

비직교 다중 접속 시스템에서 전송률 공정성을 위한 단순한 전력 할당 기법

Simple Power Allocation Scheme for Data Rate Fairness in NOMA Systems

In-Ho Lee*

*Professor, School of Electronic and Electrical Engineering, Hankyong National University, Anseong, 17579 Korea

ABSTRACT

In this paper, we consider a downlink non-orthogonal multiple access system with a base station and N mobile stations, where we assume that instantaneous channel state information (CSI) is available at the base station. A power allocation scheme is proposed to achieve perfect fairness, which means equal data rates for all mobile stations. However, the power allocation scheme using full CSI requires high complexity. Hence, a simple power allocation scheme with low complexity is proposed by using high signal-to-noise power ratio (SNR) approximation. The simple power allocation scheme can achieve perfect fairness only for high SNR. However, it needs only the best CSI and the simple procedure to obtain power allocation coefficients. From simulation results, we show that the simple power allocation scheme provides remarkable fairness performance at high SNR.

Keywords : Data rate fairness, Non-orthogonal multiple access, Power allocation scheme, Sum rate

I. 서 론

비직교 다중 접속 기술은 전력 차원에서 데이터 신호의 다중화를 허용함으로써 다수의 수신기에서 얻을 수 있는 데이터 전송률을 증가시킬 수 있다[1]-[7]. 비직교 다중 접속 시스템에서는 다수의 수신기에 대한 데이터

신호를 증첩하기 위하여 각 수신기별 상이한 전력 계수를 할당한다. 시스템의 목표 성능 지표에 따라 다양한 전력 할당 기법이 제안되었다. 다수의 수신기가 얻을 수 있는 데이터 전송률의 총 합을 최대화하기 위한 전력 할당 기법[1],[4]-[7]과 각 수신기의 데이터 전송률의 공정성을 최대화하기 위한 전력 할당 기법[2],[3]이 대표적인 예이다.

본 논문에서는 하향링크 비직교 다중 접속 시스템에서 수신기의 데이터 전송률의 공정성 향상에 초점을 두어 복잡도가 낮은 전력 할당 기법을 제안한다. [2]에서는 순시 채널 상태 정보 없이 평균 데이터 전송률의 공정성을 최대화하는 전력 할당 기법을 제안한 반면에 본 논문에서는 순시 채널 상태 정보를 이용하여 순시 데이터 전송률의 공정성을 최대화하는 전력 할당 기법을 제안한다. 특히, 수신기 개수를 2로 한정된 [2]와 달리 본 논문은 수신기의 개수를 제한하지 않고 수신기 수에 따른 평균 데이터 전송률 성능을 평가한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 하나의 기지국과 N 개의 단말기를 갖는 하향링크 비직교 다중 접속 시스템을 고려한다. 여기서, 기지국과 모든 단말기는 하나의 송수신 안테나를 이용한다. 비직교 다중 접속 시스템에서 기지국은 시간슬롯마다 파일럿 신호를 모든 단말기로 전송하고, 단말기는 수신한 파일럿 신호를 이용하여 자신의 하향링크 채널 상태를 추정한다. 그 다음, 각 단말기는 자신의 하향링크 채널 상태 정보를 기지국으로 보고한다. 기지국은 단말기로부터 보고된 하향링크 채널 상태 정보를 이용하여 각 단말기에 해당하는 데이터 신호의 전력 할당 계수를 결정하고, 각 단말기별로 결정된 전력 할당 계수가 적용된 데이터 신호를 합하여 시간슬롯마다 전체 단말기로 전송한다. 여기서, 단말기에서의 채널 추정 오차는 없다고 가정하고, 채널 상태 추정 시점과 실제 데이터

Received 12 July 2020, Revised 12 July 2020, Accepted 24 July 2020

* Corresponding Author In-Ho Lee (E-mail: ihlee@hknu.ac.kr, Tel:+82-31-670-5197)

Professor, School of Electronic and Electrical Engineering, Hankyong National University, Anseong, 17579 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.9.1241>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

신호가 전송되는 시점 사이의 시간지연에 따른 채널 변화는 없다고 가정한다.

비직교 다중 접속 시스템에서 기지국과 n 번째 단말기 사이의 하향링크 채널은 h_n 으로 표기하고, 이 채널 h_n 은 평균 0과 분산 β_n 인 복소 가우시안 분포를 따른다고 가정한다. 따라서, h_n 의 전력인 $|h_n|^2$ 의 평균은 β_n 이다. 기지국의 총 송신전력과 각 단말기의 잡음 전력은 각각 P_t 와 σ^2 으로 표기한다. 여기서, 잡음 전력은 모든 단말기에서 동일하다고 가정하고, 송신 신호대 잡음 전력비를 $\rho = P_t/\sigma^2$ 라고 하자.

본 논문에서 고려하는 비직교 다중 접속 전송을 위한 단말기별 전력 할당을 위하여 $|h_1|^2 > |h_2|^2 > \dots > |h_M|^2$ 을 가정한다. 하향링크 비직교 다중접속 시스템에서 기지국은 각 단말기의 데이터 신호에 상이한 전력 할당 계수를 적용한 후 합하여 전송하기 때문에 n 번째 단말기에서 수신되는 신호의 표현식은 다음과 같다.

$$r_n = h_n \left(\sum_{i=1}^N \sqrt{a_i P_t} s_i \right) + e_n, \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

여기서, r_n 는 n 번째 단말기의 수신 신호이고, s_i 는 i 번째 단말기의 데이터 신호를 의미하고, s_i 의 평균 전력은 1이다. 또한, a_i 는 i 번째 단말기의 데이터 신호에 할당된 전력 계수이고, $0 < a_i < 1$, $\sum_{i=1}^N a_i \leq 1$ 의 조건을 따른다. e_n 은 분산 σ^2 인 복소 가우시안 잡음을 의미한다. 각 단말기에서 식 (1)과 같이 중첩된 수신 신호에서 연속적인 간섭 제거 기법을 이용하여 자신의 신호를 획득하기 위하여 $a_1 < a_2 < \dots < a_N$ 와 같은 전력 할당 계수의 조건을 만족해야 한다. 이 조건에서 각 단말기는 자신의 전력 할당 계수보다 높은 전력 할당 계수를 갖는 단말기의 데이터 신호를 간섭 제거 기법을 이용하여 제거할 수 있다. 따라서, 간섭 제거 후의 첫번째 단말기에 대한 수신 신호는 다음과 같다.

$$r_1 = h_1 \sqrt{a_1 P_t} s_1 + e_1. \quad (2)$$

그리고, 그 외 n 번째 단말기에 대한 수신 신호는 다음과 같다.

$$r_n = h_n \left(\sum_{i=1}^n \sqrt{a_i P_t} s_i \right) + e_n, \quad n = 2, 3, \dots, N. \quad (3)$$

식 (2)과 식(3)으로부터 첫 번째 단말기와 그 외 n 번째 단말기의 수신 신호대 잡음 전력비를 다음과 같이 각각 구할 수 있다.

$$\Gamma_1 = |h_1|^2 a_1 \rho. \quad (4)$$

$$\Gamma_n = \frac{|h_n|^2 a_n \rho}{1 + |h_n|^2 \rho \sum_{i=1}^{n-1} a_i}, \quad n = 2, 3, \dots, N. \quad (5)$$

여기서, Γ_n 는 n 번째 단말기의 수신 신호대 잡음 전력비를 의미한다.

III. 데이터 전송률 공정성을 위한 전력 할당 기법

식 (4)와 식 (5)로부터 n 번째 단말기의 데이터 전송률을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$R_n = \log_2(1 + \Gamma_n), \quad n = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

본 논문에서는 모든 단말기의 데이터 전송률의 공정성 성능을 향상시키기 위하여 모든 단말기에서 동일한 데이터 전송률을 얻기 위한 전력 할당 기법을 제안한다.

기지국은 모든 단말기로부터 전달받은 채널 상태 정보를 이용하여 다음의 조건들을 만족하는 전력 할당 계수($a_i, i = 1, 2, \dots, N$)를 구할 수 있다.

$$R_1 = R_2 = \dots = R_N. \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N a_i = 1. \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)은 총 N 개의 방정식으로 N 개의 미지수 a_i 를 구할 수 있다. 그러나, N 개의 방정식이 단순 방정식의 형태가 아니므로 닫힌 형태로 a_i 를 표현할 수 없다. 따라서, 완전 탐색 알고리즘을 이용하여 N 개의 전력 할당 계수를 찾는다. 이처럼 전력 할당 기법은 완벽한 공정성을 얻을 수 있지만, 높은 복잡성을 유발한다. 그러므로, 본 논문에서 단순한 전력 할당 기법을 제안한다.

비직교 다중 접속 시스템에서 기지국이 모든 단말기에 대한 채널 상태를 알고 있다면, 높은 신호대 잡음 전력비(즉, $\rho \rightarrow \infty$)에서 총 데이터 전송률은 다음과 같이

표현된다[3].

$$\sum_{n=1}^N R_n = \log_2(h_1^2 \rho) . \quad (9)$$

따라서, 식 (9)로부터 N 개의 단말기가 동일한 데이터 전송률을 얻기 위한 조건은 다음과 같다.

$$R_1 = R_2 = \dots = R_N = \frac{\log_2(h_1^2 \rho)}{N} . \quad (10)$$

높은 신호대 잡음 전력비인 경우, 식 (6)은 다음과 같이 단순하게 표현된다.

$$R_1 \approx \log_2(|h_1|^2 a_1 \rho) . \quad (11)$$

$$R_n \approx \log_2 \left(1 + \frac{a_n}{\sum_{i=1}^{n-1} a_i} \right), n = 2, 3, \dots, N . \quad (12)$$

식(10)과 식(11)을 이용하여, a_1 을 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \log_2(|h_1|^2 a_1 \rho) &= \frac{\log_2(h_1^2 \rho)}{N} \\ \Rightarrow a_1 &= (|h_1|^2 \rho)^{\frac{1}{N}-1} . \end{aligned} \quad (13)$$

식 (10), 식 (12), 식 (13)을 이용하여, a_2 를 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \log_2 \left(1 + \frac{a_2}{a_1} \right) &= \frac{\log_2(h_1^2 \rho)}{N} \\ \Rightarrow a_2 &= a_1 \left((|h_1|^2 \rho)^{\frac{1}{N}} - 1 \right) = (|h_1|^2 \rho)^{\frac{1}{N}-1} \left((|h_1|^2 \rho)^{\frac{1}{N}} - 1 \right) . \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)와 같이 $n = 3, \dots, N$ 에 대하여 순차적으로 a_n 을 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \log_2 \left(1 + \frac{a_n}{\sum_{i=1}^{n-1} a_i} \right) &= \frac{\log_2(h_1^2 \rho)}{N} \\ \Rightarrow a_n &= \left(\sum_{i=1}^{n-1} a_i \right) \left((|h_1|^2 \rho)^{\frac{1}{N}} - 1 \right) . \end{aligned} \quad (15)$$

여기서, a_n 을 구한 후 $\sum_{i=1}^n a_i$ 이 1을 초과하면 $a_n = a_{n+1} = \dots = a_N = 0$ 으로 설정한다. 이것은

$\sum_{i=1}^N a_i \leq 1$ 을 만족시키기 위함이다. 이처럼 데이터 전송률의 공정성을 얻기 위한 전력 할당 계수를 식 (13)-(15)로부터 간단하게 구할 수 있다. 다만, 식 (13)-(15)의 단순한 전력 할당 기법은 높은 신호대 잡음 전력비에서만 공정성 향상의 효과가 있기 때문에, 낮은 신호대 잡음 전력비에서는 식 (7)과 식 (8)에 완전 탐색 알고리즘을 이용한 복잡한 전력 할당 기법을 사용하여야 한다.

제안하는 단순한 전력 할당 기법은 높은 신호대 잡음 전력비에서만 이용이 가능하지만, 식 (13)-(15)에서 보여주는 바와 같이 $|h_1|^2$ 의 채널 상태 정보만을 요구한다. 따라서, 채널 상태 정보의 피드백 오버헤드를 크게 줄일 수 있는 장점이 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

그림 1은 $N=2, 4$ 이고, 모든 n 에 대해 $\beta_n=1$ 일 때, Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 식 (7)과 식 (8)에 완전 탐색 알고리즘을 이용한 전력 할당 기법(Perfect fairness scheme)과 식 (13)-(15)의 단순한 전력 할당 기법(Proposed scheme)에 대한 평균 데이터 전송률 결과를 보여준다. 신호대 잡음 전력비의 전체 구간에서 Perfect fairness scheme에 대한 각 단말기의 평균 데이터 전송

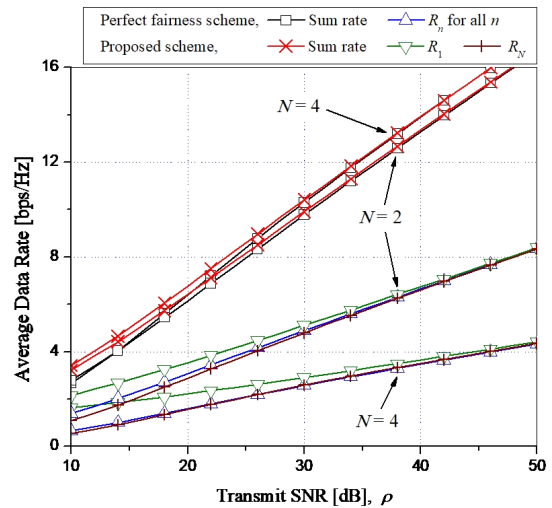


Fig. 1 Average rates of perfect fairness scheme and proposed scheme when $\beta_n = 1$ for all n

률은 모두 동일함을 보여주지만, Proposed scheme의 경우에는 신호대 잡음 전력비가 증가함에 따라 단말기의 평균 데이터 전송률이 유사해짐을 알 수 있다. 여기서, $N=4$ 일 때 R_2 와 R_3 의 평균 결과는 R_1 와 R_N 의 평균 결과 사이에 존재한다. 결과적으로 높은 신호대 잡음 전력비 구간에서 복잡도가 낮은 Proposed scheme이 공정성 성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 채널 상태 정보를 이용하는 하향링크 비직교 다중 접속 시스템에서 데이터 전송률의 공정성 향상을 위하여 복잡도가 낮은 전력 할당 기법을 제안하였다. 제안하는 전력 할당 기법은 복잡도가 낮은 대신 높은 신호대 잡음 전력비 구간에서만 데이터 전송률의 공정성을 보장할 수 있다. 특히, 제안하는 단순한 전력 할당 기법은 일부의 채널 상태 정보만을 이용하기 때문에 채널 상태 정보의 피드백 오버헤드를 현저히 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 따라서, 제안하는 기법은 상향링크 대역폭이 제한된 마이크로 셀 환경에서 전송률 공정성 보장을 위하여 이용될 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education (Grant number: NRF-2018R1D1A1B07042499).

REFERENCES

- [1] L. Zhu, J. Zhang, Z. Xiao, X. Cao, and D. O. Wu, "Optimal user pairing for downlink non-orthogonal multiple access (NOMA)," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 328-331, Apr. 2019.
- [2] I. H. Lee, "Power allocation to improve data-rate fairness of non-orthogonal multiple access users," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 23, no. 9, pp. 1117-1122, Sep. 2019.
- [3] I. H. Lee and H. J. Jung, "User selection and power allocation for downlink NOMA systems with quality-based feedback in Rayleigh fading channels," *published in IEEE Wireless Communications Letters (Early Access)*, Jul. 2020. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9137330>.
- [4] Z. Ding, F. Adachi, and V. Poor, "The application of MIMO to non-orthogonal multiple access," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 1, p. 537-552, Jan. 2016.
- [5] J. B. Kim, I. H. Lee, and J. H. Lee, "Capacity scaling for D2D aided cooperative relaying systems using NOMA," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 1, pp. 42-45, Feb. 2018.
- [6] F. Fang, H. Zhang, J. Cheng, S. Roy, and V. C. M. Leung, "Joint user scheduling and power allocation optimization for energy efficient NOMA systems with imperfect CSI," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 12, pp. 2874-2885, Dec. 2017.
- [7] J. He, Z. Tang, Z. Tang, H. H. Chen, and C. Ling, "Design and optimization of scheduling and non-orthogonal multiple access algorithms with imperfect channel state information," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 11, pp. 10800-10814, Nov. 2018.