

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.5.25>

IIBC 2017-5-4

사용자 릴레이를 채택한 협동 NOMA 시스템의 최적 전력할당

Optimum Power Allocation of Cooperative NOMA Systems based on User Relay

김남수*

Nam-Soo Kim*

요약 NOMA (Non-orthogonal multiple access) 시스템은 스펙트럼 효율이 높기 때문에 제5세대 이동통신 방식에서 다중화 방식으로 채택이 매우 유력하다. 본 논문에서는 사용자를 릴레이로 채택한 협동 NOMA 시스템에서 오수신율을 최소화하기 위한 최적의 전력 할당 방법에 관하여 연구하였다. 먼저 릴레이 사용자 및 선택 결합을 갖는 목적지 사용자의 오수신율을 유도한 후, 이를 바탕으로 협동 NOMA 시스템의 오수신율을 유도하였다. 해석적으로 유도한 결과는 Monte Carlo 시뮬레이션한 결과로 입증하였다. 유도한 시스템의 오수신율은 Convex 함수가 되기 때문에, 오수신율을 최적으로 하는 전력할당 값을 최적의 전력할당 계수로 구하였다. 수치적인 계산 결과 목적지 사용자가 요구하는 전송용량이 커질수록 최적의 전력할당 계수가 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 목적지 사용자의 전송용량이 고정된 경우, 릴레이 사용자가 요구하는 전송용량이 증가할수록 최적의 전력 할당계수는 감소하였다.

Abstract NOMA (Non-orthogonal multiple access) system becoming a strong candidate for 5G cellular system of its high spectral efficiency. This paper considers an optimal power allocation scheme to minimize the outage probability of a user relay based cooperative NOMA system. We first derive the outage probabilities of the relay user (RU) and the destination user (DU) with selection combining. Based on these probabilities, the outage probability of the cooperative NOMA system is obtained. The analytical results are verified by Monte Carlo simulation. It is noticed that the outage probability of cooperative NOMA system has a convex function, the optimum power allocation coefficient, which satisfied the minimum outage probability, is calculated. Numerical examples show that the optimal power allocation coefficient increases with the required capacity of DU. While the capacity of DU is fixed, we noticed that the increase of the required capacity of RU decreases the optimal power allocation coefficient.

Key Words : NOMA, Cooperative NOMA, User relay, Power allocation.

1. 서 론

최근 5세대 이동통신 시스템에서 스펙트럼 효율을 높

이고, 데이터 전송 속도 증가 및 정보전송의 신뢰도를 높이기 위하여 기존의 직교 다중화(Orthogonal multiple access) 방식과 더불어 비직교 다중화 (Non-orthogonal

*정회원, 청주대학교 전자공학과

접수일자: 2017년 7월 27일, 수정완료: 2017년 10월 9일

게재확정일자: 2017년 10월 13일

Received: 27 July, 2017 / Revised: 9 October, 2017

Accepted: 13 October, 2017

*Corresponding Author: nskim@cju.ac.kr

Dept. of Electronic Engineering, Cheongju University, Korea

multiple access, 이하 NOMA) 방식의 도입이 가시화되고 있다. 특히 NOMA 시스템에서는 여러 사용자의 정보를 전력레벨을 다르게 다중화하여 동시에 전송함으로써 스펙트럼 효율을 높이고 있다[1]-[4]. 한편 공간 다이버시티 시스템은 무선채널에서 발생하는 페이딩 현상을 극복하여 시스템의 성능 및 전력효율을 높일 수 있는 방법으로 잘 알려져 있기 때문에 NOMA 시스템에서도 공간 다이버시티를 적용한 협동 NOMA 시스템에 관한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다[5],[6].

협동 NOMA 시스템은 다른 사용자의 정보를 중계하기 위하여 릴레이를 사용하는데, 이 때 사용되는 릴레이는 2가지 방식이 있다. 첫째로 전임 릴레이(Dedicated relay) 방식과 사용자 릴레이(User relay)방식이다. 전임 릴레이는 NOMA 시스템에 속해있는 사용자가 아니며 단지 스스로 부터 수신한 신호를 NOMA 시스템 내의 다른 사용자들에게 중계해주는 역할을 전담한다[7],[8]. 한편 Ad-Hoc 네트워크 같이 일시적인 네트워크에서는 전임 릴레이를 사용하는 것 보다 사용자 중에서 릴레이를 설정하는 사용자 릴레이 방식이 바람직하다[5],[6]. 그리고 사용자 릴레이를 사용할 경우에는 NOMA 시스템 내의 모든 사용자가 다중화에 참여하여 순차적으로 자신의 신호를 복조한 후 다음 사용자에게 정보를 전송하는 것 보다 근거리-원거리 사용자를 페어링하여 전송하는 것이 시스템의 복잡도 감소, 간섭 제거시간 단축, 그리고 전력소모 면에서 유리하다[9],[10].

잘 알려진 바와 같이 NOMA 시스템에서는 스스로 부터 가까운 사용자와 원거리 사용자를 구별하여 원거리 사용자에게 전력 가중치를 높여서 전송하는데, 스스로 부터 멀수록 전력 가중치는 더 커진다. 따라서 협동 NOMA 시스템에서도 소스의 한정된 전력을 시스템 내의 사용자들에게 적절히 할당하는 것이 바람직한데, 그동안 전력할당에 관한 연구는 전송용량을 최대화하기 위한 연구[11],[12]와 시스템의 성능을 최대화하기 위한 연구[13]로 나뉘어서 진행되어왔다. 그러나 주로 전임 릴레이를 사용한 협동 NOMA 시스템에 관한 연구가 주류를 이루고 있으며, 시스템의 전송용량 최대화에 연구가 집중되고 있다.

따라서 본 논문에서는 사용자를 릴레이로 채택한 협동 NOMA 시스템에서 오수신율을 최소화하기 위한 최적의 전력 할당 방법에 관하여 연구하고자 한다. 본 논문에서는 근거리-원거리 사용자가 페어링된 협동 NOMA

시스템을 모델로 하여 먼저 릴레이 사용자 (이하 RU, Relaying User)와 목적지 사용자 (이하 DU, Destination User)의 성능을 각각 유도한 후 협동 NOMA 시스템의 오수신율을 유도하였다.

그리고 유도한 시스템의 오수신율을 최소로 하는 최적의 전력할당 값을 유도하였다. 무선채널은 서로 독립인 Rayleigh 페이딩 채널을 가정하였으며, 복조 후 송신(Decode-and-forward) 프로토콜을 갖는 RU, 그리고 DU는 시스템의 성능을 향상시키기 위하여 선택결합(Selection combining)을 채택한 경우를 가정하였다.

본 논문의 구성은 제2장에서 분석하고자 하는 협동 NOMA 시스템 모델을 가정하였고 각 노드의 수신 신호를 설명하였다. 제3장에서 RU, DU, 그리고 협동 NOMA 시스템의 오수신율을 수식적으로 유도하였다. 그리고 제4장에서 시스템의 오수신율을 최소화하기 위한 최적의 전력할당 계수를 유도하였다. 그리고 제5장에서는 유도한 결과를 수치적인 예를 들어서 검토하였으며, 마지막으로 제6장에서 결론을 서술하였다.

II. 협동 NOMA 시스템 모델

그림1은 본 논문에서 고려하는 협동 NOMA 시스템 모델인데, 소스(S)와 사용자 노드들이 랜덤하게 분포되어 있다.

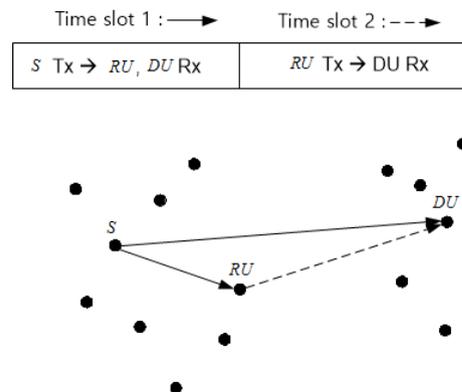


그림 1. 협동 NOMA 시스템 모델
Fig. 1. Cooperative NOMA system model

서론에서 언급한 바와 같이 NOMA 시스템 내의 모든 사용자들이 모두 전송에 참여하게 된다면, 각 사용자들

은 연속 간섭제거(이하 SIC, Successive Interference Cancellation)를 위한 신호처리에 매우 많은 시간과 전력을 소모하게 되고, 또한 에러를 발생할 경우 후속 원거리 사용자에게 에러가 전파되는 현상이 발생된다. 따라서 신호 지연 및 각 사용자의 전력소모, 그리고 에러 전파 현상을 줄이기 위해서 릴레이 사용자와 목적지 사용자로 페어링하여 정보를 전송하는 방법을 여러 논문에서 제안하고 있다[9]-[10].

따라서 본 논문에서도 원거리 사용자와 근거리 사용자를 랜덤하게 페어링하여 소스의 정보를 RU와 DU가 각각 수신하는 경우를 가정한다.

NOMA 시스템에서는 소스가 근거리 사용자 및 원거리 사용자의 정보를 전력을 다르게 다중화하여 전송하므로 소스가 전송하는 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$s(n) = \sqrt{P_S} \{a_D x_D(n) + a_R x_R(n)\} \quad (1)$$

여기서 a_D 및 a_R 은 각각 DU 및 RU 신호에 인가되는 가중치인데 $(a_D)^2 + (a_R)^2 = 1$ 이고, NOMA 시스템은 원거리 사용자에게 가중치를 더 많이 할당하므로 $a_D > a_R$ 이다. 여기서 $(a_D)^2 = \alpha$ 로 정의하고 전력할당 계수라고 하자. P_S 는 소스의 송신전력이다. x_D 와 x_R 은 각각 DU 및 RU의 정보인데, $|x_D|^2 = |x_R|^2 = 1$ 의 값을 갖는다.

그림1에 나타난 바와 같이, 타임슬롯1에서 소스가 정보를 송신하면 시스템 내의 모든 노드들이 수신하는데, 이 때 고려하는 RU가 수신한 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y_{SR}(n) = \sqrt{P_R} \{a_D x_D(n) + a_R x_R(n)\} h_{SR}(n) + n_R(n) \quad (2)$$

여기서 P_R 은 RU의 수신전력이고, $h_{SR}(n)$ 은 소스-릴레이 경로의 채널이득인데, 채널이득의 확률밀도함수는 Rayleigh 분포를 갖고 $|h_{SR}|^2 = 1$ 이다. 그리고 $n_R(n)$ 은 RU의 부가성 백색잡음인데, 평균이 영이고, 분산은 N_0 이다.

먼저 RU는 자신의 정보를 수신하기 위해서 수신된 신호로부터 DU의 정보를 추출하는데, RU에서 x_D 를 수신하기 위한 신호 대 간섭과 잡음비(SINR, Signal-to-

interference plus noise ratio)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\gamma_{SR} = \frac{P_R \alpha |h_{SR}|^2}{P_R (1-\alpha) |h_{SR}|^2 + N_0} = \frac{\alpha |h_{SR}|^2}{(1-\alpha) |h_{SR}|^2 + 1/\rho_{SR}} \quad (3)$$

여기서 $\rho_{SR} = P_R/N_0$ 으로 S-RU 경로에서 수신된 신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-noise ratio)이다. 간섭신호를 SIC로 제거한 후, RU에서 x_R 을 수신하기 위한 신호 대 잡음비는 다음과 같다.

$$\gamma_{SR} = \frac{P_R (1-\alpha) |h_{SR}|^2}{N_0} = \rho_{SR} (1-\alpha) |h_{SR}|^2 \quad (4)$$

타임슬롯2에서는 RU가 SIC를 사용하여 추출한 DU의 정보를 전송한다. 이 때 RU-DU 경로를 통하여 DU가 수신한 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y_{RD}(n) = \sqrt{P_{RD}} a_D x_D h_{RD}(n) + n_D(n) \quad (5)$$

여기서 P_{RD} 는 DU가 RU-DU 경로를 통하여 수신한 전력이다. 그리고 $n_D(n)$ 은 DU의 부가성 백색잡음인데, 평균이 영이고, 분산은 N_0 이다. 따라서 RU가 RU-DU 간접경로를 통하여 수신한 신호 대 잡음비는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\gamma_{RD} = \frac{P_{RD} \alpha |h_{RD}|^2}{N_0} = \rho_{RD} \alpha |h_{RD}|^2 \quad (6)$$

여기서 $\rho_{RD} = P_{RD}/N_0$ 으로 RU-DU 경로에서 수신된 신호 대 잡음비이다. 그리고 DU는 타임슬롯1에서 소스-목적지의 직접경로로부터 수신한 신호와 타임슬롯 2에서 RU-DU의 간접경로를 통하여 수신된 신호를 선택결합한다.

DU가 S-DU 직접 경로를 통하여 수신한 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$y_{SD}(n) = \sqrt{P_{SD}} \{a_D x_D(n) + a_R x_R(n)\} h_{SD}(n) + n_D(n) \quad (7)$$

여기서 P_{SD} 는 DU가 S-DU 경로를 통하여 수신한 전력이다. 그러므로 수신된 SINR은 다음과 같다.

$$\gamma_{SD}^{x_D} = \frac{P_{SD} \alpha |h_{SD}|^2}{P_{SD}(1-\alpha)|h_{SD}|^2 + N_0} = \frac{\alpha |h_{SD}|^2}{(1-\alpha)|h_{SD}|^2 + 1/\rho_{SD}} \quad (8)$$

여기서 $\rho_{SD} = P_{SD}/N_0$ 으로 S-DU 경로에서 수신된 신호 대 잡음비이다.

III. 오수신을 유도

NOMA 시스템은 소스가 RU 및 DU로 각각 송신하고자 하는 정보를 전력 다중화하여 동시에 전송하므로 RU 및 DU에서 각각 오수신을 구해야한다. 여기서 오수신은 수신한 SNR 또는 SINR이 임계값보다 작을 때를 말한다. 먼저 RU의 오수신을 유도한 후, 간접 경로 및 직접경로에서 수신한 신호를 선택 결합한 DU의 오수신을 구하기로하자.

1. RU의 오수신율

RU는 소스로부터 신호를 수신한 후 SIC에 의하여 DU의 간섭을 제거한 후 자신의 정보를 수신한다. 그러므로 오수신이 발생하는 경우는 첫째, RU에서 DU의 정보를 복조하지 못한 경우와 둘째, DU의 정보를 복조하였지만 RU의 정보를 복조하지 못한 경우이다. 따라서 RU의 오수신율 P_{0R} 을 수식으로 나타내면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{0R} = \Pr(\gamma_{SR}^{x_D} < \Gamma_D) + \Pr(\gamma_{SR}^{x_D} \geq \Gamma_D, \gamma_{SR}^{x_R} < \Gamma_R) \quad (9)$$

여기서 $\Gamma_D = 2^{2R_D} - 1$ 이고, $\Gamma_R = 2^{2R_R} - 1$ 인데 각각 DU 및 RU의 임계값을 나타낸다. 그리고 R_D 및 R_R 은 각각 DU 및 RU의 채널용량[bps/Hz]이다. (3)과 (4)를 (9)에 대입하면, 첫 번째 확률은

$$\Pr(\gamma_{SR}^{x_D} < \Gamma_D) = \Pr\left(|h_{SR}|^2 < \frac{\Gamma_D}{\rho_{SR}(\alpha - \Gamma_D(1-\alpha))}\right) = \Pr(|h_{SR}|^2 < \zeta) \quad (10)$$

여기서,

$$\zeta = \frac{\Gamma_D}{\rho_{SR}(\alpha - \Gamma_D(1-\alpha))} \quad (11)$$

인데, $|h_{SR}|^2 > 0$ 이므로

$$\Gamma_D < \alpha/(1-\alpha) \quad (12)$$

이어야 한다. 그리고 (9)의 두 번째 확률 식에서

$$\Pr(\gamma_{SR}^{x_R} < \Gamma_R) = \Pr\left(|h_{SR}|^2 < \frac{\Gamma_R}{\rho_{SR}(1-\alpha)}\right) = \Pr(|h_{SR}|^2 < \eta) \quad (13)$$

이고, 여기서

$$\eta = \Gamma_R/(\rho_{SR}(1-\alpha)) \quad (14)$$

이다. 그러므로 (9)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{0R} = \Pr(|h_{SR}|^2 < \zeta) + \Pr(|h_{SR}|^2 \geq \zeta, |h_{SR}|^2 < \eta) \quad (15)$$

이 식을 정리하면, (15)는

$$P_{0R} = \begin{cases} \Pr(|h_{SR}|^2 < \zeta), & \zeta > \eta \\ \Pr(|h_{SR}|^2 < \eta), & \eta > \zeta \end{cases} \quad (16)$$

이 되므로

$$P_{0R} = F_{|h_{SR}|^2}\{\max(\zeta, \eta)\} \quad (17)$$

이 된다. 여기서 $F_{|h_{SR}|^2}(\cdot)$ 는 $|h_{SR}|^2$ 의 누적분포함수(Cumulative distribution function)인데, 통신 채널을 Rayleigh 페이딩 채널로 가정하였으므로 결국 (17)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{0R} = 1 - e^{-\max(\zeta, \eta)} \quad (18)$$

2. DU의 오수신율

DU에서는 성능을 향상시키기 위하여 간접경로인 RU-DU 경로와 직접 경로인 S-DU 경로로부터 수신한 신호를 선택 결합하므로 DU에서의 오수신율은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{0D} = P_{0,ind} \times P_{0,dir} \quad (19)$$

여기서 $P_{0,ind}$ 과 $P_{0,dir}$ 은 각각 간접경로의 오수신율 및 직접경로의 오수신율을 의미한다. 그런데 간접경로의 오수신은 RU에서 DU의 정보를 복조하지 못하거나, DU에서 DU의 정보를 복조하지 못하는 경우 발생한다. 따라서 간접경로의 오수신율 $P_{0,ind}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{0,ind} = \Pr\left\{\min\left(\gamma_{SR}^{x_D}, \gamma_{RD}^{x_D}\right) < \Gamma_D\right\} \quad (20)$$

$$= 1 - \Pr\left(\gamma_{SR}^{x_D} \geq \Gamma_D\right) \Pr\left(\gamma_{RD}^{x_D} \geq \Gamma_D\right)$$

여기서

$$\Pr\left(\gamma_{SR}^{x_D} \geq \Gamma_D\right) = \Pr\left(|h_{SR}|^2 \geq \frac{\Gamma_D}{\rho_{SR}(\alpha - \Gamma_D(1-\alpha))}\right) \quad (21)$$

$$= \Pr(|h_{SR}|^2 \geq \zeta)$$

이고,

$$\Pr\left(\gamma_{RD}^{x_D} \geq \Gamma_D\right) = \Pr\left(|h_{RD}|^2 \geq \frac{\Gamma_D}{\rho_{RD}\alpha}\right) \quad (22)$$

$$= \Pr(|h_{RD}|^2 \geq \lambda)$$

여기서 $\lambda = \Gamma_D / (\rho_{RD}\alpha)$ 이다. (21) 및 (22)를 (20)에 대입하고, h_{SR} 및 h_{RD} 가 Rayleigh 페이딩을 가정하면,

$$P_{0,ind} = 1 - e^{-(\lambda+\zeta)} \quad (23)$$

가 된다. 또한 직접경로의 오수신율 $P_{0,dir}$ 는

$$P_{0,dir} = \Pr\left(\gamma_{SD}^{x_D} < \Gamma_D\right) = \Pr(|h_{SD}|^2 < \chi) \quad (24)$$

$$= 1 - e^{-\chi}$$

여기서 $\chi = \Gamma_D / \{\rho_{SD}(\alpha - (1-\alpha)\Gamma_D)\}$ 이다. 따라서 선택결합 후의 DU의 오수신율은 (23) 및 (24)를 (19)에 대입하면

$$P_{0D} = \{1 - e^{-(\lambda+\zeta)}\}(1 - e^{-\chi}) \quad (25)$$

가 된다.

IV. 최적의 전력할당

이 장에서는 소스의 한정된 송신전력을 RU 및 DU에 효율적으로 할당하는 방법을 고려하자. 일반적으로 최적 전력할당을 하여 이루고자하는 목적은 서론에서 언급한 바 와 같이 시스템 전송용량의 최대화[11],[12] 또는 시스템 성능의 최대화[12]이다. 이 논문에서는 시스템 성능의 최대화를 목표로 하고 있는데, 시스템 성능을 오수신율로 고려하므로 오수신율의 최소화라고 할 수 있겠다.

먼저 RU의 오수신율은 (18)에 나타낸 바 와 같이 ζ 및 η 의 함수이다. 그림2는 전력 할당 계수에 따른 ζ 및 η 를 (11) 및 (14)를 사용하여 계산한 결과를 표시하였다. 이 그림에서 보는 바 와 같이 계수전력할당계수 α 가 증가하면, ζ 는 감소하고 η 는 증가하는 것을 알 수 있다.

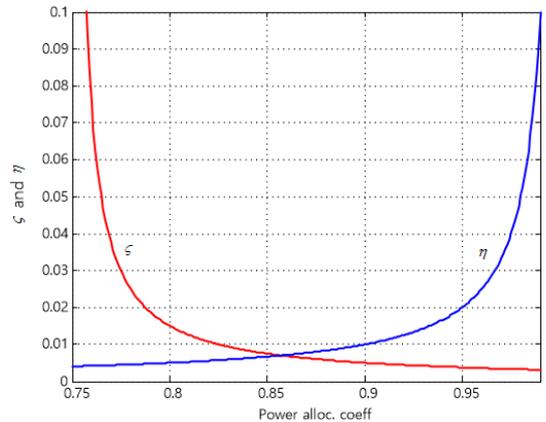


그림 2. 전력할당 계수에 따른 ζ 및 η 값의 변화

($\rho_{SR} = 30 \text{ dB}, R_D = R_R = 1 \text{ bps/Hz}$)

Fig. 2. Power allocation coefficient vs. ζ and η

($\rho_{SR} = 30 \text{ dB}, R_D = R_R = 1 \text{ bps/Hz}$)

ζ 또는 η 중 큰 값을 취하는 RU의 오수신율은 α 가 증가함에 따라서 단조감소 또는 단조증가하지 않는다는

것을 예상할 수 있다. 그림2에서 α 가 증가하면 ζ 는 감소하고 η 는 증가하므로, RU의 오수신율은 그림3에 나타낸 바와 같이 결국 Convex 함수가 된다.

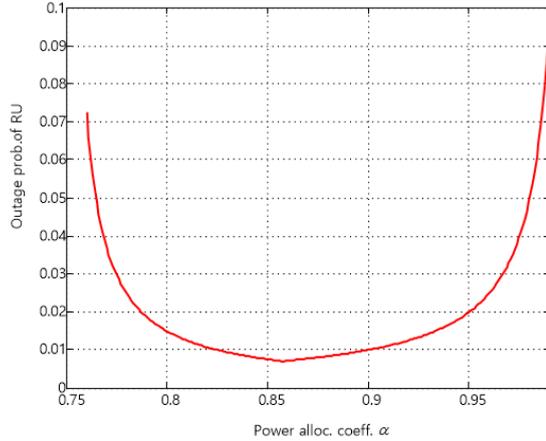


그림 3. 전력할당 계수에 따른 RU의 오수신율

($\rho_{SR} = 30 \text{ dB}$, $R_D = R_R = 1 \text{ bps/Hz}$)

Fig. 3. Power allocation coefficient vs. outage probability of RU

($\rho_{SR} = 30 \text{ dB}$, $R_D = R_R = 1 \text{ bps/Hz}$)

(18)에서 $\max(\zeta, \eta)$ 값이 작아지면 RU의 오수신율이 감소한다. 그러므로 오수신율을 최소화하기 위한 최적화 문제는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\min_{\alpha} \max(\zeta, \eta) \quad (26a)$$

$$\text{subject to } 0 < \alpha < 1 \quad (26b)$$

$$\Gamma_D < \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (26c)$$

여기서 (26c)는 (12)의 조건이다. (26b)와 (26c)를 정리하면 (26)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\min_{\alpha} \max(\zeta, \eta) \quad (27a)$$

$$\text{subject to } \frac{\Gamma_D}{\Gamma_D+1} < \alpha < 1 \quad (27b)$$

일반적으로 최적화 문제를 해결하기 위해서는 Karush-Kuhn-Tucker 조건 (KKT condition)을 적용한다[14]. 그러나 KKT 조건을 적용하여 최적화 문제를 해결하지 않더라도 (27a)를 만족시키는 조건은 그림2에서

알 수 있듯이 $\zeta = \eta$ 이다. 그러므로 $\zeta = \eta$ 를 만족시키는 α 값이 RU의 오수신율을 최소화 할 수 있는 최적의 전력할당 계수가 되며, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\alpha = \frac{\Gamma_D(\Gamma_R+1)}{\Gamma_R + \Gamma_D(\Gamma_R+1)} \quad (28)$$

협동 NOMA 시스템이 성공적으로 수신할 확률은 RU 및 DU가 모두 성공적으로 수신할 확률이 되므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{success} = (1 - P_{oR})(1 - P_{oD}) \quad (29)$$

따라서 (18)과 (25)로부터 시스템의 오수신율은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= 1 - P_{success} \\ &= 1 - e^{-\max(\zeta, \eta)} [1 - \{1 - e^{-(\lambda+\zeta)}\}(1 - e^{-\lambda})] \end{aligned} \quad (30)$$

그런데 α 가 증가하면 λ , ζ , χ 는 감소하므로, DU의 오수신율 (25)는

$$P_{oD} = \{1 - e^{-(\lambda+\zeta)}\}(1 - e^{-\chi}) < 1 - e^{-(\lambda+\zeta)} \quad (31)$$

이 되고, (31)을 (30)에 대입하면

$$P_{out} > 1 - e^{-\max(\zeta, \eta)} e^{-(\lambda+\zeta)} \quad (32)$$

그런데 ζ , λ , ζ , χ 는 모두 양수이고, (32)의 $e^{-(\lambda+\zeta)}$ 는 지수적으로 감소하므로 (32)는

$$P_{out} > 1 - e^{-\max(\zeta, \eta)} \quad (33)$$

으로 쓸 수 있다. 여기서 (33)은 RU의 오수신율임을 주목하자. 결국 시스템 전체의 오율 역시 Convex 함수이고, RU와 동일하게 $\zeta = \eta$ 에서 최소 오수신율을 갖게 된다는 것을 의미한다. 따라서 (28)에서 구한 전력할당계수가 협동 NOMA 시스템의 오수신율을 최소화하는 최적의 값인 것을 알 수 있다.

V. 수치적인 예

그림4는 RU 및 DU, 그리고 협동 NOMA 시스템의 오수신율을 나타낸 것인데, α 가 증가함에 따라서 DU의 오수신율은 감소하고, RU 및 시스템의 오수신율은 감소하다가 증가하는 Convex 곡선을 나타내고 있다. 이 그림에서 전력할당계수가 0.75보다 작은 경우 RU 및 DU의 오수신율이 1로 나타난 것은 NOMA 시스템의 전송 조건인 (12)에 의한 것이다. 그리고 협동 NOMA 시스템의 오수신율은 (30)을 이용하여 구한 것인데, (33)에 나타낸 것처럼 RU의 오수신율을 다소 선회하고 있다. 그림에서 *는 협동 NOMA 시스템의 오수신율을 1×10^6 반복하여 Monte Carlo 시뮬레이션한 결과를 나타내고 있는데, 이론적으로 구한 오수신율과 정확히 일치하고 있다.

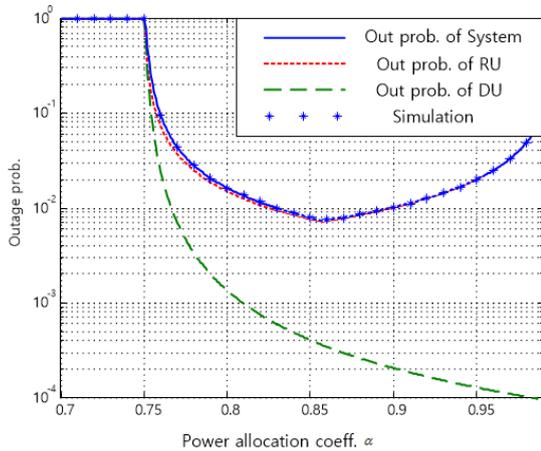


그림 4. 전력할당계수와 오수신율
 $(\rho_{SR} = \rho_{RD} = 30 \text{ dB}, \rho_{SD} = 0.2 \times \rho_{SR}, R_D = R_R = 1 \text{ bps/Hz})$
 Fig. 4. Power allocation coefficient vs. outage probability
 $(\rho_{SR} = \rho_{RD} = 30 \text{ dB}, \rho_{SD} = 0.2 \times \rho_{SR}, R_D = R_R = 1 \text{ bps/Hz})$

그림5는 DU의 채널용량 R_D 에 따른 시스템의 오수신율을 나타내고 있다. 이 그림에서 요구하는 채널용량이 높을수록 오수신율을 최소화하는 최적의 전력할당계수는 증가하는 것을 나타내고 있다. 한편 R_D 가 2 및 1.5인 경우 α 가 각각 0.94 및 0.86 이하가 되면 오수신율이 1이 되는 것은 역시 NOMA 시스템의 전송 조건인 (12)에 의한 것이다.

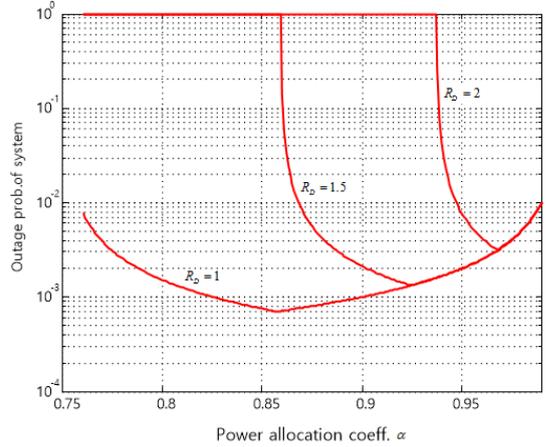


그림 5. DU의 채널용량에 따른 시스템 오수신율
 $(\rho_{SR} = \rho_{RD} = 40 \text{ dB}, \rho_{SD} = 0.2 \times \rho_{SR}, R_R = 1 \text{ bps/Hz})$
 Fig. 5. Channel capacity of DU vs. system outage probability
 $(\rho_{SR} = \rho_{RD} = 40 \text{ dB}, \rho_{SD} = 0.2 \times \rho_{SR}, R_R = 1 \text{ bps/Hz})$

그림6은 요구하는 채널용량 R_D 및 R_R 과 최적의 전력할당계수에 대한 그림인데, R_D 가 클수록 필요한 신호 대 잡음비가 커지고, 따라서 DU에 할당해야 하는 전력이 커야한다는 것을 나타내고 있다. 그리고 R_D 가 고정되어 있을 때 R_R 이 증가하면 α 값은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 RU에 인가되는 전력은 $(1-\alpha)$ 에 비례하므로 α 가 감소한다는 것은 RU에 인가되는 전력이 커지는 것을 의미한다.

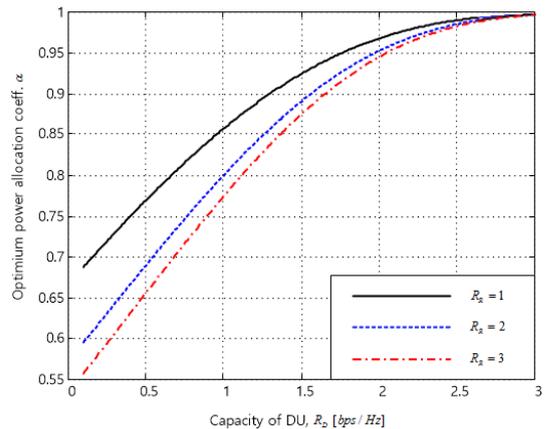


그림 6. 채널용량과 최적 전력할당계수
 Fig. 6. Channel capacity vs. power allocation coefficient

VI. 결론

NOMA 시스템은 소스에서 떨어진 거리에 따라서 각 사용자들의 전력을 서로 다르게 할당하여 동시에 전송함으로써 스펙트럼의 효율을 높이는 전력 다중화 시스템이다. 그리고 공간 다이버시티를 사용하면 무선 채널에서 발생하는 페이딩을 극복하여 시스템의 성능을 향상시킬 수 있기 때문에 NOMA 시스템에서도 공간 다이버시티를 적용한 협동 NOMA 시스템이 활발히 연구가 되고 있다.

본 논문에서는 먼저 선택 결합을 채택한 협동 NOMA 시스템의 RU 및 DU의 오수신율과 시스템의 오수신율을 각각 유도하였다. 오수신율을 유도한 결과, DU의 오수신율은 전력 할당계수가 증가하면 감소하였고, RU의 오수신율은 감소하다가 증가하는 Convex 함수가 되었다. 그리고 협동 NOMA 시스템의 오수신율은 DU보다는 RU의 오수신율의 영향을 많이 받아서 역시 Convex 함수가 되었으며, 시스템 오수신은 RU의 오수신율보다 근소하게 증가하였다.

그리고 유도한 협동 NOMA 시스템의 오수신율이 Convex 함수이므로, 오수신율이 최저값을 가질 때의 전력할당 계수 값이 최적의 전력할당계수가 된다. 계산 결과 DU에서 요구하는 전송용량이 커질수록 최적의 전력할당 계수는 증가하는 것을 알 수 있었다. 그리고 DU의 전송용량이 고정된 경우, RU가 요구하는 전송용량이 증가할수록 최적의 전력 할당계수는 감소하였는데, 이는 RU에 할당하는 전력은 $(1-\alpha)$ 에 비례하므로 α 가 감소할수록 할당 전력이 증가함을 의미한다.

References

- [1] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, and K. Higuchi, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access," *Proceeding of Vehicular Technology Conference (VTC spring)*, pp. 1-6, June 2013.
- [2] Y. Saito, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, and T. Nakamura, "System-level performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA)," *Proceeding of International Symposium on Personal Indoor and Mobile Communications (PIMRC)*, pp. 611-615, Sept. 2013.
- [3] Nam-Soo Kim, "Performance of opportunistic incremental NOMA relay system in fading channels," *Journal of IIBC*, vol. 16, no. 5, pp. 69-76, Oct. 2016.
DOI: <https://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.5.69>.
- [4] Z. Ding, Z. Yang, P. Fan, and H. V. Poor, "On the performance of non-orthogonal multiple access in 5G systems with randomly deployed users," *IEEE Signal Process. Letters*, vol. 21, no. 12, pp. 1501-1505, Dec. 2014.
- [5] Z. Ding, M. Peng, and V. Poor, "Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 8, pp. 1462-1465, Aug. 2015.
- [6] Y. Liu, Z. Ding, M. ElKashlan, and H. V. Poor, "Cooperative non-orthogonal multiple access with simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, no. 4, pp. 938-953, April 2016.
- [7] Jinjin Men and Jianhua Ge, "Performance analysis of non-orthogonal multiple access in downlink cooperative network," *IET Communications*, vol. 9, no. 18, pp. 2267-2273, Dec. 2015.
- [8] Z. Ding, H. Dai, and H. V. Vincent, "Relay selection for cooperative NOMA," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 416-419, Aug. 2016.
- [9] F. Liu, P. Mähönen, and M. Petrova, "Proportional fairness-based user pairing and power allocation for non-orthogonal multiple access," *Proceedings of PIMRC*, pp. 1127-1131, Sept. 2015.
- [10] Z. Ding and H. Poor, "Cooperative energy harvesting networks with spatially random users," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 20, no. 12, pp. 1211-1214, Dec. 2013.
- [11] C. L. Wang and J. Y. Chen, "Power allocation for a downlink non-orthogonal multiple access system," *IEEE Wireless Communications Letters*,

vol. 5, no. 5, pp. 532-535, Oct. 2016.

- [12] S. Timotheou and I. Krikidis, "Fairness for non-orthogonal multiple access in 5G systems," IEEE Signal Processing Letters, vol. 22, no. 10, pp. 1647 - 1651, Oct. 2015.
- [13] J. Cui, Z. Ding, and P. Fan, "A novel power allocation scheme under outage constraints in NOMA systems," IEEE Signal Processing Letters, vol. 23, no. 9, pp. 1226-1230, Sept. 2016.
- [14] Y. Kanno, Nonsmooth mechanics and convex optimization, pp. 61-63, CRC Press, 2011.

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 시스템 무선링크 해석, NOMA 시스템 성능분석, 기회전송 릴레이 시스템

※ 이 논문은 2017~2019 학년도에 청주대학교 산업과학연구소가 지원한 학술연구조성비(특별연구과제)에 의해 연구되었음