

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.1.117>

IIBC 2015-1-15

Rayleigh 페이딩 채널에서 Truncated 전력 제어된 기회전송 추가 릴레이 시스템의 전송용량

Capacity of Opportunistic Incremental Relaying System Controlled by Truncated Power in Rayleigh Fading Channels

김남수*

Nam-Soo Kim*

요 약 최근 페이딩 채널에서 발생하는 시스템의 성능열화를 개선하기 위하여 기회전송 추가 릴레이(Opportunistic incremental relaying, OIR) 시스템에 관한 연구가 지속적으로 진행되고 있다. 그러나 OIR 시스템에서 전력제어를 고려한 논문은 많지 않은 실정이며, 지금까지 진행된 연구는 모든 송신기가 모든 채널 정보를 파악하고 있다는 이상적인 가정을 하였다. 그러나 현실적으로 송신기가 모든 채널 정보를 파악하기는 매우 어려운 실정이다. 따라서 본 논문에서는 송신기가 부분적인 채널 정보를 안다고 가정하고, 전력제어 방식으로는 현실적인 Truncated channel inversion(TCI) 방식을 변형하여 제안한 후 OIR 시스템에 적용하였다. 그리고 제안한 OIR 시스템의 전송용량을 유도하였으며, Monte Carlo 시뮬레이션으로 전송용량을 구하였다. 시뮬레이션 결과 릴레이를 사용하지 않고 전력제어만 한 경우보다 본 논문에서 제안한 OIR 시스템의 전송 용량이 항상 컸으며, 릴레이의 수가 증가할수록 전송 용량도 증가하는 것을 알 수 있었다. 특히 주어진 조건에서 릴레이를 사용하지 않은 경우보다 전력제어를 한 OIR 시스템이 릴레이의 수가 1, 3, 그리고 5로 증가함에 전송용량이 각각 29.7%, 32.7%, 그리고 33.5% 증가된 결과를 얻었다. 본 논문의 결과는 현재 사용되고 있는 셀룰러 시스템에 OIR 시스템을 도입할 경우, 이론적인 전송용량 예측에 활용이 가능할 것이다.

Abstract Recently an opportunistic incremental relaying (OIR) system has been studied for improving the performance degradation in fading channel. However there are few studies on power control in the system, and the studies are assumed perfect knowledge of the all channels at transmitters. The assumption that the source know all channel information is difficult in practical channels. Therefore, in this paper we assume that the source knows partial channel information and propose a modified truncated channel inversion (TCI) power control scheme for the OIR system. We derive the channel capacity of the proposed system and perform Monte Carlo simulation. It is noticed that the proposed OIR system has better capacity than that of the power controlled system with direct path only, and the capacity increases with the number of relays. The power controlled OIR system gained more capacity of 29.7%, 32.7%, and 33.5% than that of the system with direct path only for the number of relays of 1, 3, and 5, respectively. The results from this paper can be applied to the estimation of a theoretical capacity for the currently operating cellular systems when they adopt the IOR system.

Key Words : Power control, Opportunistic relaying, Incremental relaying, Fading channel.

*정회원, 청주대학교 전자공학과
접수일자 2014년 10월 13일, 수정완료 : 2014년 12월 24일
게재확정일자 : 2015년 2월 13일

Received: 13 October, 2014 / Revised: 24 December, 2014
Accepted: 13 February, 2015
*Corresponding Author: nskim@cju.ac.kr
Dept. of Electronic Engineering, Cheongju University, Korea

I. 서 론

협동 릴레이 시스템은 무선채널의 페이딩 현상을 극복하기 위한 방안으로 최근에 많은 연구가 진행되어 왔다. 특히 제한된 공간을 갖는 이동단말기에서 여러 개의 안테나를 설치하지 않더라도 공간 다이버시티를 이용하여 시스템의 성능을 향상시키거나 통화 거리를 연장하는데 매우 효과적이다^{[1],[2],[3]}.

특히 여러 개의 병렬 릴레이를 모두 소스로부터 수신한 정보를 목적지로 전송해주는 통신 릴레이로 참여하는 대신에, 수신된 신호 대 잡음비(Signal-to-noise ratio, SNR)가 차단 SNR 이상일 때에만 소스의 정보를 목적지로 전송하는데 참여하도록 하는 기회 협동 릴레이 시스템은 통신 자원(예를 들어 시간, 주파수, 코드 등)을 절약할 수 있는 좋은 방안이 되고 있다^{[4],[5]}. 더욱이 기회전송 추가 릴레이(Opportunistic incremental relaying, OIR) 시스템은 직접 경로를 이용한 통신이 실패하였을 때만 릴레이를 하나 추가하여 전송함으로써 시스템의 성능을 향상시키고 있다. 이 경우 릴레이를 선택하는 방법에 따라서 여러 개의 릴레이를 이용하여 전송하였을 때와 같은 전체 공간 다이버시티 효과를 얻기도 한다^{[6],[7],[8],[9]}.

한편 협동 릴레이 시스템에 각 송신기의 전력을 제어할 도입하여 시스템 전체의 전력 소모와 시스템 내의 간섭을 줄이는 동시에 전송 용량과 성능을 개선하는 연구가 최근 활발히 진행되어 왔다^{[10],[11],[12],[13]}. Deniz Gunduz와 Elza Erkip^[10]은 협동 릴레이 시스템에 전력제어를 적용하였는데, 단순히 릴레이가 하나인 경우만 고려하였기 때문에 여러 개의 릴레이로부터 얻을 수 있는 이득은 연구에 포함시키지 않았다. 그리고 소스에서 소스-목적지 경로 뿐 만 아니라 소스-릴레이 경로의 채널 상태 정보(Channel State Information, CSI)를 완벽히 안다고 가정하였다. 그러나 릴레이가 채널 상태 정보를 제공하기 위해서는 채널의 변화속도 보다 더 짧은 주기로 파일럿 신호를 송신해야 하기 때문에, 2차 전지를 사용하는 사용자 릴레이의 경우에는 추가적인 전력소모의 문제점이 있다. 그리고 채널의 상태에 반비례하는 전력제어를 적용하였기 때문에 채널이득이 매우 작을 때 무한대의 전력을 송신해야 하는 현실적인 문제가 있다^{[14],[15]}.

또한 여러 개의 릴레이가 존재하는 경우, 각각의 릴레이가 파일럿 신호를 전송한다면 시스템 내에 상호간섭이 증가할 뿐 만 아니라^{[11],[16]}, 소스는 각각의 채널상태 정보를 분석해서 송신전력을 결정해야 하는 처리시간도 증가

하게 된다. 특별히 (사용자 단말기에서 기지국으로 전송하는) 역방향 전송인 경우 소스 단말기는 여러 릴레이 채널을 항상 모니터링 해야 하는 부담이 있다.

따라서 본 논문에서는 소스와 목적지 사이에 여러 개의 사용자 릴레이가 존재하며, 전력 소모를 줄이기 위하여 모든 사용자 릴레이는 파일럿 신호를 전송하지 않는다고 가정하였다. 그리고 소스-목적지 경로의 통신이 실패할 경우 추가적으로 사용되는 릴레이는 여러 릴레이 중에서 수신 SNR이 가장 큰 하나의 릴레이를 선택하였다. 그리고 복조 후 전송(Decode-and-forward, DF) 릴레이를 가정하였다. 무선 채널은 소스-릴레이 경로와 릴레이-목적지 경로에서 각각 독립적이고 동일한 레일레이 블록 페이딩(i.i.d Rayleigh block fading)을 가정하였고, 목적지에서는 최대비 합성(Maximal ratio combining, MRC)을 사용하였다. 소스와 목적지 경로, 그리고 선택된 릴레이와 목적지 경로에서는 변형된 Truncated channel inversion (TCI)을 적용하여 송신기의 전력을 제어하였다: 목적지의 수신 SNR이 차단 SNR 이상이 될 때에는 송신전력에 TCI를 적용하였다. 반면 수신 SNR이 차단 SNR 이하인 경우에는 송신전력에 TCI를 적용하지 않고 채널상태와 무관하게 평균 전력을 송신하도록 하였다. 제안한 OIR 시스템의 전송 용량을 유도하였고, 평균 전송 용량을 Monte Carlo 시뮬레이션으로 구한 후 OIR을 적용하지 않은 시스템의 전송용량과 비교하여 OIR 시스템의 전송용량이 개선됨을 보였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서 제안한 OIR 시스템 모델을 설명한 후 전력제어 프로토콜, 그리고 전송 프로토콜을 설명하였다. 그리고 제3장에서 OIR 시스템의 평균 채널 용량을 유도하였다. 제4장에서는 제안한 OIR 시스템이 목적지에서 MRC 수신할 때 Monte Carlo 시뮬레이션을 통해서 전송 용량을 구하고 그 결과를 검토 하였다. 마지막으로 제5장에서 본 논문의 결과를 요약하고 얻어진 주요 결과를 요약하였다.

II. 기회전송 추가 릴레이 (OIR) 시스템 모델

그림 1은 제안하는 OIR 시스템의 모델을 나타내고 있는데, 소스(S)와 목적지(D) 그리고 N 개의 릴레이로 구성되어있다.

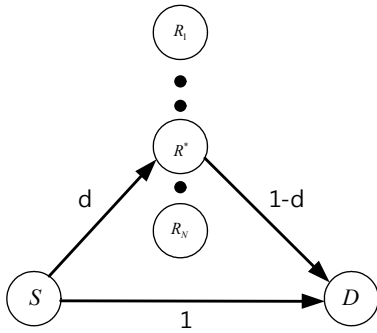


그림 1. 제안하는 OIR 시스템 모델
 Fig. 1. Proposed OIR system model

서론에서 언급한 바와 같이 이 논문에서는 송신기(즉, S 및 선택된 릴레이 R^*)가 채널 상태 정보를 알고 있다고 가정한다. 예를 들어 셀룰러 시스템에서 역방향 전송의 경우, D는 기지국, S 및 R들은 사용자 단말기라고 가정하면 D에서 항상 파일럿 신호를 제공하므로 송신기가 채널 상태 정보를 알 수 있다. 이 가정은 역방향 방송 시스템 등 다른 통신 시스템에서도 쉽게 적용할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 다음과 같이 가정한다:

(1) S와 선택된 R^* 는 각각 S-D 경로 및 $R_i - D$ ($i=1,2,\dots,N$) 경로 (간단히 표기하기 위해서 추후 R-D 경로로 표시)의 CSI를 알고 있다(CSIT). 그러므로 S-D 경로 및 $R^* - D$ 경로는 전력제어를 한다. 그러나 서론에서 가정한 바와 같이 릴레이에서 파일럿 정보를 발생하지 않기 때문에 S는 $S - R_i$ ($i=1, 2, \dots, N$) 경로 (간단히 표기하기 위해서 추후 S-R 경로로 표시)의 채널 상태 정보는 모르며, 따라서 S는 릴레이로 정보를 송신할 때 전력제어를 하지 않는다. D는 S-D 경로 및 $R^* - D$ 경로의 채널 상태 정보를 알고 있다(CSIR).

(2) 각 채널은 블록 페이딩(Block fading)을 받는다. 즉 직접 경로를 통한 전송이 성공하는 경우에는 직접 경로 전송기간 동안, 그리고 직접 경로 전송이 실패하면 간접 경로를 통해서 정보가 전송되는 기간 동안 채널의 상태는 변하지 않는다. 그리고 신호의 크기(amplitude)는 Rayleigh 분포를 갖는다.

(3) 각 채널 (S-D 경로 및 R-D 경로)는 가역성(Reciprocal)을 갖는다.

(4) S-R 및 R-D 거리에 비해서 릴레이들 사이의 거리

가 상대적으로 작다고 가정하여, S-D 경로의 거리를 1로 가정하고, S-R 및 R-D 사이의 거리를 각각 d 및 $1-d$ 로 가정한다. 그리고 수신전력은 $d^{-\alpha}$ 에 비례한다. 여기서 α 는 경로 감쇄이고, 도심에서는 보통 3-4사이의 값을 갖는다^[17].

1. 송신전력제어

제안한 OIR 시스템에서 송신전력은 심한 페이딩으로 인한 무한대의 전력 전송을 방지하면서, 협동 추가 릴레이를 사용하기 위하여 기존의 TCI 전력제어 방식을 다음과 같이 변형하였다:

(1) 수신한 SNR이 차단 SNR γ_0 보다 크면, 송신기의 출력은 기존의 TCI 전력제어 방식과 동일하게 TCI을 적용한 전력을 송신한다^{[14],[15]}.

(2) 만일 수신된 SNR이 차단 SNR γ_0 보다 작다고 하면, 송신기의 출력은 기존 방식과는 달리 전력제어를 하지 않고 채널 상태와 무관하게 평균 전력을 송신한다.

이를 수식으로 표현하면, 평균 송신전력의 제한을 받은 순간 송신전력 $P(\gamma)$ 은 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$P(\gamma) = \begin{cases} \frac{\sigma \bar{P}}{\gamma}, & \gamma \geq \gamma_0 \\ \bar{P}, & \gamma < \gamma_0 \end{cases} \quad (1)$$

여기서 γ 는 수신된 SNR, \bar{P} 는 평균 송신전력, 그리고 σ 는 수신된 일정한 SNR이다. 그런데 순간 송신전력은 TCI 전력제어 방식에 따라서 평균 송신전력의 제한을 받으므로 다음 식을 만족시켜야 한다^[14],

$$\bar{P} = \int_{\gamma_0}^{\infty} P(\gamma) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (2)$$

여기서 레일레이 페이딩을 가정하면 확률밀도함수 $f_{\gamma}(\gamma)$ 는 지수분포를 하며,

$$f_{\gamma}(\gamma) = \frac{1}{\gamma} e^{-\gamma/\gamma} \quad (3)$$

이 된다. 여기서 $\bar{\gamma}$ 는 수신된 평균 SNR이다. 그러므로 수신된 SNR이 γ_0 보다 작을 확률은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_0 = \int_0^{\gamma_0} \frac{1}{\bar{\gamma}} e^{-\gamma/\bar{\gamma}} d\gamma = 1 - e^{-\gamma_0/\bar{\gamma}}. \quad (4)$$

2. OIR 시스템 전송 프로토콜

제한된 OIR 시스템의 전송 프로토콜은 2단계로 이루어지는데, 단계 1에서는 S가 송신하고 D 및 R은 수신한다. 그리고 단계 2에서는 선택된 릴레이 R^* 가 D로 송신한다.

단계 1에서는 D에서 수신 SNR이 차단 SNR보다 크면 ($\gamma \geq \gamma_0$ 인 경우), S는 (1)에 의하여 TCI 전력제어하여 D로 정보를 전송한다. 그리고 간접경로를 통한 정보전송은 하지 않는다. 만일 $\gamma < \gamma_0$ 인 경우에는, S는 (2)에 따라서 평균 전력을 송신한다. 이 때 추가 릴레이를 이용하는데, 추가 릴레이를 선택하는 방법은 여러 가지가 있다.

본 논문에서는 전력소모가 적고 하드웨어의 구성이 현실적인 시스템을 고려하고 있기 때문에 전체 시스템의 채널 상태를 모니터링하여 최적의 릴레이를 지정해 주는 중앙 컨트롤러 등이 별도로 존재하는 시스템은 배제한다. 따라서 N 개의 $S-R_i$ 경로 중 수신한 SNR이 가장 큰 릴레이를 간접경로(S- R^* -D)를 구성하는 추가 릴레이로 선택하는데, 이때 선택된 릴레이 R^* 는 다음과 같이 쓸 수 있다;

$$R^* = \arg \max_{i=1,2,\dots,N} (\gamma_{SR_i}). \quad (5)$$

만일 각각의 릴레이가 수신된 SNR에 반비례하도록 송신한다고 가정하면 가장 큰 SNR를 수신한 릴레이가 가장 먼저 송신하므로, 다른 릴레이들은 먼저 송신하는 릴레이가 있으면 송신하지 않으면 별도의 컨트롤러 없이도 (5)에 의해서 선택된 릴레이만 S로부터 받은 신호를 D로 송신하게 된다.

단계 2에서는 선택된 릴레이 R^* 가 R^* -D 경로의 채널 상태 정보를 알기 때문에 (1)에 의하여 전력제어된 신호를 전송한다. D에서는 단계 1에서 S로부터 받은 신호

와 단계 2에서 R^* 로 부터 받은 신호를 최대비 합성(MRC)하여 복조한다.

III. OIR 시스템의 채널 용량

부가성 백색 잡음(AWGN) 하에서 채널용량은 다음과 같이 쓸 수 있다

$$C = \frac{1}{M} \log_2(1 + \gamma) \quad [\text{bps/Hz}]. \quad (6)$$

여기서 M 은 정보를 전송하는 타임슬롯의 횟수이며, γ 는 수신 SNR이다.

S-D 직접경로에서는 수신 SNR이 차단 SNR보다 큰 경우($\gamma_{SD} \geq \gamma_1$ 인 경우)에는 채널 상황에 맞추어 송신전력을 제어하고, 차단 SNR보다 작은 경우($\gamma_{SD} < \gamma_1$ 경우)에는 채널의 상황과 무관하게 평균 전력을 송신하므로 (1)로부터 직접경로의 순간 채널용량은 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$C_{SD} = \begin{cases} \log_2(1 + \sigma_{SD}), & \gamma_{SD} \geq \gamma_1 \\ \log_2(1 + \gamma_{SD}), & \gamma_{SD} < \gamma_1 \end{cases}. \quad (7)$$

여기서 γ_1 은 직접 경로에서의 차단 SNR이다. 그런데, σ_{SD} 는 평균 송신전력의 제한이 있을 때 수신된 일정한 SNR 값이므로 (1)과 (2)로부터

$$\int_{\gamma_0}^{\infty} \frac{P_{SD}(\gamma)}{\bar{P}_{SD}} f_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) d\gamma_{SD} = \int_{\gamma_0}^{\infty} \frac{\sigma_{SD}}{\gamma_{SD}} f_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) d\gamma_{SD} = 1 \quad (8)$$

이 되므로,

$$\sigma_{SD} = \frac{1}{\int_{\gamma_0}^{\infty} \frac{1}{\gamma_{SD}} f_{\gamma_{SD}}(\gamma_{SD}) d\gamma_{SD}} = \frac{\bar{\gamma}_{SD}}{E_1\left(\frac{\gamma_1}{\bar{\gamma}_{SD}}\right)} \quad (9)$$

이 된다. 여기서 $P_{SD}(\gamma)$ 및 \bar{P}_{SD} 는 S-D 경로의 순간 송

신전력 및 평균 송신전력이며, S-D 사이의 거리를 1로 가정하였으므로 S-D 경로의 평균 SNR $\bar{\gamma}_{SD} = \bar{P}_{SD} / N_0$ 이다. N_0 는 잡음전력이며 모든 수신기에서 동일하다고 가정하자. 그리고 $E_1(x)$ 는 exponential integral 이며 다음과 같이 정의된다^[18].

$$E_1(x) = \int_1^{\infty} t^{-1} e^{-xt} dt, \quad \text{Re } x > 0. \quad (10)$$

그러므로 레일레이 페이딩 하에서 TCI 전력제어를 하는 직접 경로의 전송용량 (7)는 다음과 같이 쓸 수 있다

$$\begin{aligned} C_{SD} &= (1 - P_0) \log_2(1 + \sigma_{SD}) + P_0 \log_2(1 + \gamma_{SD}) \\ &= e^{-\frac{\gamma_1}{\bar{\gamma}_{SD}}} \log_2 \left\{ 1 + \frac{\bar{\gamma}_{SD}}{E_1(\gamma_1 / \bar{\gamma}_{SD})} \right\} + (1 - e^{-\frac{\gamma_1}{\bar{\gamma}_{SD}}}) \log_2(1 + \gamma_{SD}) \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 P_0 는 (4)에 주어진 값이다.

한편, 간접 경로는 $S - R^*$ 경로와 $R^* - D$ 경로로 구성 되어 있는데, $S - R^*$ 경로에서는 전력제어를 하지 않으므로 $S - R^*$ 경로의 채널용량은

$$C_{SR^*} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{SR^*}) \quad (12)$$

으로 쓸 수 있다. 여기서 γ_{SR^*} 는 S- R^* 경로에서 수신된 SNR이다.

그리고 전력제어를 하는 $R^* - D$ 경로의 채널용량은 직접 경로의 채널용량과 유사하게 얻을 수 있는데,

$$C_{R^*D} = \begin{cases} \frac{1}{2} \log_2(1 + \sigma_{R^*D}), & \gamma_{R^*D} \geq \gamma_2 \\ \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{R^*D}), & \gamma_{R^*D} < \gamma_2 \end{cases} \quad (13)$$

이 되고, γ_2 는 $R^* - D$ 경로의 차단 SNR이다. 그리고 σ_{R^*D} 는 (9)에 γ_{SD} 및 $\bar{\gamma}_{SD}$ 대신에 각각 γ_{R^*D} 및 $\bar{\gamma}_{R^*D}$ 를

대입하면 얻을 수 있다. 그리고 레일레이 페이딩 하에서의 전송용량 C_{R^*D} 도 (11)과 유사하게 얻을 수 있다.

한편 D에서는 채널용량을 최대화 하기 위하여 S-D 경로와 $R^* - D$ 경로에서 수신한 신호를 MRC하므로, 채널용량은 각 경로의 채널용량의 합($C_{R^*D} + C_{SD}$)으로 쓸 수 있다. 그리고 DF 릴레이를 사용하는 간접 경로에서의 채널용량은 $S - R^*$ 경로의 채널용량과 $R^* - D$ 경로의 채널용량 중 작은 채널용량(Bottle neck)에 의해서 결정되므로 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$C_{SR^*D} = \min(C_{SR^*}, C_{R^*D} + C_{SD}) . \quad (14)$$

결국 OIR 시스템의 순간 채널용량은 직접 경로에서의 채널용량과 간접 경로에서의 채널용량 중 최대 채널용량으로 정의할 수 있다:

$$C_{OIR} = \max(C_{SD}, C_{SR^*D}) . \quad (15)$$

그림1에 나타난 바와 같이, 릴레이의 위치에 따른 시스템의 전송용량을 고려하기 위해서 $S - R_i$ ($i=1,2,\dots,N$) 경로의 평균 SNR이 동일하다고 가

정하면, $\bar{\gamma}_{SR_i} = \bar{\gamma}_{SR^*}$ 가 되고 $\bar{\gamma}_{SR^*} = \frac{\bar{P}_{SD}}{N_0} \frac{1}{d^\alpha}$ 이다. 또한,

$R^* - D$ 사이의 거리는 $1-d$ 이므로 $\bar{\gamma}_{R^*D} = \frac{\bar{P}_{SD}}{N_0} \frac{1}{(1-d)^\alpha}$ 로 쓸 수 있다.

IV. 수치적인 예 및 결과

그림 2는 $d = 0.5$, $\alpha = 3$ 인 경우, $\gamma_{SD} \geq \gamma_1$ 일 때 S-D 경로의 채널용량 (7) 및 $\gamma_{R^*D} \geq \gamma_2$ 일 때 $R^* - D$ 경로의 채널용량 (13)을 나타낸 것인데, 예측하였듯이 S-D 경로의 평균 SNR이 커질수록 채널 용량은 증가하고 있다. 그리고 S-D 경로의 평균 SNR이 커질수록 채널용량을 최대로 하는 차단 SNR도 증가하는 것을 볼 수 있다.

C_{SD} 에 비해서 C_{R^*D} 가 적은 것은 간접경로에서는 데이터 전송을 위해서 2개의 타임 슬롯($M=2$)이 필요하기 때문에 2로 나누어 준 영향이 크기 때문이다.

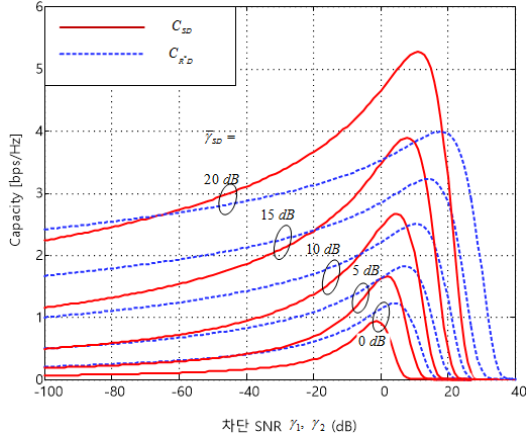


그림 2. S-D 경로 및 $R^* - D$ 경로의 채널용량 ($\gamma_{SD} \geq \gamma_1, \gamma_{R^*D} \geq \gamma_2, d = 0.5, \alpha = 3$)

Fig. 2. Capacity of S-D and $R^* - D$ paths ($\gamma_{SD} \geq \gamma_1, \gamma_{R^*D} \geq \gamma_2, d = 0.5, \alpha = 3$)

그림 3은 그림2와 같이 S-D 경로 및 $R^* - D$ 경로의 채널용량을 최대로 하는 차단 SNR γ_1 및 γ_2 을 설정하였을 때, 제안한 OIR 시스템의 순간 채널용량 (15)을 Monte Carlo 시뮬레이션하여 평균 채널용량을 구한 결과를 나타낸 것이다. 그림 3에서 보는 바와 같이 제안한 OIR 시스템의 채널 용량은 직접경로만 사용한 경우 ($N=0$)에 비하여 항상 증가하였으며, S-D 경로의 평균 SNR이 작을수록 채널 용량의 증가가 많다는 것을 알 수 있다. 이는 채널 용량이 수신된 SNR의 로그 값에 비례하기 때문으로 해석된다. 또한 릴레이의 수가 증가 할수록 다소의 채널 용량의 증가는 있었으나 증가 폭은 크지 않았다. 이는 간접경로에서의 채널 용량의 증가는 (14)에 나타낸 바와 같이 $S - R^*$ 경로 및 $R^* - D$ 경로 채널 용량의 최소값을 따르기 때문으로 해석된다.

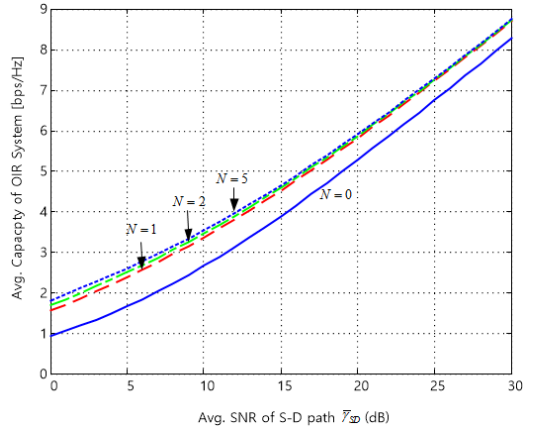


그림 3. 평균 수신 SNR에 따른 OIR 시스템의 평균 채널용량 ($d = 0.5, \alpha = 0.3, \gamma_1$ and γ_2 at max capacity, 1×10^5 iteration)
 Fig. 3. Average channel capacity of the OIR system vs. average SNR ($d = 0.5, \alpha = 0.3, \gamma_1$ and γ_2 at max capacity, 1×10^5 iteration)

그림 4는 릴레이의 위치에 따른 채널 용량 변화를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 전력제어를 하지만 직접 경로만 사용한 경우($N=0$)는 릴레이를 사용하지 않으므로 릴레이의 위치와 무관하게 일정한 채널 용량 2.66 bps/Hz를 나타낸다. 그리고 릴레이의 수 $N=1$ 인 경우는 거리 $d=0.3$ 인 지점에서 최대 전송 용량 3.45 bps/Hz, $N=3$ 인 경우는 거리 $d=0.4$ 인 지점에서 최대 전송 용량 3.53 bps/Hz, 그리고 $N=5$ 인 경우는 거리 $d=0.42$ 인 지점에서 최대 전송 용량 3.55 bps/Hz를 나타내었는데, 이는 $N=0$ 인 경우에 비하여 각각 전송용량이 29.7%, 32.7%, 그리고 33.5% 증가된 것이다. 그러므로 제안한 OIR 시스템은 릴레이의 수가 증가할수록 전송 용량이 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 전송용량은 릴레이 수에 비례하여 증가하지는 않는다. 또한 릴레이의 수가 증가할수록 최대 전송용량을 나타내는 릴레이의 위치가 점차 S-D 경로의 중앙에 가까워지는 것을 알 수 있다. 이는 [10]에서 Multi-hop protocol의 경우 S-D 경로의 중간지점에서 전송용량이 가장 커지는 결과에 접근하는데, 그 이유는 $S - R^*$ 경로에서는 전력제어를 하지 않고, 수신한 SNR이 가장 큰 릴레이를 선택하여서 공간 다이버시티 효과가 거리확장으로 나타난 것으로 해석된다.

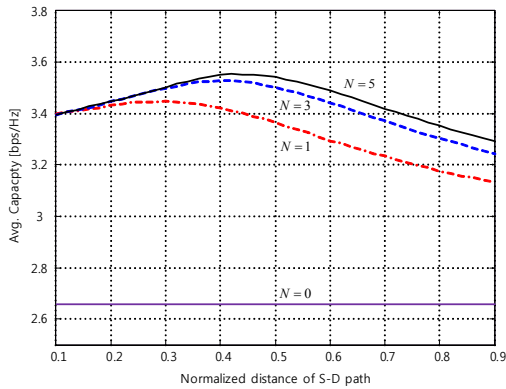


그림 4. 거리에 따른 OIR 시스템의 평균 채널용량
 ($\alpha=3, \bar{\gamma}_{SD}=10dB, \gamma_1$ and γ_2 at max capacity, 1×10^5 iteration)
 Fig. 4. Average channel capacity of the OIR system vs. distance
 ($\alpha=3, \bar{\gamma}_{SD}=10dB, \gamma_1$ and γ_2 at max capacity, 1×10^5 iteration)

V. 결론

본 논문에서는 기회전송 추가 릴레이(OIR) 시스템에서 전력제어를 하였을 경우 시스템의 전송용량을 해석하였다. 전력제어 방식으로는 현실적인 TCI 방식을 변형하여 적용하였는데, 수신한 SNR이 차단 SNR보다 큰 경우는 TCI를 적용하여 송신 전력제어를 하고, 차단 SNR보다 작은 경우는 극심한 전력소모를 방지하기 위해서 전력제어하지 않고 평균 전력을 송신하는 방법을 제안하고 OIR 시스템에 적용하였다.

그리고 제안한 OIR 시스템의 전송용량을 유도하였으며, Monte Carlo 시뮬레이션으로 전송용량을 구하였다. 시뮬레이션 결과 릴레이를 사용하지 않고 전력제어만 한 경우보다 본 논문에서 제안한 OIR 시스템의 전송 용량이 항상 컸으며, 릴레이의 수가 증가할수록 전송 용량도 증가하는 것을 알 수 있었다. 특히 그림 4에서 주어진 조건에서 릴레이를 사용하지 않은 경우보다 전력제어를 한 OIR 시스템이 릴레이의 수가 1, 3, 그리고 5로 증가함에 전송용량이 각각 29.7%, 32.7%, 그리고 33.5% 증가된 결과를 얻었다. 또한 $S-R^*$ 경로에서는 전력제어를 하지 않지만 릴레이의 수가 증가함에 따라서 전송 용량이 증가하는 지점이 이상적인 경우와 마찬가지로 릴레이의 위치가 S-D의 중간지점으로 접근함을 알 수 있었다.

따라서 본 논문의 결과는 현재 사용되고 있는 이동통

신 시스템 및 이동 방송 시스템에 OIR 시스템을 도입할 경우, 전송용량을 예측하기 위한 이론적인 근거로 활용이 가능할 것이다.

References

- [1] G. Kramer, M. Gastpar, and P. Gupta, "Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks," IEEE Trans. on Information Theory, vol.51, no.9, pp.3037-3063, Nov. 2005.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] N.C. Beaulieu and J. Hu, "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.
- [5] 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.
- [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] M. Shaqfeh, F. Al-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.
- [9] Nam-Soo Kim, "Performance Evaluation of Opportunistic Incremental Relaying Systems using Partial and Full Channel Information in Rayleigh Fading Channels," *Journal of IIBC*, vol.13, no.6, pp. 71-78, Dec. 2013.
- [10] Deniz Gunduz and Elza Erkip, "Opportunistic cooperation by dynamic resource allocation," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol.6, no.4, pp.1446-1454, April 2007.
- [11] J. Luo, R. S. Blum, L. J. Cimini, L. J. Greenstein, and A.M. Haimovich, "Decode-and-forward cooperative diversity with power allocation in wireless networks," *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol.6, no.3, pp.793-799, March 2007.
- [12] Weisi Guo and Ian J. Wassell, "Capacity-outage-tradeoff (COT) for cooperative networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.30, no.9, pp. 1641-1648, Oct. 2012.
- [13] Y.-R. Tsai and L.-C. Lin, "Optimal power allocation for decode-and-forward cooperative diversity under an outage performance constraint," *IEEE Communications Letters*, vol.14, no.10, pp.945-947, Oct. 2010.
- [14] Andrea J. Goldsmith and P. Varaiya, "Capacity of fading channels with channel side information," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol.43, no.6, pp.1986-1992, Nov. 1997.
- [15] M.-S Alouini and Andrea J. Goldsmith, "Capacity of Rayleigh fading channels under different adaptive transmission and diversity-combining techniques," *IEEE Trans. on Vehicular Technol.*, vol.48, no.4, pp.1165-1181, July 1999.
- [16] I. Maric nad R. Yates, "Bandwidth and power allocation for cooperative strategies in Gaussian relay networks," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol.56, no.4, pp. 1880 -1889, April 2010.
- [17] G. L. Stuber, *Principles of mobile communication*, 2nd Ed., Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [18] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of integrals, series, and products*, 6th Ed., pp.xxxv, 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