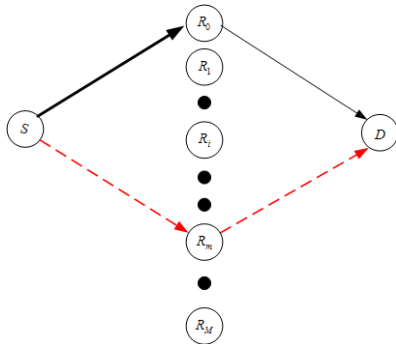


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

1. 릴레이 전송 프로토콜

전송 시 직교성을 유지하기 위하여 시간분할 송신한다고 가정하고, 소스와 목적지는 거리가 멀어서 직접 수신할 수 없다고 가정하였다.

타임슬롯 1에서 소스가 정보를 전송(broadcasting)하면, 무선채널의 특징에 의하여 $M+1$ 개의 릴레이가 수신한다. 타임슬롯 2에서는 소스와 릴레이간의 부분적인 채널정보를 이용하여 최대 SNR을 수신한 릴레이(그림1에서 편의상 R_0)가 소스로부터 받은 정보를 복조 후 목적지로 재전송한다(Decode-and-forward). 만일 목적지에서 수신한 SNR이 임계값을 넘으면 정보전송이 성공한 것으로 판정한다. 이 때에 릴레이는 수신한 SNR의 역수에 해당하는 시간에 목적지로 송신하므로 다른 릴레이는 먼저 송신한 릴레이가 있으면 송신하지 않는다. 만일 정보전송에 성공하지 못하면 소스-릴레이-목적지 사이의 전체 채널정보를 이용하는데, 나머지 M 개의 릴레이 중 최대-최소 선택법에 의하여 선택된 릴레이(그림1의 R_m)가 타임슬롯 3에서 목적지로 전송한다. 이 때 목적지는 타임슬롯 2에서 수신한 신호와 타임슬롯 3에서 수신한 신호를 최대비 합성 결합하여 복조한다.

2. 릴레이 선택 방법

릴레이를 선택하는 방법은 두 단계를 사용하였는데, 먼저 소스와 릴레이간의 부분적인 채널정보를 이용하여 최대 SNR을 수신한 릴레이를 선택하여 전송하고, 전송에 실패하면 두 번째로 소스-릴레이-목적지 사이의 전

체 채널정보를 이용한다. 최근 M. Shaqfeh등^[12]은 전체 채널정보를 이용하는 기존의 최대-최소 선택 방법을 변형하여 목적지에서 최대비 합성된 SNR을 포함하여 송신릴레이를 결정하는 방법을 제안하였는데, 기존의 최대-최소 선택방법보다 우수한 성능을 얻었다. 따라서 본 논문에서도 이 방법을 적용하여 다음과 같이 릴레이를 선택한다. 선택된 m 번째 릴레이는

$$m = \arg \max_{i \in \{1, 2, \dots, M\}} \min(\gamma_{SR_i}, \gamma_{R_i D} + \gamma_{R_0 D}) \quad (1)$$

인데, 앞 절에서 타임슬롯 2에서 $M+1$ 개의 릴레이 중 최대 SNR을 수신한 릴레이를 편의상 R_0 로 나타내었고, 이 때 선택된 릴레이 R_0 와 목적지 경로에서 수신된 SNR이 $\gamma_{R_0 D}$ 이다. 그리고 γ_{SR} 및 $\gamma_{R,D}$ 는 각각 소스- i 번째 릴레이 경로 및 i 번째 릴레이-목적지 경로에서 수신된 SNR이다($i = 1, 2, \dots, M$).

III. 성능분석

목적지에서 상호 정보량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = \frac{1}{N} \log_2(1 + SNR) \quad (2)$$

여기서 N 은 정보가 몇 번의 타임슬롯을 이용하여 목적지에 도달하는지를 나타내는 값으로, 처음에 $S-R_0-D$ 경로로 정보를 전송하면, $S-R_0$ 경로와 R_0-D 경로를 거쳐서 정보가 목적지에 도착하게 되어 $N=2$ 회가 되며, 만일 첫 번째 전송에서 목적지에서 수신된 SNR이 임계값을 넘지 못하면 기회증가 릴레이 방법에 의하여 R_m-D 경로가 추가되므로 $N=3$ 이 된다. 따라서 목적지에서 원하는 상호정보량이 R [bps/Hz]라고 하면, $S-R_0-D$ 경로로 전달된 정보의 경우 임계값을 Γ_1 이라고 하면, $\Gamma_1 = 2^{2R} - 1$ 이 되고, R_m-D 경로를 추

가할 경우의 임계값을 Γ_2 라고 하면 $\Gamma_2 = 2^{3R} - 1$ 이 된다.

릴레이는 복조 후 전송 릴레이를 사용하므로, 목적지에서 오수신율은 $S - R_0 - D$ 경로에서 오수신이 발생할 확률과 증가 릴레이 경로에서 오수신이 발생할 결합확률이 되고, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{out} = \Pr \left\{ \min(\gamma_{SR_m}, \gamma_{R_m D} + \gamma_{R_0 D}) < \Gamma_2, \min(\gamma_{SR_0}, \gamma_{R_0 D}) < \Gamma_1 \right\} \quad (3)$$

그런데 $S - R_0 - D$ 경로에서 오수신이 발생할 확률은

$$\begin{aligned} & \Pr \left\{ \min(\gamma_{SR_0}, \gamma_{R_0 D}) < \Gamma_1 \right\} \\ &= \Pr \left\{ \gamma_{SR_0} < \Gamma_1, \gamma_{R_0 D} < \Gamma_1 \right\} \\ &+ \Pr \left\{ \gamma_{SR_0} < \Gamma_1, \gamma_{R_0 D} \geq \Gamma_1 \right\} + \Pr \left\{ \gamma_{SR_0} \geq \Gamma_1, \gamma_{R_0 D} < \Gamma_1 \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

으로 쓸 수 있고, 각 채널이 독립이라는 가정을 이용하면, (3)은 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= \Pr \left\{ \min(\gamma_{SR_m}, \gamma_{R_m D} + \gamma_{R_0 D}) < \Gamma_2, \gamma_{R_0 D} < \Gamma_1 \right\} \Pr \left\{ \gamma_{SR_0} < \Gamma_1 \right\} \\ &+ \Pr \left\{ \min(\gamma_{SR_m}, \gamma_{R_m D} + \gamma_{R_0 D}) < \Gamma_2, \gamma_{R_0 D} \geq \Gamma_1 \right\} \Pr \left\{ \gamma_{SR_0} < \Gamma_1 \right\} \\ &+ \Pr \left\{ \min(\gamma_{SR_m}, \gamma_{R_m D} + \gamma_{R_0 D}) < \Gamma_2, \gamma_{R_0 D} < \Gamma_1 \right\} \Pr \left\{ \gamma_{SR_0} \geq \Gamma_1 \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

이 식의 처음 항과 세 번째 항은 고려하면, (5)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= \Pr \left\{ \min(\gamma_{SR_m}, \gamma_{R_m D} + \gamma_{R_0 D}) < \Gamma_2, \gamma_{R_0 D} < \Gamma_1 \right\} \\ &+ \Pr \left\{ \min(\gamma_{SR_m}, \gamma_{R_m D} + \gamma_{R_0 D}) < \Gamma_2, \gamma_{R_0 D} \geq \Gamma_1 \right\} \\ &\times \Pr \left\{ \gamma_{SR_0} < \Gamma_1 \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

(6)에서 첫 번째 식은 M. Shaqfeh등^[12]이 사용한 방법을 적용하여 다음과 같이 유도할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} & \Pr \left\{ \min(\gamma_{SR_m}, \gamma_{R_m D} + \gamma_{R_0 D}) < \Gamma_2, \gamma_{R_0 D} < \Gamma_1 \right\} \\ &= \int_0^{\Gamma_1} \Pr \left\{ \min(\gamma_{SR_m}, \gamma_{R_m D} + x) < \Gamma_2 \mid \gamma_{R_0 D} = x \right\} f_{\gamma_{R_0 D}}(x) dx \end{aligned} \quad (7)$$

이 되고, 피적분함수는 다음과 같다

$$\begin{aligned} & \Pr \left\{ \min(\gamma_{SR_m}, \gamma_{R_m D} + x) < \Gamma_2 \right\} \\ &= \Pr \left[\max \left\{ \min(\gamma_{SR_i}, \gamma_{R_i D} + x), i = 1, 2, \dots, M \right\} < \Gamma_2 \right] \\ &= \prod_{i=1}^M \Pr \left\{ \min(\gamma_{SR_i}, \gamma_{R_i D} + x) < \Gamma_2 \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 세 번째 식은 각 채널이 독립이라는 가정을 사용하였다. 그리고

$$\begin{aligned} & \Pr \left\{ \min(\gamma_{SR_i}, \gamma_{R_i D} + x) < \Gamma_2 \right\} \\ &= 1 - \Pr \left(\gamma_{SR_i} \geq \Gamma_2 \right) \Pr \left(\gamma_{R_i D} \geq \Gamma_2 - x \right) \\ &= F_{\gamma_{SR_i}}(\Gamma_2) + F_{\gamma_{R_i D}}(\Gamma_2 - x) - F_{\gamma_{SR_i}}(\Gamma_2) F_{\gamma_{R_i D}}(\Gamma_2 - x) \end{aligned} \quad (9)$$

로 쓸 수 있다. 여기서 $\Gamma_x(x)$ 는 랜덤변수의 누적분포함수이며, Rayleigh 페이딩의 경우 $\Gamma_x(x) = 1 - \exp(-x/\bar{X})$ 이 되고, 각 채널이 대칭이라고 가정하면, $\bar{\gamma}_{SR_i} = \bar{\gamma}_{SR}$ 및 $\bar{\gamma}_{R_i D} = \bar{\gamma}_{R_0 D} = \bar{\gamma}_{RD}$ ($i = 1, 2, \dots, M$) 으로 쓸 수 있고, (8)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \Pr \left\{ \min(\gamma_{SR_m}, \gamma_{R_m D} + x) < \Gamma_2 \mid x \right\} \\ &= \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{\Gamma_2}{\bar{\gamma}_{SR}} - \frac{\Gamma_2 - x}{\bar{\gamma}_{RD}} \right) \right\}^M \\ &= \sum_{i=0}^M \binom{M}{i} (-1)^i \exp \left(-\frac{i\Gamma_2}{\bar{\gamma}_{SR}} - \frac{i\Gamma_2 - ix}{\bar{\gamma}_{RD}} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 세 번째 항은 이항전개^[13]를 사용하였다. 그리고 (7)에서

$$f_{\gamma_{R_0 D}} \text{는 Rayleigh 페이딩의 경우 } f_{\gamma_{R_0 D}} = 1/\bar{\gamma}_{R_0 D} \exp(-x/\bar{\gamma}_{R_0 D})$$

을 대입하여 정리하면, 결국 (7)은

$$\Pr\left\{\min(\gamma_{SR_m}, \gamma_{R_mD} + \gamma_{R_mD}) < \Gamma_2, \gamma_{R_mD} < \Gamma_1\right\} \\ = \sum_{i=0}^M \binom{M}{i} (-1)^i \exp\left(\frac{i\Gamma_2}{\bar{\gamma}_{SR}} - \frac{i\Gamma_2}{\bar{\gamma}_{RD}}\right) \frac{1}{1-i} \left\{1 - \exp\left(-\frac{1-i}{\bar{\gamma}_{RD}} \Gamma_1\right)\right\} \quad (11)$$

이 된다. 한편 (6)의 두 번째 확률은

$$\Pr\left\{\min(\gamma_{SR_m}, \gamma_{R_mD} + \gamma_{R_mD}) < \Gamma_2, \gamma_{R_mD} \geq \Gamma_1\right\} \\ = 1 - \Pr\left\{\min(\gamma_{SR_m}, \gamma_{R_mD} + \gamma_{R_mD}) < \Gamma_2, \gamma_{R_mD} < \Gamma_1\right\} \quad (12)$$

이고, 두 번째 확률은 (11)을 대입하면 얻을 수 있다.

그리고 (6)에서 마지막 확률 $\Pr\{\gamma_{SR_m} < \Gamma_1\}$ 의 $S-R_0$ 경로는 $M+1$ 개의 릴레이 중 수신한 SNR이 가장 큰 경로이므로,

$$\Pr\{\gamma_{SR_0} < \Gamma_1\} = \left[1 - \exp(-\Gamma_1 / \bar{\gamma}_{SR})\right]^{M+1} \quad (13)$$

이 된다. 그러므로 (11), (12) 그리고 (13)를 (6)에 대입하면 최종적인 기회전송 증가 릴레이 시스템의 오수신율을 구할 수 있다.

만일 증가릴레이를 사용하지 않고 부분 채널 정보만을 이용하여 $S-R_0-D$ 경로만의 오수신율을 구하면

$$P_{out_single} = \Pr\left\{\min(\gamma_{SR_0}, \gamma_{R_0D}) < \Gamma_1\right\} \\ = 1 - \Pr(\gamma_{SR_0} \geq \Gamma_1) \Pr(\gamma_{R_0D} \geq \Gamma_1) \\ = 1 - \left\{1 - \left[1 - \exp(-\Gamma_1 / \bar{\gamma}_{SR})\right]^{M+1}\right\} \left[\exp(-\Gamma_1 / \bar{\gamma}_{RD})\right] \quad (14)$$

이 된다.

IV. 실험 및 결과

그림2는 릴레이의 수가 변할 때 기회 증가 릴레이 시

스템의 오수신율을 유도한 결과와 Monte Carlo 시뮬레이션 결과를 나타내었다 (그림에서 *는 시뮬레이션 결과임). 그림에서 보는 바와 같이 두 결과가 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

먼저 그림2에서 single path라고 나타낸 것은 전체 $M+1$ 개의 릴레이가 존재할 때 증가릴레이를 사용하지 않고 단지 $S-R_0-D$ 경로 만 존재할 때의 오수신율인 (14)를 이용하여 얻은 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 $S-R_0-D$ 경로만 사용한 경우, 평균 SNR 15 dB 이하에서 릴레이의 수가 1부터 4까지 증가할 때 오수신율은 다소 감소하나, 실제 응용에서는 에러가 많이 발생하기 때문에 큰 의미가 없다. 릴레이의 수에 따라서 오수신율의 변화가 발생한 이유는 소스-릴레이 경로에서 가장 큰 SNR을 수신하는 릴레이 R_0 를 선택하였기 때문이다. 즉, 릴레이 수가 증가할수록 낮은 평균 SNR에서는 성능의 개선효과가 다소 있지만, 평균 SNR이 증가할수록 성능 개선효과는 거의 나타나지 않음을 알 수 있다. 이는 복조 후 송신 릴레이에서 $S-R_0-D$ 경로의 오수신율은 수신 SNR이 높은 $S-R_0$ 경로보다 수신 SNR이 낮은 R_0-D 경로의 영향을 많이 받기 때문이다.

또한 그림2에서 증가 릴레이를 사용하면 증가릴레이를 사용하지 않은 경우 (즉, $S-R_0-D$ 경로만 사용한 경우)에 비하여 시스템의 성능향상이 매우 큰 것을 알 수 있다. 소스-릴레이 경로의 평균 SNR이 릴레이-목적지 경로의 평균 SNR보다 큰 $\bar{\gamma}_{SR} = \bar{\gamma}$, $\bar{\gamma}_{RD} = 0.8\bar{\gamma}$ 인 경우, $R = 1 \text{ bps/Hz}$ 에서 오수신율 1×10^{-3} 을 기준으로 할 때 $S-R_0-D$ 경로만 사용한 경우에 비하여 증가릴레이를 사용하고 M 이 1인 경우 11.9 dB의 이득을 얻었다. 그리고 M 이 2에서 4까지 증가할 때 각각, 4.5 dB, 2.25 dB, 그리고 1.45 dB의 이득을 얻었다. 따라서 전체 릴레이의 수가 1에서 2로 증가할 때 다이버시티 이득이 큰 것은 공간 다이버시티 시스템에서 다이버시티 차수가 1에서 2로 증가할 때 가장 큰 다이버시티 이득을 얻는 것과 동일한 효과이다.

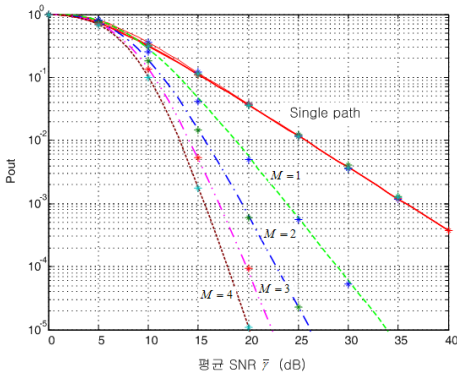


그림 2. 릴레이 수에 따른 기회 증가 릴레이 시스템의 오수신율 ($\bar{\gamma}_{SR} = \bar{\gamma}$, $\bar{\gamma}_{RD} = 0.8\bar{\gamma}$, $R = 1$ [bps/Hz])
 Fig. 2. Outage probability of the Opportunistic incremental relaying system for different number of relays ($\bar{\gamma}_{SR} = \bar{\gamma}$, $\bar{\gamma}_{RD} = 0.8\bar{\gamma}$, $R = 1$ [bps/Hz])

그림3은 $S-R$ 경로의 평균 SNR과 $R-D$ 경로의 평균 SNR이 다를 때 오수신율의 변화를 나타내고 있다. 이 그림은 $R=1$, $M=3$ 인 경우인데, $S-R$ 경로의 평균 SNR이 $R-D$ 경로의 평균 SNR 보다 큰 경우 반대의 경우보다 성능이 우수하다. 즉, $\bar{\gamma}_{SR} = 0.8\bar{\gamma}$, $\bar{\gamma}_{RD} = 0.2\bar{\gamma}$ 인 경로가 $\bar{\gamma}_{SR} = 0.2\bar{\gamma}$, $\bar{\gamma}_{RD} = 0.8\bar{\gamma}$ 인 경로보다 성능이 우수한데, 이는 $S-R$ 경로에서는 수신 SNR이 가장 큰 경로인 $S-R_0$ 을 선택한 영향으로 분석된다.

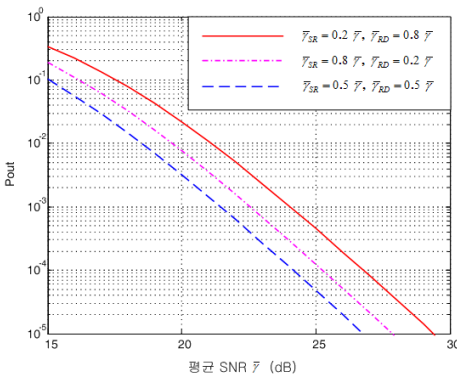


그림 3. $S-R$ 경로 및 $R-D$ 경로의 평균 SNR의 변화에 따른 오수신율 ($R = 1$ [bps/Hz], $M = 3$)
 Fig. 3. Outage probability for different average SNR of $S-R$ and $R-D$ paths ($R = 1$ [bps/Hz], $M = 3$)

또한 소스-릴레이 경로와 릴레이-목적지 경로가 비대칭인 경우 ($\bar{\gamma}_{SR} = 0.8\bar{\gamma}$, $\bar{\gamma}_{RD} = 0.2\bar{\gamma}$)와 대칭인 경우 ($\bar{\gamma}_{SR} = 0.5\bar{\gamma}$, $\bar{\gamma}_{RD} = 0.5\bar{\gamma}$)를 비교하면 대칭인 경우가 성능이 우수한데, 이는 복조 후 전송 릴레이의 성능은 두 경로 중 수신 SNR이 낮은 릴레이-목적지 경로가 성능에 더 큰 영향을 미치기 때문으로 해석된다.

그림4는 목적지에서 요구하는 상호정보량의 변화에 따른 오수신율을 나타내었다. 예측할 수 있듯이 목적지에서 요구하는 상호정보량이 클수록 오수신율은 증가하고 있다.

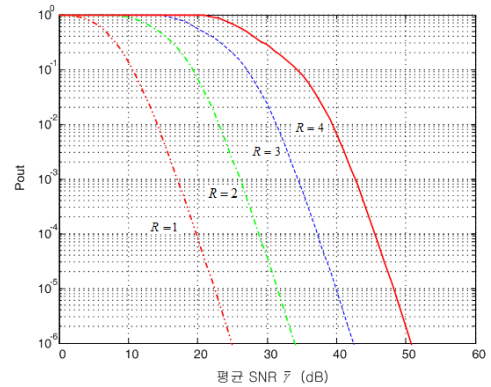


그림 4. 상호정보량의 변화에 따른 오수신율 ($M = 3$, $\bar{\gamma}_{SR} = \bar{\gamma}$, $\bar{\gamma}_{RD} = 0.8\bar{\gamma}$)

Fig. 4. Outage probability for different mutual information ($M = 3$, $\bar{\gamma}_{SR} = \bar{\gamma}$, $\bar{\gamma}_{RD} = 0.8\bar{\gamma}$)

V. 결론

본 논문에서는 직접 경로가 존재하지 않는 기회전송 증가 릴레이 시스템에서 증가 릴레이를 사용하지 않고 부분적인 채널 정보만으로 릴레이를 선택하여 전송하는 경우와, 전체 채널정보를 이용하여 최적의 증가 릴레이를 추가하여 정보를 전송하는 경우 시스템의 성능 향상을 해석적으로 유도하고 그 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 비교 결과 유도한 결과와 시뮬레이션 결과는 매우 잘 일치하였다.

해석 결과 소스-릴레이 사이의 부분적인 채널 정보에 의한 릴레이 선택으로 인한 성능 개선 효과는 주어진 조건에서 오수신율이 1×10^{-1} 이상인 영역에서 미미한 성

능개선이 관찰되었고, SNR이 증가할수록 릴레이 수의 증가에 따른 이득은 얻지 못하였다. 그러나 전체 채널 정보를 이용하여 하나의 릴레이 경로를 추가한 기회전송 증가 릴레이 시스템은 릴레이의 수가 증가 할수록 시스템의 성능이 향상되었다. 특히 릴레이가 하나 증가할 때 두 개 이상 증가할 때보다 더욱 큰 시스템 이득을 얻을 수 있었다. 이는 공간 다이버시티에서 다이버시티 가지(branch)가 하나 증가될 때 가장 큰 이득을 얻는 것과 동일한 효과이다. 그러나 예측하듯이 성능향상은 릴레이 수의 증가에 따라서 선형적으로 비례하지 않고 릴레이 증가에 따른 성능 이득은 점차 감소함을 알 수 있었다.

향 후 본 논문의 결과는 장애물 또는 송신 전력이 작기 때문에 소스-목적지간에 직접 경로가 존재하지 않는 이동통신 시스템과 양방향 TV 방송 시스템에서 기회전송 증가 릴레이 시스템을 사용할 경우 시스템 설계 및 성능 예측에 직접 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

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. on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [2] A. Bletsas, A. Khisti, D. Reed, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 659-672, March 2006.
- [3] N. C. Beaulieu, "A closed-form expression for the outage probability of decode-and-forward relaying in dissimilar Rayleigh fading channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 10, no. 12, pp. 813-815, Dec. 2006.
- [4] Y. Zhio, R. Adve, and T. Lim, "Outage probability at arbitrary SNR with cooperative diversity," *IEEE Communications Letters*, vol. 9, no. 8, pp. 700-702, Aug. 2005.
- [5] Nam-Soo Kim, Seung-Taek Yoon, Beong-Ku An, and Do-Hyun Kim, "Power-limited relay node to the performance of cooperative diversity systems," *Journal of IWIT*, vol. 7, no. 2, pp. 27-33, April 2007.
- [6] A. Bletsas, H. Shin, and M. Win, "Cooperative communications with outage-optimal opportunistic relaying," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 6, no. 9, pp. 3450-3460, Sep. 2007.
- [7] K. Tourki, H.-C. Yang, and M.-S. Alouini, "Accurate outage analysis of incremental decode-and-forward opportunistic relaying," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 10, no. 4, pp. 1021-1025, April 2011.
- [8] Y. Jing and H. Jafarkhani, "Single and multiple relay selection schemes and their achievable diversity orders," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 8, no. 3, pp. 1414-1423, March 2009.
- [9] M. Benjillali and M.-S Alouini, "Outage performance of decode-and-forward partial selection in Nakagami-m fading channels," *Proceedings of International Conference on Telecommunications*, pp. 71-76, April 2010.
- [10] Xu Chen, T.-W. Siu, Q. Zhou, and F. Lau, "High-SNR analysis of opportunistic relaying based on the maximum harmonic mean selection criterion," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 17, no. 8, pp. 719-722, August 2010.
- [11] S. Ikki and M. Ahmed, "Performance analysis of cooperative diversity with incremental-best-relay technique over Rayleigh fading channels," *IEEE Trans. on Communications*, vol. 59, no. 8, pp. 2152-2161, Aug. 2011.
- [12] M. Shaqfeh, F. A.-Qahtani, and H. Alnuweiri, "Optimal relay selection for decode-and-forward opportunistic relaying," *Proceedings of International Conference on Communications, Signal Processing and Their Applications (ICCSPA)*, pp. 1-4, Feb. 2013.
- [13] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of integrals, series, and products*, 6th ed., p. 25, 1.111, Academic Press, 2000.

저자 소개

김 남 수(정회원)



- 1986년 ~ 1994년 : ETRI(전자 통신 연 구원) 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