

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.5.69>

IIBC 2016-5-11

페이딩 채널에서 기회전송 증가 NOMA 릴레이 시스템의 성능분석

Performance of Opportunistic Incremental NOMA Relay System in Fading Channels

김남수*

Nam-Soo Kim*

요약 본 논문에서는 5세대 이동통신 네트워크에서 도입하고자하는 순차 간섭제거(Successive interference cancellation)를 채택한 비직교 다중화(Non-orthogonal multiple access) 시스템에 협동 릴레이를 채택하였을 경우의 시스템 성능을 유도하였다. 그동안의 연구는 단순히 지정된 릴레이를 대상으로 연구가 진행되었지만 본 논문에서는 최대-최소 릴레이 선택법을 적용한 기회전송 증가 릴레이 시스템의 오수신율을 해석적으로 분석하였다. 그리고 현실적인 이동통신 환경을 고려하여 릴레이는 균일 포아송 분포로 모델링하였고, 시스템의 성능을 더욱 개선하기 위하여 목적지에서 최대비 합성(Maximal ratio combining)을 적용하였다. 수치적인 해석 결과 원/근 사용자 송신전력비가 클수록 오수신율이 개선되었으며, 직접 경로만 사용하여 정보를 전송하는 경우보다 릴레이를 사용한 협동 시스템의 성능이 항상 우수함을 나타내었다. 또한 포아송 밀도가 높을수록 공간 다이버시티 이득이 커지고 결국 성능이 개선됨을 확인하였다.

Abstract In this paper, we investigate the system performance of a cooperative relaying system of Non-orthogonal multiple access (NOMA) with successive interference cancellation (SIC), which is considered promising application in fifth generation (5G) cellular networks. Previous studies have focused on the selected relays, however we include the maxmin relay selection and derive analytical outage probability of opportunistic incremental relaying systems. For the realistic mobile environment, the distributions of relays are modeled as a homogeneous Poisson point process (PPP). And maximal ratio combining (MRC) is adapted to improve the system performance at the destination node. Analytical results demonstrate the outage probability improves with the near/far user power ratio, and the cooperative relaying scheme can achieve low outage probability in comparison to the no relaying scheme. It is also conformed that the increase of the intensity of PPP cause higher gains of the spacial diversity and hence the performance improves.

Key Words : NOMA, Spatially random, Cooperative relay, MRC, SIC.

1. 서론

이동통신 시스템이 발전할수록 한정된 스펙트럼 대역을 활용하여 더욱 많은 정보를 더욱 빠르게 전송하도록

요구받고 있다. 그러므로 한정된 스펙트럼 내에서 이러한 요구를 만족시키기 위해서는 기존에 사용되어오던 방식으로는 한계에 도달하여 새로운 전송방식을 모색하고 있는 상황이다.

*정회원, 청주대학교 전자공학과
접수일자 : 2016년 7월 22일, 수정완료 : 2016년 8월 27일
게재확정일자 : 2016년 10월 7일

Received: 22 July, 2016 / Revised: 27 August, 2016 /

Accepted: 7 October, 2016

*Corresponding Author: nskim@cju.ac.kr

Dept. of Electronic Engineering, Cheongju University, Korea

최근 5세대 이동통신 시스템(5G)에서는 스펙트럼 효율을 향상시키기 위하여 다양한 주파수 비 직교방식을 검토하고 있는데, 대표적인 방식이 수신 단계 순차 간섭 제거(Successive interference cancellation, SIC)를 채택한 비직교 다중화(Non-orthogonal multiple access, NOMA)이다. 이 방식은 4세대 이동통신 시스템(4G)에서 사용 중인 직교주파수 다중화(Orthogonal frequency multiple access, OFDM) 방식을 시스템의 전체적인 구조변경 없이 수신기에 SIC를 첨가하여 그대로 적용할 수 있기 때문에 5G에서 유력한 후보로 검토되고 있다[1]-[3].

[1]~[3]에 나타난 바와 같이, SIC를 첨가한 NOMA 시스템 (이하 SIC NOMA 시스템)은 동일한 시간에 서로 다른 정보를 송신전력을 상이하게 중첩 전송하는 것으로 비록 수신시에 간섭이 존재하지만, 근 거리 사용자에 SIC를 적용하고 원거리 사용자에 큰 전력으로 송신하면 각각의 신호를 수신할 수 있기 때문에 스펙트럼을 효율적으로 사용할 수 있는 장점을 갖는다.

그 동안 SIC NOMA 시스템에 대한 협동 다이버시티 시스템에 관한 연구가 있었는데 [5]-[7], [5]는 사전 정보를 이용하여 사용자 쌍을 이루어서 정보를 전송할 때 시스템의 성능을 유도하였고, [6]은 릴레이 선택법과 무관하게 릴레이를 랜덤하게 선택할 때의 성능만을 해석하였고, [7]은 릴레이가 공간상에 랜덤하게 분포되지 않고 고정되어 있을 때의 성능을 유도하였다.

그러나 저자가 알기에는 SIC NOMA 릴레이 시스템에서 통신 자원을 더욱 효율적으로 사용할 수 있다고 알려진 기회전송 증가 협동 릴레이 시스템[8]-[10]을 적용한 연구는 아직 발표되고 있지 않았으며, 더욱이 여러 개의 소스-목적지 경로 중에서 최대-최소(Maxmin) 릴레이 선택법을 채용한 연구 역시 발표된 바가 없다. 특히 릴레이 선택법에 따른 성능의 변화는 여러 연구자들의 연구 주제 중의 하나이며, Maxmin 선택법은 준 최적의 방법으로 알려져 있기 때문에 협력 통신 시스템에서 빈번히 채택되고 있다[8]-[9].

따라서 본 논문에서는 릴레이가 셀 내에 랜덤하게 분포하는 실제적인 이동통신 환경을 고려하기 위하여, 릴레이의 위치를 균일 포아송 분포로 모델링하였다. 그리고 여러 개의 소스-목적지 경로 중에서 Maxmin 릴레이 선택법을 적용하였을 때 SIC NOMA 릴레이 시스템의 성능을 유도하였다. 릴레이는 복조 후 전송 릴레이를 적용하였으며, 목적지에서 최대비 합성결합(Maximal ratio

combining, MRC)을 사용하였다. 유도한 결과는 릴레이를 채택하지 않은 시스템과 비교하여 본 논문에서 고려한 기회전송 증가 NOMA 릴레이 시스템의 성능이 항상 우수함을 보였다.

본 논문의 구성은 제2장에서 본 논문에서 가정한 시스템 모델을 설명하였으며, 직접파 및 간접파의 수신신호, 릴레이 선택법과 기회전송 증가 릴레이 시스템의 전송 프로토콜을 설명하였다. 제3장에서는 레일레이 채널환경에서 포아송 분포된 릴레이 시스템의 성능을 수학적으로 유도하였다. 그리고 제4장에서는 여러 가지 변수에 따른 수치적인 예를 들어서 시스템의 성능변화를 검토하였고, 제5장에서는 본 논문의 결론을 서술하였다.

II. 시스템 모델

그림 1은 이동통신 환경에서 랜덤하게 분포된 릴레이의 공간상 모델을 나타낸 것인데, 여기서 L 은 셀의 반경을 나타내고, 목적지 D 가 셀의 가장 자리에 위치한다고 가정한다. 그리고 셀의 중심에 소스 S 가 있으며, 소스와 목적지 사이에 여러 개의 릴레이 R_i ($i = 1, 2, \dots, M$)가 랜덤하게 위치한다고 가정한다(여기서 M 은 통화영역 내에 있는 릴레이의 갯수이다). 그러므로 릴레이의 위치를 반경 L 내에 밀도 λ 로 균일하게 분포된 포아송 분포(Poisson point process)로 가정하자. 이 그림에서 검정색 작은 원은 통화 영역 내에 있는 릴레이를 나타낸다. 통화영역 내에 있는 릴레이 세트는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Phi_r = \{R_i, i = 1, 2, \dots, M\} \quad (1)$$

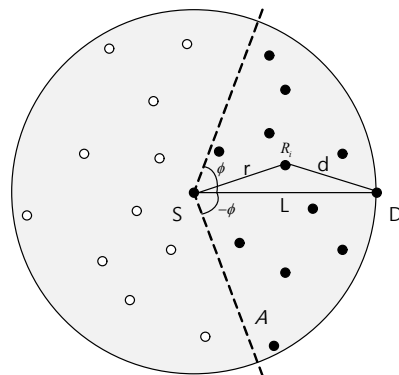


그림 1. 공간상 랜덤한 릴레이 모델
Fig. 1. Spatially random Relay model

SIC NOMA 시스템에서는 소스가 릴레이와 목적지로 보내는 각각의 메시지를 동시에 전송하는데 일반적으로 소스로 부터 가까운 릴레이는 적은 전력으로, 그리고 먼 목적지는 큰 전력으로 송신한다. 따라서 소스로 부터의 송신 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다[2].

$$x_S = P_S(a_1x_D + a_2x_R) \quad (2)$$

여기서 P_S 는 소스의 송신전력이며, a_1 과 a_2 는 전력할당 계수인데, $a_1^2 + a_2^2 = 1$ 이고 $a_1^2 > a_2^2$ 이다. 그리고 x_D 와 x_R 은 각각 목적지 및 릴레이로 전송하는 정보이며, $|x_D|^2 = |x_R|^2 = 1$ 이다.

1. 직접파 수신

소스에서 송신된 신호는 무선 채널을 통과한 후 릴레이 및 목적지에서 수신되는데 각 무선 채널은 서로 독립이며 동일한 레일리 분포를 갖는다고 가정하자.

NOMA 시스템에서는 소스로부터 원거리에 위치한 사용자에게는 큰 전력으로 송신하지만 SIC를 수행하지 않으므로, 목적지에서 수신한 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y_{SD} = \sqrt{P_S}(a_1x_D + a_2x_R) \frac{h_{SD}}{L^{\alpha/2}} + n_D \quad (3)$$

여기서 h_{SD} 는 소스와 목적지 사이의 채널이득이다. α 는 무선 채널의 감쇄지수이며 채널의 상태에 따라서 보통 2 ~ 5의 값을 갖는다[11]. 그리고 n_D 는 목적지의 잡음을 나타낸다. 따라서 목적지에서 수신한 신호 대 간섭 잡음비 (Signal-to-interference plus noise ratio, SINR)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\gamma_{SD}^{x_D} = \frac{\rho_S a_1^2 |h_{SD}|^2}{\rho_S a_2^2 |h_{SD}|^2 + L^\alpha} \quad (4)$$

여기서 $\rho_S = P_S/\sigma^2$ 으로 송신 신호 대 잡음비 (Signal-to-noise ratio, SNR)이다. 그리고 목적지에서 잡음전력은 σ_D^2 으로 나타낼 수 있는데, 일반적으로 모든 수신기의 잡음전력이 동일하다고 가정하므로 여기서는 σ^2 으로 표시하였다.

한편 릴레이에서 소스로부터 수신한 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y_{SR} = \sqrt{P_S}(a_1x_D + a_2x_R) \frac{h_{SR}}{r^{\alpha/2}} + n_R \quad (5)$$

그런데 릴레이는 상대적으로 목적지보다 가까우므로 작은 전력으로 정보를 송신하는 대신 SIC를 수행하는데, 다음과 같은 2가지 단계를 거치게 된다: 수신된 신호로부터 목적지 정보를 SIC로 찾아낸 후, 다음으로 수신된 신호에서 간섭신호인 목적지 정보를 제거하여 릴레이 정보를 찾아낸다. 따라서 릴레이에서 목적지 정보에 대한 SINR은

$$\gamma_{SR}^{x_D} = \frac{\rho_S a_1^2 |h_{SR}|^2}{\rho_S a_2^2 |h_{SR}|^2 + r^\alpha} \quad (6)$$

여기서 h_{SR} 는 소스와 릴레이 사이의 채널이득이다. 그리고 목적지 정보를 SIC한 후의 릴레이 정보에 대한 SNR은

$$\gamma_{SR}^{x_R} = \frac{\rho_S a_2^2 |h_{SR}|^2}{r^\alpha} \quad (7)$$

로 쓸 수 있다.

2. 간접파 수신

릴레이에서 SIC에 의해서 복조된 정보 x_D 를 목적지로 송신하면 수신된 신호는 다음과 같다.

$$y_{RD} = \sqrt{P_R} \frac{h_{RD}}{L^{\alpha/2}} x_D + n_D \quad (8)$$

여기서 P_R 은 릴레이의 송신전력이다. 따라서 수신 SNR은

$$\gamma_{RD}^{x_D} = \frac{\rho_R |h_{RD}|^2}{d^\alpha} \quad (9)$$

이 되고, 여기서 $\rho_R = P_R/\sigma^2$ 이다. 한편 목적지는 직접 경로 및 간접 경로에서 수신한 신호를 최대비 합성 결합하면 (4) 및 (9)로부터,

$$\gamma_{D,MRC}^{x_D} = \gamma_{SD}^{x_D} + \gamma_{RD}^{x_D} = \frac{\rho_S a_1^2 |h_{SD}|^2}{\rho_S a_2^2 |h_{SD}|^2 + L^\alpha} + \frac{\rho_R |h_{RD}|^2}{d^\alpha} \quad (10)$$

로 쓸 수 있다.

3. 최적의 릴레이 선택

최적의 릴레이를 선택하는 방법에는 여러 가지가 있지만 가장 대표적인 방식이 릴레이에서 수신된 SNR이 임계치를 넘는 후보 릴레이 중에서 릴레이-목적지 경로의 SNR이 최대가 되는 릴레이를 선택하는 Max 선택법과 모든 소스-릴레이-목적지 경로의 SNR 병목현상을 최소화시키는 Maxmin 선택법이 있다[12]-[13]. 이 논문에서는 성능이 우수한 Maxmin 선택법을 적용하였는데, 선택된 릴레이의 인덱스는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$k = \arg \max \min \{ \gamma_{SR_i}, \gamma_{R_iD} \}, i = 1, 2, \dots, M \quad (11)$$

여기서 M 은 릴레이의 수이며, γ_{SR_i} 와 γ_{R_iD} 는 각각 소스- i 번째 릴레이 경로 및 i 번째 릴레이 - 목적지 경로의 SNR이다. 따라서 선택된 릴레이는 R_k 이다.

4. 전송 프로토콜

기회전송 증가 릴레이 시스템을 이용하여 정보를 전송하기 위하여 시간 직교채널을 이용하면 소스에서 목적지로 정보를 전송하기 위하여 2개의 타임 슬롯이 필요하다. 첫 번째 타임슬롯은 방송 단계에 사용되고, 두 번째 타임슬롯은 릴레이 단계에 사용된다.

첫째, 방송단계에서는 소스에서 정보를 송신하고 목적지 및 릴레이가 수신한다. 만일 목적지에서 수신한 SNR이 미리 정한 임계값보다 크면 정보전송을 종료하고 간접경로를 이용하지 않는다, 반대로 임계값보다 작으면 정보전송에 실패하였다는 피드백 비트를 소스 및 릴레이로 송신한다.

둘째, 릴레이 단계에서는 목적지로부터 피드백 신호가 있을 때 사전에 선택된 릴레이가 소스로 부터 수신한 정보를 목적지로 재전송한다. 목적지에서는 직접경로(S-D 경로)와 간접경로(S-R-D 경로)에서 수신한 신호를 최대비 결합(MRC)하여 수신한다.

III. 오수신율 유도

시스템의 성능을 오수신율로 유도하자. 오수신율은 시스템의 성능을 유도하는데 변조방법과 무관하게 사용할

수 있으며, 수신된 SNR이 임계값보다 작을 때 발생된다. 만일 임계값보다 크면 되면 오수신이 발생되지 않고, 모든 정보가 에러없이 수신되었다고 가정하는 것이다.

목적지에서는 직접 경로 및 간접경로로부터 수신된 신호를 MRC하여 복조한다고 가정하였다. 따라서 직접 경로와 간접 경로 모두 에러가 발생할 때 오수신이 되며, 목적지에서 직접 경로 및 간접 경로의 신호를 결합하므로 서로 독립하지 않다. 따라서 오수신율은 다음과 같이 결합확률로 나타낼 수 있다.

$$P_{out} = \Pr \{ \gamma_{SD} < \Gamma_1, \gamma_{eq} < \Gamma_2 \} \quad (12)$$

여기서 Γ_1 과 Γ_2 는 직접 경로 및 간접 경로의 임계값인데, $\Gamma_1 = 2^R - 1$ 이고 $\Gamma_2 = 2^{2R} - 1$ 이다. 이때 R 은 목적지에서 요구하는 채널용량(bit/sec/Hz)이다. 목적지에서 요구하는 채널용량이 R 이라고 하여도 간접경로는 정보를 전송하기 위하여 2개의 타임슬롯을 사용하기 때문에 임계값이 직접 경로의 임계값과 다를 수 있다. 그리고 (12)에서 γ_{eq} 는 간접 경로를 통하여 수신된 SNR인데, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\gamma_{eq} = \max \min \{ \gamma_{SR_i}^{x_D}, \gamma_{R_iD}^{x_D} + \gamma_{SD}^{x_D} \}, i = 1, 2, \dots, M \quad (13)$$

(12)에서 $\gamma_{SD} < \Gamma_1$ 는 (4)으로부터

$$\frac{|h_{SD}|^2}{L^\alpha} < \frac{\Gamma_1}{\rho_S(a_1^2 - \Gamma_1 a_2^2)} \quad (14)$$

으로 쓸 수 있는데, 여기서 $z = \frac{|h_{SD}|^2}{L^\alpha}$, $\xi = \frac{\Gamma_1}{\rho_S(a_1^2 - \Gamma_1 a_2^2)}$ 으로 치환하면 (14)는 $z < \xi$ 가 되고, z 가 지수분포를 하므로 누적분포함수(Cumulative density function, cdf)는

$$F_z(x) = 1 - e^{-xL^\alpha} \quad (15)$$

가 된다. 그리고 $\xi > 0$ 이므로 $\Gamma_1 < a_1^2/a_2^2$ 이다. 여기서 a_1^2/a_2^2 를 원/근 사용자 송신 전력비라고 하자. 또한 확률 밀도함수 (Probability density function, pdf)는 (15)를 미분하여,

$$f_z(x) = L^\alpha e^{-xL^\alpha} \quad (16)$$

가 된다.

(12)는 γ_{SD} 와 γ_{eq} 가 서로 독립하지 않으므로

$$P_{out} = \int_0^{\Gamma_1} f_{SD}(u) \Pr\{\gamma_{eq} < \Gamma_2 | \gamma_{SD}^{x_D} = u\} du \quad (17)$$

로 쓸 수 있다. 그리고 (17)에서

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_{eq} < \Gamma_2 | \gamma_{SD}^{x_D} = u) &= \Pr\{\max(\min(\gamma_{SR_i}^{x_D}, \gamma_{RD}^{x_D} + u) < \Gamma_2)\} \\ &= \prod_{i \in \Phi_r} \Pr\{\min(\gamma_{SR_i}^{x_D}, \gamma_{RD}^{x_D} + u) < \Gamma_2\} \end{aligned} \quad (18)$$

이 된다. (18)에서

$$\begin{aligned} \Pr\{\min(\gamma_{SR_i}^{x_D}, \gamma_{RD}^{x_D} + u) < \Gamma_2\} \\ = 1 - \Pr(\gamma_{SR_i}^{x_D} \geq \Gamma_2) \Pr(\gamma_{RD}^{x_D} \geq \Gamma_2 - u) \end{aligned} \quad (19)$$

이 되고, 여기서

$$\Pr(\gamma_{SR_i}^{x_D} \geq \Gamma_2) = \Pr\left(\frac{\rho_S a_1^2 |h_{SR_i}|^2}{\rho_S a_2^2 |h_{SR_i}|^2 + r^\alpha} < \Gamma_2\right) \quad (20)$$

여기서 $X_i = \frac{|h_{SR_i}|^2}{r^\alpha}$, $\epsilon = \frac{\Gamma_2}{\rho_S(a_1^2 - \Gamma_2 a_2^2)}$ 로 치환하면

(20)은

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_{SR_i}^{x_D} \geq \Gamma_2) &= 1 - \Pr(X_i < \epsilon) \\ &= E_{\Phi_r} [e^{-r^\alpha \epsilon}] \end{aligned} \quad (21)$$

이 된다. 마찬가지로 $\epsilon > 0$ 이므로 $\Gamma_2 < a_1^2/a_2^2$ 이다.

(19)에서 두 번째 확률은

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_{RD}^{x_D} \geq \Gamma_2 - u) &= 1 - \Pr\left\{Y_i < \left(\eta - \frac{u}{\rho_R}\right)\right\} \\ &= E_{\Phi_r} \left[e^{-d^\alpha \left(\eta - \frac{u}{\rho_R}\right)} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 $Y_i = |h_{RD}|^2/r^\alpha$ 이고, $\eta = \Gamma_2/\rho_R$ 이다. (21)과 (22)를 (19)에 대입하면,

$$\Pr\left\{\min(\gamma_{SR_i}^{x_D}, \gamma_{RD}^{x_D} + u) < \Gamma_2\right\} = 1 - E_{\Phi_r} \left[e^{-r^\alpha \epsilon - d^\alpha \left(\eta - \frac{u}{\rho_R}\right)} \right] \quad (23)$$

(23)을 (18)에 대입한 후, 다시 (17)에 대입하면

$$P_{out} = \int_0^{\Gamma_1} f_{SD}(u) \prod_{R_i \in \Phi_r} \left[1 - E_{\Phi_r} \left[e^{-r^\alpha \epsilon - d^\alpha \left(\eta - \frac{u}{\rho_R}\right)} \right] \right] du \quad (24)$$

이 된다. 그리고 (24)에 (16)를 대입하면

$$\begin{aligned} P_{out} &= \int_0^\xi L^\alpha E_{\Phi_r} \prod_{R_i \in \Phi_r} \left[1 - e^{-r^\alpha \epsilon - d^\alpha \left(\eta - \frac{u}{\rho_R}\right)} \right] e^{-L^\alpha u} du \\ &= L^\alpha \int_0^\xi \exp\left[-\lambda \int_{-\varnothing}^\infty \int_0^{L^\alpha} e^{-r^\alpha \epsilon - d^\alpha \eta} e^{\frac{d^\alpha u}{\rho_R}} r dr d\theta\right] e^{-L^\alpha u} du \end{aligned} \quad (25)$$

여기서 마지막 등호는 PPP의 생성함수(generating function)을 적용하였다[14]. 그런데 그림1에서 보는 바와 같이 $d = \sqrt{r^2 + L^2 - 2rL \cos \theta}$ 이므로 (25)는 다음 식이 된다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= L^\alpha \int_0^\xi \exp\left[-\lambda \int_{-\varnothing}^\infty \int_0^{L^\alpha} e^{-r^\alpha \epsilon - (r^2 + L^2 - 2rL \cos \theta)^{\alpha/2} \eta} \right. \\ &\quad \left. \times e^{\frac{(r^2 + L^2 - 2rL \cos \theta)^{\alpha/2} u}{\rho_R}} r dr d\theta\right] e^{-L^\alpha u} du \end{aligned} \quad (26)$$

그런데 이 식은 3중적분을 해야 하므로, 특별한 경우로 $\varnothing = \pi$ 이고, $\alpha = 2$ 인 경우를 고려하자.

$$\begin{aligned} P_{out} &= L^2 \int_0^\xi \exp\left[-2\pi\lambda e^{-L^2 \eta + \frac{L^2}{\rho_R}} \int_0^{L^2} e^{-r^2 \left(\epsilon + \eta - \frac{1}{\rho_R}\right)} \right. \\ &\quad \left. \times I_0\left[2rL\left(\eta - \frac{u}{\rho_R}\right)\right] r dr\right] e^{-L^2 u} du \end{aligned} \quad (27)$$

이 된다. 여기서 $I_0(z) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi e^{\pm z \cos \theta} d\theta$ 는 변형된 0차 베셀함수(0th order modified Bessel function)이고 [15,(8.338)], 수식을 정리하면 (27)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{out} = & L^2 \int_0^\zeta \exp[-2\pi\lambda e^{-L^2(\eta - \frac{1}{\rho_R})}] \\
 & \times \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2(k!)^2} \frac{L^{2k} \left(\eta - \frac{u}{\rho_R}\right)^{2k}}{\left(\epsilon + \eta - \frac{1}{\rho_R}\right)^{k+1}} \\
 & \times \left[\gamma\left(k+1, L^2 \left(\epsilon + \eta - \frac{1}{\rho_R}\right)\right) \right] e^{-L^2 u} du
 \end{aligned} \quad (28)$$

여기서 $\gamma(\alpha, x) = \int_0^x e^{-t} t^{\alpha-1} dt$ 는 불완전 감마함수 (Incomplete Gamma function) 이다[15, (8.350)].

IV. 수치적인 예

다음 그림 2는 원/근 사용자 송신 전력비와 임계값과의 관계를 나타낸 것인데, (15) 및 (21)에 나타낸 바와 같이 $\xi > 0$ 및 $\epsilon > 0$ 이어야 하므로 이 조건을 만족시키는 최대 임계값을 표시한다. 그러므로 S-D의 직접 경로가 성공을 한다면 정보를 전송하는데 하나의 타임 슬롯만 사용하므로 임계값 증가할 수 있고, 결국 스펙트럼 효율이 증가한다. 그러나 S-D 직접 경로가 정보전송에 실패한다면 간접 경로를 사용해야 하고, 결국 스펙트럼 효율은 감소하게 된다.

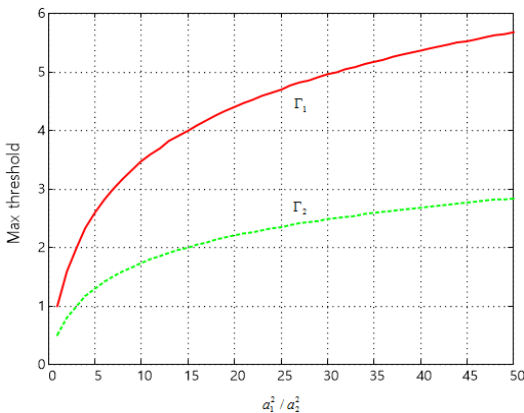


그림 2. 원/근 사용자 송신 전력비와 최대 임계값
Fig. 2. Far/near power ratio vs. max. threshold

그림 3은 $R=1, L=50, \lambda=0.05, \alpha=2$ 인 경우 송신전력 할당에 따른 오수신율을 나타낸 것인데, 그림에

서 보는 바와 같이 목적지로 전송하는 정보에 큰 전력을 할당할수록 오수신율은 감소하는 것을 알 수 있다.

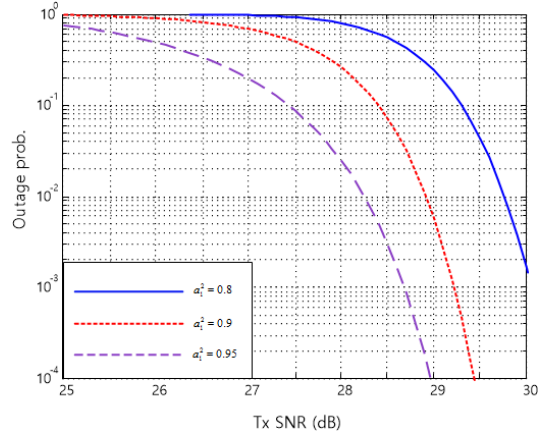


그림 3. 송신 전력할당에 따른 오수신율
($R=1, L=50, \lambda=0.05, \alpha=2, \rho_S = \rho_R$)

Fig. 3. Outage probability for different power allocations
($R=1, L=50, \lambda=0.05, \alpha=2, \rho_S = \rho_R$)

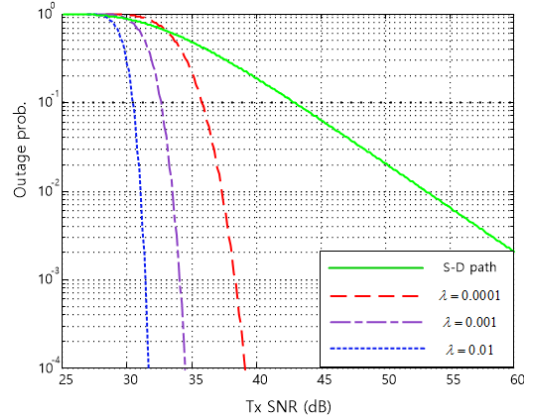


그림 4. 포아송 밀도에 따른 오수신율
($R=1, L=50, a_1^2 = 0.8, \alpha=2, \rho_S = \rho_R$)

Fig. 4. Outage prob. for different Poisson intensity
($R=1, L=50, a_1^2 = 0.8, \alpha=2, \rho_S = \rho_R$)

그림 4는 포아송 밀도의 변화에 따른 오수신율을 나타내고 있다. 이 그림에서 “S-D path”는 직접 경로만을 사용한 경우를 나타낸 것인데, 이 경우에는 협동 시스템에서 사용되는 총 송신전력(소스 및 릴레이의 송신전력)을 소스 단독으로 송신하였다고 가정하고 목적지에서의 오수신율을 구한 것이다. 그러나 그림에서 보듯이 직접 경

로만 사용한 경우와 릴레이를 사용한 시스템의 전체 송신전력이 동일하다고 하여도, 직접 경로만 사용할 때보다 기회전송 증가 릴레이 시스템의 성능이 포아송 밀도와 무관하게 항상 우수하였다. 또한 이 그림에서 포아송 밀도가 증가할수록 소스와 목적지 사이에 존재하는 릴레이의 수는 증가하고, 결국 공간 다이버시티 효과로 성능이 개선됨을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 제5세대 이동통신 시스템에서 도입하고자 하는 SIC NOMA 시스템을 대상으로 기회전송 증가 릴레이를 적용하고 Maxmin 릴레이 선택법을 사용한 경우를 고려하여 시스템의 성능을 해석적으로 유도하였다. 특히 고려하는 시스템은 성능 향상을 위하여 복조 후 전송 릴레이를 사용하고, 목적지에서 최대 비 합성 결합을 적용하였다. 그리고 실제적인 이동통신 환경을 고려하여, 릴레이의 위치를 균일 포아송 분포로 모델링하였다.

수치적인 해석 결과 SIC NOMA 시스템에서는 원/근 사용자 송신 전력비가 클수록 수신신율은 감소하였다. 또한 협동 릴레이를 사용하지 않고 직접 경로만 사용할 때보다 기회전송 증가 릴레이 시스템의 성능이 항상 우수함을 알 수 있었다. 그리고 포아송 밀도가 증가할수록 소스와 목적지 사이에 존재하는 릴레이의 수는 증가하고, 결국 공간 다이버시티 효과로 성능이 개선됨을 알 수 있다.

본 논문의 결과는 향후 도입될 5세대 이동통신 시스템에 협동 통신을 적용할 경우 통신 링크 해석을 위한 이론적인 근거로 활용이 가능할 것으로 생각된다.

References

[1] K. Higuchi and A. Benjebbour, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) with successive interference cancellation for future radio access," *IEICE Commun.*, vol.E98-B, no.3, pp.403-414, March 2015.
[2] A. Benjebbour, Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Li, A. Harada, and T. Nakamura, "Concept and practical

considerations of non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access," *Proc. ISPACS 2013*, pp.770-774, Nov. 2013.

- [3] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, and K. Higuchi, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access," *Proc. Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp.1-5, June 2013.
[4] Z. Ding, Z. Yang, P. Fan, and H. Poor, "On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users," *IEEE Signal Processing Letters*, vol.21, no.12, pp.1501-1505, Dec. 2014.
[5] Z. Ding, M. Peng, and H. Poor, "Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems," *IEEE Commun. Letters*, vol.19, no.8, pp.1462-1465, Aug. 2015.
[6] Y. Liu, Z. Ding, M. Elkashlan, H. Poor, "Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems with SWIFT," *Proc. of 23rd European Signal Processing Conf. (EUSPACO2015)*, pp.1999-2003, Sep. 2015.
[7] J. Men and J. Ge, "Performance analysis of non-orthogonal multiple access in downlink cooperative network," *IET Communications*, vol.9, no.9, pp.2267-2273, Dec. 2015.
[8] 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.
[9] 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.
[10] 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.
[11] G. L. Stuber, *Principles of mobile communication*, 2nd Ed., Kluwer Academic Publishers, 2001.
[12] 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.

- [13] Nam-Soo Kim, “Performance comparison of relay selection methods for incremental cooperative relaying systems with spatially random relay,” Journal of IIBC, vol.16, no.3, pp.65–71, Jun 2016.
- [14] D. Stoyan, W. Kendall, and J. Mecke, Stochastic geometry and its applications, John Wiley and Sons Ltd, 1995.
- [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
- <주관심분야 : 이동통신 시스템의 무선 링크 해석, 기회전송 릴레이 시스템, NOMA 시스템>

※ 이 논문은 2016~2018학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음.