JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지 Vol. 26, No. 7: 1040~1046, Jul. 2022

하향링크 비직교 다중 접속 시스템에서 적은 피드백 오버헤드를 이용하는 자원 할당 기법

이인호*

Resource Allocation Scheme Using Small Feedback Overhead in Downlink Non-Orthogonal Multiple Access Systems

In-Ho Lee*

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

요 약

본 논문에서는 셀내 대규모 단말이 존재하는 시스템을 고려하고, 기지국과 단말간 무선 채널은 경로 손실과 레일레이 페이딩 채널을 가정한다. 또한, 전체 시스템 대역폭은 다수의 균일한 주파수 부채널들로 구성된다고 가정한다. 이와 같은 가정하에 대규모 단말들로부터 발생하는 채널 상태 정보의 피드백 오버헤드를 줄이고 자원 할당의 복잡도를 감소시키기 위한 채널 상태 정보의 피드백 기법과 비직교 다중 접속 전송을 위한 자원 할당 기법을 제안한다. 특히, 제안하는 기법에 대하여 셀내 대규모 단말들이 달성할 수 있는 총 데이터 전송률 성능과 셀내 단말들이 목표 데이터 전송률을 충족하지 못하는 아웃티지 확률 성능을 분석한다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안 기법은 평균 총 데이터 전송률 성능을 저하시키지만, 우수한 아웃티지 성능을 제공할 수 있음을 보여준다.

ABSTRACT

In this paper, we consider a system with massive user equipments (UEs) in a cell and assume path loss and Rayleigh fading channels between the base station (BS) and UEs. In addition, it is assumed that the system bandwidth consists of multiple identical frequency subchannels. Under such assumptions, we propose a channel state information (CSI) feedback scheme and a resource allocation scheme for non-orthogonal multiple access (NOMA) transmission in order to reduce the feedback overhead of CSI generated by massive UEs and to reduce the complexity of resource allocation. In particular, for the proposed schemes, we analyze the sum data rate achievable by massive UEs in a cell and the outage probability with which the UEs in a cell do not meet the target data rate. Through the simulation results, we show that the proposed schemes can provide the superior outage probability, although it degrades the average sum data rate.

키워드 : 비직교 다중 접속, 자원 할당, 피드백 오버헤드, 총 데이터 전송률, 아웃티지 확률

Keywords : Feedback overhead, Non-orthogonal multiple access, Outage probability, Resource allocation, Sum data rate

Received 28 May 2022, **Revised** 2 June 2022, **Accepted** 6 June 2022

*** 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.2022.26.7.1040 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

비직교 다중 접속 (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 기술은 5세대 무선 통신 시스템의 스펙트럼 효율 향상을 위하여 고려된 후보 기술들 중 하나이다[1]. 또한, NOMA는 6세대 사물인터넷 (Internet of Things, IoT)에서 대규모 단말들의 연결을 실현하기 위한 기술로 고려되고 있다[2].

하향링크의 전력 기반 NOMA에서는 기지국이 다수의 단말들의 데이터 신호를 중첩하여 동시에 전송하고, 그 중첩된 신호를 수신한 단말들은 순차적 간섭 제거 (Successive Interference Cancellation, SIC) 기법을 사용하여 자신의 데이터를 디코딩한다. 이러한 전력 기반 NOMA를 이용하는 셀룰라 시스템에서 총 데이터 전송률, 스펙트럼 효율, 에너지 효율, 아웃티지(outage) 확률 등의 시스템 성능을 개선하기 위하여 주파수 부채널 자원 할당 기법, NOMA 전송을 위한 단말 선택 기법, 송신 전력 할당 기법, 빔포밍(beamforming) 기법 등이 연구되어 왔다[3-6]. 하향링크 셀룰라(cellular) 시스템에서 기지국이 이러한 자원 할당 기법들을 수행하기 위하여 단말은 자신의 채널 상태 정보를 기지국에 보고해야 한다. 따라서 셀내 단말의 수가 증가할 경우에 기지국에 보고해야 하는 채널 상태 정보의 양이 증가하게 되어 피드백 오버헤드(feedback overhead)가 증가하게 된다. 또한, 단말의 수가 증가하면 기지국에서 수행하는 자원 할당 기법들의 복잡도도 함께 증가한다. [7]에서는 전력 기반 NOMA를 이용하는 하향링크 셀룰라 시스템에서 채널 상태 정보 및 시스템 복잡도를 고려하여 총 데이터 전송률과 아웃티지 확률을 개선하는 단말 선택 기법 및 빔포밍 기법을 제안하였다.

본 논문에서는 5세대 대규모 기계 형태 통신 (massive Machine Type Communications, mMTC) 시나리오와 6세대 IoT 시나리오를 고려하여 셀내 대규모 단말이 존재하는 시스템을 가정하고, 기지국과 단말간 무선 채널은 경로 손실과 레일레이 페이딩 채널을 가정한다. 또한, 전체 시스템 대역폭은 균일한 다수의 주파수 부채널들로 구성된다고 가정한다. 이러한 가정하에 대규모 단말들로부터 발생하는 채널 상태 정보의 피드백 오버헤드를 줄이고 자원 할당의 복잡도를 감소시키기 위한 채널 상태 정보의 피드백 기법과 NOMA 전송을 위한 단말을 선택하는 기법을 제안한다. 특히, 제안하는 기법에 대하여 셀내 대규모 단말들이 달성할 수 있는 총 데이터 전송률 성능과 셀내 단말들이 목표 데이터 전송률을 충족하지 못하는 아웃티지 확률 성능을 분석한다. 본 논문에서 제안하는 기법은 각 단말이 채널 품질이 좋은 일부의 부채널에 대한 채널 상태 정보만을 피드백하여 오버헤드를 줄임과 동시에 기지국으로 보고된 적은 채널 상태 정보로 자원 할당을 수행하게 하여 자원 할당의 복잡도를 줄일 수 있다. 그러나 채널 상태 정보를 일부만 보고하는 제안 기법은 채널 정보의 손실로 인한 총 데이터 전송률의 성능 저하를 초래한다. 주목할 점은 이러한 채널 정보의 손실에도 불구하고 제안 기법이 우수한 아웃티지 성능을 제공할 수 있음을 시뮬레이션 결과를 통해 보여준다.

Ⅱ. 시스템 모델

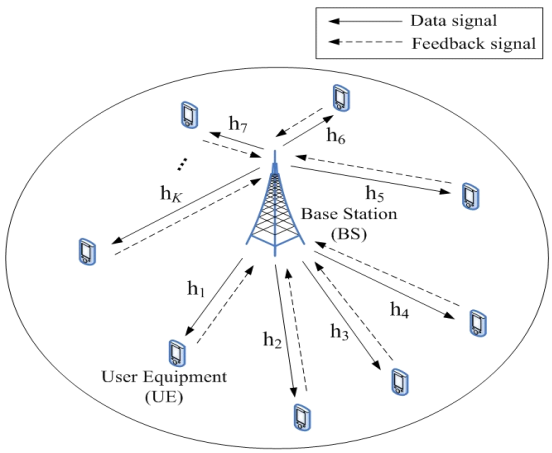


Fig. 1 Downlink NOMA system with K UEs in a single cell

본 연구에서는 그림 1과 같이 하나의 셀내에 하나의 기지국 (Base Station, BS)과 K개의 단말들 (User Equipments, UEs)을 가정하고, 전체 시스템 대역폭은 N개의 균일한 주파수 부채널로 구성된다고 가정한다. 또한, 하향링크 NOMA를 고려하여 각 단말은 각 부채널에 대한 채널 상태 정보를 기지국에 피드백하고, 기지국은 피드백된 채널 상태 정보를 이용하여 각 부채널에 NOMA 전송을 위한 단말을 선택한다. 본 논문에서는 채널 상태 정보의 피드백 오버헤드에 집중하기 위하여 채널 상태 정보의 피드백 지연 및 양자화 오차를 고려하지 않는다.

*n*번째 부채널에 대한 기지국과 *k*번째 단말간의 무선 채널 전력은 다음과 같다.

$$h_{k,n} = c_L |g_{k,n}|^2 d_k^{-\alpha} . \quad (1)$$

여기서, $g_{k,n}$은 평균이 0이고 분산이 1인 레일레이 분포를 따르는 랜덤 변수이고, d_k는 기지국과 *k*번째 단말간의 거리이고, α는 경로 손실 지수이고, c_L은 경로 손실 계수로 $c_L = 10^{-(3.24+2\log_{10}(f_c))}$를 의미한다[8]. f_c는 반송파 주파수를 의미한다.

하향링크의 전력 기반 NOMA 전송을 위하여 기지국은 단말들로부터 각 부채널에 대한 채널 상태 정보를 피드백 받은 후 채널의 전력 크기에 따라 정렬을 한다. 즉, 식 (1)의 채널 전력을 이용하여 *n*번째 부채널에 대한 채널 전력들을 크기에 따라 정렬하면, $h_{(1),n} > h_{(2),n} > \cdots > h_{(K),n}$ 이다. 여기서, 아래첨자의 (*k*)는 채널 전력이 *k*번째로 크다는 것을 의미한다. 따라서 *n*번째 부채널에서 (*k*)번째 단말이 수신하는 NOMA 신호는 다음과 같이 표현된다[9].

$$r_{(k),n} = \sqrt{\frac{h_{(k),n}P_t}{N}} \left(\sum_{k=1}^{K} \sqrt{a_{(k),n}} x_{(k),n} \right) + z_{(k),n} . \quad (2)$$

여기서, P_t는 기지국의 총 송신 전력이고, $x_{(k),n}$은 *n*번째 부채널에서 (*k*)번째 단말에 대한 데이터 신호이고, $x_{(k),n} x_{k,n}$의 평균 전력은 1이다. $z_{(k),n}$는 잡음을 의미하고, $a_{(k),n}$는 *n*번째 부채널에서 (*k*)번째 단말에게 할당된 전력 할당 계수를 의미하며, $\sum_{k=1}^{K} a_{(k),n}$=1 이고, $a_{(1),n} \le a_{(2),n} \le \cdots \le a_{(K),n}$이다[9]. 또한, 식 (2)에서 각 부채널에 할당되는 송신 전력은 동일하다고 가정한다.

각 단말들이 완벽한 SIC를 이용하여 디코딩을 수행한다고 가정하여 식 (2)를 통해 *n*번째 부채널에서 (*k*)번째 단말이 얻을 수 있는 데이터 전송률을 다음과 같이 표현할 수 있다[9].

(*k*)=1일 때,

$$R_{(k),n} = \frac{W}{N} \log_2 \left(1 + \frac{\frac{h_{(k),n}P_t}{N} a_{(k),n}}{\frac{N_0 W}{N}} \right). \quad (3)$$

(*k*) ≠ 1일 때,

$$R_{(k),n} = \frac{W}{N} \log_2 \left(1 + \frac{\frac{h_{(k),n}P_t}{N} a_{(k),n}}{\frac{h_{(k),n}P_t}{N} \sum_{m=1}^{k-1} a_{(m),n} + \frac{N_0 W}{N}} \right). \quad (4)$$

여기서, *W*는 시스템 대역폭이고, N_0는 잡음 전력 밀도를 의미한다.

Ⅲ. 하향링크 NOMA를 위한 자원 할당 기법

하향링크 NOMA 시스템에서 기지국이 각 단말들에게 자원을 할당하기 위하여 단말은 자신의 채널 상태 정보를 기지국에게 보고한다. 따라서 셀내 모든 단말들이 모든 부채널에 대한 채널 상태 정보를 기지국으로 피드백하기 위해서는 *NK*개의 채널 상태 정보의 피드백 오버헤드가 필요하다. 또한, 이 피드백 오버헤드는 단말의 수가 증가함에 따라 *N*배로 증가한다. 그러므로 본 논문에서는 피드백 오버헤드를 줄이기 위하여 각 단말은 자신의 입장에서 가장 좋은 채널 전력을 제공하는 부채널을 선택하고, 선택된 부채널의 인덱스(index)와 채널 상태 정보만을 기지국으로 보고하는 채널 상태 정보의 피드백 기법을 제안한다. 만약, 부채널의 인덱스가 채널 상태 정보와 동일한 피드백 오버헤드를 요구한다면, 제안하는 기법의 피드백 오버헤드는 2*K*로 감소하게 된다.

기지국은 각 단말로부터 보고받은 부채널의 인덱스와 해당 부채널의 채널 상태 정보를 이용하여 단말들에게 부채널을 할당한다. 여기서 단말들이 보고한 부채널의 인덱스가 동일할 경우에 그 단말들에게 해당 부채널을 할당하여 NOMA로 데이터 신호를 전송한다. 구체적인 자원 할당 기법의 절차는 다음과 같다.

- 1단계: 각 단말은 가장 큰 채널 전력을 갖는 부채널 인덱스 s_k와 가장 큰 채널 전력 h_{k,s_k}를 기지국에 보고한다. 여기서, $s_k = \arg\max_{n=1,2,\cdots,N} \{h_{k,n}\}$.
- 2단계: 기지국은 보고된 s_k를 이용하여 k번째 단말에게 s_k번째 부채널을 할당한다. 이러한 부채널 할당을 모든 단말들에게 수행한다.
- 3단계: 기지국은 NOMA 전송을 위하여 보고된 h_{k,s_k}을 이용하여 각 부채널에서 할당된 단말들의 채널 전력을 크기 순으로 정렬한다. 예를 들어, n번째 부채널

에 할당된 단말의 수가 q라면, $h_{(1),n} > h_{(2),n} > \cdots > h_{(q),n}$ 이다.

- 4단계: 기지국은 식 (2)와 같이 채널 전력의 크기로 정렬된 각 단말의 데이터 신호에 전력을 할당한 후 더하여 모든 단말들에게 전송한다.

위의 자원 할당 기법의 절차 중 4단계에서 각 단말의 데이터 신호에 할당되는 전력은 전력 할당 계수인 $a_{(k),n}$ 에 의해 결정되고, 본 논문에서는 각 부채널에 할당된 단말들에게 동일한 전력 할당 계수가 이용된다고 가정한다. 예를 들어, n번째 부채널에 할당된 단말의 수가 q 라면, $a_{(1),n} = a_{(2),n} = \cdots = a_{(q),n} = 1/q$ 이다.

본 논문에서는 제안하는 기법의 성능 평가를 위하여 평균 총 데이터 전송률과 아웃티지 확률의 성능을 평가한다. 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 평균 총 데이터 전송률은 다음과 같이 얻어진다.

$$\overline{R} = E\left[\sum_{n=1}^{N}\sum_{k=1}^{K} R_{(k),n}\right]. \quad (5)$$

여기서, $E[\bullet]$는 셀내 단말들의 랜덤한 배치에 대한 평균을 의미한다. 아웃티지는 단말의 데이터 전송률이 목표 데이터 전송률인 R_t를 만족하지 못할 때 발생한다고 정의한다. 따라서 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 아웃티지 확률은 다음과 같이 얻어진다.

$$\overline{O} = E\left[\frac{1}{K}\sum_{k=1}^{K}\Pr\left\{\sum_{n=1}^{N} R_{(k),n} < R_t\right\}\right]. \quad (6)$$

여기서, $E[\bullet]$는 셀내 단말들의 랜덤한 배치에 대한 평균을 의미한다.

Ⅳ. 시뮬레이션 결과

컴퓨터 시뮬레이션에서 기지국은 셀내 중심에 위치하고, 단말들은 셀 반경내에서 균일 분포를 따라 랜덤하게 위치한다. 이때 기지국과 단말간의 최소 거리를 30m로 가정한다. 단말이 랜덤하게 위치한 후 레일레이 페이딩 채널은 2000개의 랜덤한 샘플을 생성하여 시뮬레이션을 수행한다. 또한, 셀내 단말들의 위치 분포를 충분히 반영하기 위하여 위의 시뮬레이션을 랜덤하게 100번 수행하면서 단말들의 위치를 랜덤하게 변경한다. 상세한 시뮬레이션 조건은 표 1에서 보여준다.

Table. 1 Simulation conditions

Parameters	Values
Carrier frequency	2 GHz
System bandwidth	20 MHz
Total transmit power	40 dBm
Noise power density	-174 dBm/Hz
Cell radius	500 m
Minimum distance between BS and UE	30 m
Path loss exponent	4

시뮬레이션 결과 그림에서 Full CSI-based NOMA는 각 단말들이 모든 부채널에 대한 채널 상태 정보를 피드백하고 기지국은 이 정보를 이용하여 각 부채널에서 K_T 개의 단말들에 대한 데이터 신호를 NOMA를 이용하여 전송하는 기법을 의미한다. 여기서, 총 데이터 전송률의 최대화를 위하여 기지국은 각 부채널에서 큰 채널 전력을 갖는 K_T개의 단말을 선택한다. Best CSI-based NOMA는 III장에서 제안한 기법을 의미하고, 제안한 기법의 추가적인 성능 개선을 위하여 각 단말들은 가장 큰 채널 전력을 갖는 N_F개의 부채널에 대한 채널 상태 정보를 피드백할 수 있다. Random SA-based OMA는 직교 다중 접속 기법을 이용하여 모든 단말들에게 균일한 주파수 대역폭을 할당하는 기법으로 아웃티지 성능 개선을 위해 단말의 수와 부채널의 수를 동일하게 설정한다.

그림 2와 그림 3은 N=10이고 R_t=0.1Mbps일 때 단말의 수에 따른 평균 총 데이터 전송률과 아웃티지 확률 성능을 각각 보여준다. 단말의 수가 증가함에 따라 Full CSI-based NOMA와 Best CSI-based NOMA의 평균 총 데이터 전송률은 증가하고, Full CSI-based NOMA가 Best CSI-based NOMA 보다 우수한 평균 총 데이터 전송률 성능을 보인다. 그러나 아웃티지 확률에서는 Best CSI-based NOMA가 Full CSI-based NOMA 보다 우수한 성능을 보인다. 또한, Full CSI-based NOMA는 K_T의 증가에 따른 성능 변화가 작은 반면에 Best CSI-based NOMA는 N_F를 1에서 2로 증가할 때, 총 데이터 전송률과 아웃티지 확률 성능이 모두 크게 개선됨을 보여준다. 또한, Best CSI-based NOMA는 Random SA-based OMA 보다 우수한 총 데이터 전송률과 아웃티지 확률 성능을 보여준다.

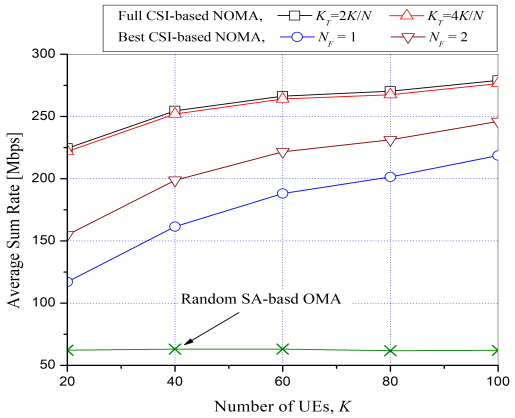


Fig. 2 Average sum rate for various numbers of UEs when N=10 and R_t=0.1 Mbps

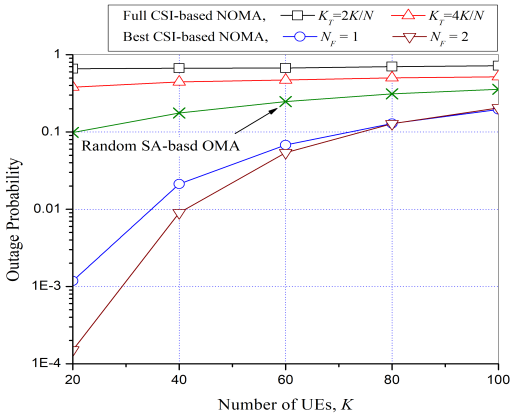


Fig. 5 Outage probability for various numbers of UEs when N=10 and R_t=0.2 Mbps

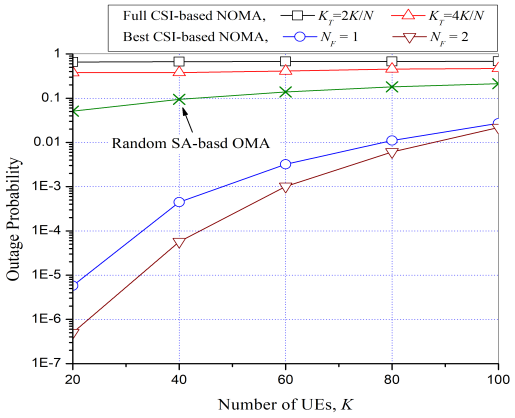


Fig. 3 Outage probability for various numbers of UEs when N=10 and R_t=0.1 Mbps

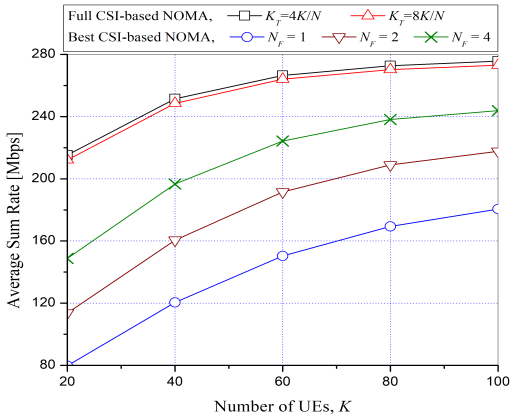


Fig. 6 Average sum rate for various numbers of UEs when N=20 and R_t=0.1 Mbps

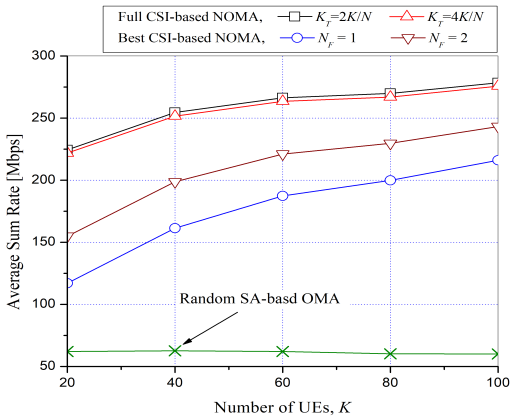


Fig. 4 Average sum rate for various numbers of UEs when N=10 and R_t=0.2 Mbps

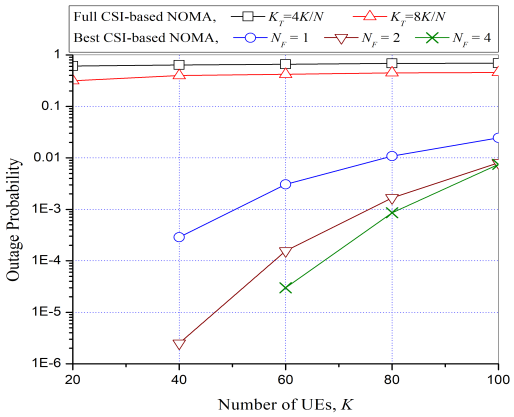


Fig. 7 Outage probability for various numbers of UEs when N=20 and R_t=0.1 Mbps

그림 4와 그림 5는 N=10이고 R_t=0.2Mbps일 때 단말의 수에 따른 평균 총 데이터 전송률과 아웃티지 확률 성능을 각각 보여준다. 그림 4의 평균 총 데이터 전송률은 그림 2와 유사한 성능을 보여주는 반면에 그림 5에서 Best CSI-based NOMA의 아웃티지 확률은 R_t의 증가로 그림 3의 결과 보다 저하된 성능을 보여준다. 또한, 그림 2와 그림 3에서와 같이 Best CSI-based NOMA는 Random SA-based OMA 보다 우수한 총 데이터 전송률과 아웃티지 확률 성능을 보여준다.

그림 4와 그림 5는 N=10이고 R_t=0.2Mbps일 때 단말의 수에 따른 평균 총 데이터 전송률과 아웃티지 확률 성능을 각각 보여준다. 그림 4의 평균 총 데이터 전송률은 그림 2와 유사한 성능을 보여주는 반면에 그림 5에서 Best CSI-based NOMA의 아웃티지 확률은 R_t의 증가로 그림 3의 결과 보다 저하된 성능을 보여준다. 또한, 그림 2와 그림 3에서와 같이 Best CSI-based NOMA는 Random SA-based OMA 보다 우수한 총 데이터 전송률과 아웃티지 확률 성능을 보여준다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 하향링크 NOMA 시스템에서 대규모 단말들에 의해 발생하는 방대한 채널 상태 정보의 피드백 오버헤드와 자원 할당의 복잡도를 줄이기 위하여 채널 상태 정보의 피드백 기법과 NOMA 기반 자원 할당 기법을 제안하였다. 특히, 제안하는 기법에서는 각 단말이 채널 전력이 가장 큰 일부의 부채널에 대한 채널 상태 정보만을 피드백하여 오버헤드를 줄이고 기지국으로 보고된 적은 채널 상태 정보로 NOMA 기반 자원 할당을 수행하여 복잡도를 감소시킨다. 셀내 랜덤하게 배치된 단말들과 경로손실 및 레일레이 페이딩 채널을 고려한 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법이 우수한 아웃티지 확률 성능을 제공함을 확인하였다. 또한, 제안하는 기법에서 각 단말이 큰 채널 전력을 갖는 둘 이상의 부채널들에 대한 채널 상태 정보를 피드백할 때 평균 총 데이터 전송률과 아웃티지 확률 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 보여주었다. 이와 같이 적은 시스템 오버헤드를 이용하는 제안 기법은 대규모 단말들을 고려한 5세대 mMTC 및 6세대 IoT 통신을 실현하기 위한 후보 기술로 고려될 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (Grant number: NRF-2022R1A2C1003388).

References

[1] I. Budhiraja, N. Kumar, S. Tyagi, S. Tanwar, Z. Han, M. J. Piran, and D. Y. Suh, “A systematic review on NOMA variants for 5G and beyond,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 85573-85644, May. 2021.

[2] Y. Yuan, S. Wang, Y. Wu, H. V. Poor, Z. Ding, X. You, and L. Hanzo, “NOMA for next-generation massive IoT: performance potential and technology directions,” *IEEE Communication Magazine*, vol. 59, no. 7, pp. 115-121, Jul. 2021.

[3] D. Kim and I. -H. Lee, “User Association and Power Allocation Scheme Using Deep Learning Algorithm in Non-Orthogonal Multiple Access Based Heterogeneous Networks,” *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 430-435, Mar. 2022.

[4] N. Yang, H. Zhang, K. Long, H. -Y. Hsieh, and J. Liu, “Deep Neural Network for Resource Management in NOMA Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 1, pp. 876-886, Jan. 2020.

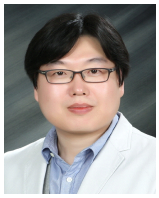
[5] H. Zhang, H. Zhang, K. Long, and G. K. Karagiannidis, “Deep Learning Based Radio Resource Management in NOMA Networks: User Association, Subchannel and Power Allocation,” *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 2406-2415, Jun. 2020.

[6] I. -H. Lee and H. Jung, “User Selection and Power Allocation for Downlink NOMA Systems with Quality-Based Feedback in Rayleigh Fading Channels,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 11, pp. 1924-1927, Nov. 2020.

[7] C. Chen, W. Cai, X. Cheng, L. Yang, and Y. Jin, “Low Complexity Beamforming and User Selection Schemes for 5G MIMO-NOMA Systems,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 12, pp. 2708-2722, Dec. 2017.

[8] 3GPP, “Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 17),” 3GPP, Valbonne, France, Technical

Report TR 38.901, 2022.
[9] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen, and L. Hanzo, “A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G,“ *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2294-2323, May. 2018.



이인호(In-Ho Lee)

2003년 2월 : 한양대학교 전자컴퓨터공학부 학사
2005년 2월 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과 공학석사
2008년 8월 : 한양대학교 전자전기제어계측공학과 공학박사
2008년 9월 ~ 2010년 4월 : 삼성전자 DMC 연구소 책임연구원
2010년 4월 ~ 2011년 3월 : 한양대학교 ERICA 부설연구소 공학기술연구소 박사후과정
2011년 3월 ~ 현재 : 국립한경대학교 전자전기공학부 교수
※관심분야 : 무선 협력 통신 시스템, MIMO 전송 기술, 무선자원관리 기술, 비직교 다중 접속 기술, 딥러닝