JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지 Vol. 25, No. 2: 267~273, Feb. 2021

비직교 다중 접속 기반 위상 회전 인덱스 변조 기법

이혜영[1] · 신수용[2*]

Non-Orthogonal Multiple Access based Phase Rotation Index Modulation

Hye Yeong Lee[1] · Soo Young Shin[2*]

[1]Ph.D. student, Department of IT Convergence Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, 39177 Korea

[2*]Associate Professor, Department of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, 39177 Korea

요 약

비직교 다중 접속 기법은 주파수 효율을 향상시키는 차세대 무선 네트워크의 주요 후보 기술이다. 비직교 다중 접속은 사용자의 전력 할당 기반 채널 이득 차를 활용하여 중첩 코딩을 한다. 그러나 비슷한 채널 이득을 가질 때 중첩 코딩의 원리를 위반하여 신호를 전송하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 제안된 기법이 전송 신호의 위상 회전을 활용한 비직교 다중 접속 기법이다. 이 기술은 전송 신호의 위상 회전을 통해 중첩 코딩된 신호 사이의 최소 거리를 늘림으로써 비트 오차율을 개선하여 기존 채널 이득 문제를 해결한다. 본 논문에서는 주파수 효율 개선을 위해 위상 회전을 이용한 비직교 다중 접속 기반 새로운 인덱스 변조를 제안한다. 사용자 페어링에서 사용자마다 위상 회전의 활성화된 상태에 따라 인덱스 비트를 할당하여 추가 정보 비트를 전송하고자 한다. 모의실험을 통해 기존 비직교 다중 접속 대비 위상 회전을 이용할 경우 비트 오차율 개선 및 인덱스 변조를 이용하여 전송 용량의 향상을 확인하였다.

ABSTRACT

Non-orthogonal multiple access is the promised candidates in the next generation wireless networks to improve the spectral efficiency by superposing multiple signals. In general, the superposition coding is performed using the difference in channel gain between users based on the user's power allocation. However, when user pairs have the similar channel gain problem, NOMA can not be allowed in the scenario. To overcome this problem, phase rotation based NOMA is presented to increase minimum distance between superposed signals in the constellation point. This paper proposed a novel non-orthogonal multiple access based index modulation using phase rotation. The additional bits can transfer using the index bits that is allocated according to the activated state of the phase rotation. Simulation results are shown that bit error rate and achievable sum rate are better than conventional NOMA.

키워드 : 위상 회전, 인덱스 변조, 비직교 다중 접속, 전송 용량, 중첩 코딩

Keywords : Phase rotation, Index modulation, Non-orthogonal multiple access, Sum rate, Superposed signal

Received 3 December 2020, **Revised** 11 December 2020, **Accepted** 27 December 2020

*** Corresponding Author** Soo Young Shin(E-mail:wdragon@kumoh.ac.kr, Tel:+82-54-478-7473)
Associate Professor, Department of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, 39177 Korea

Open Access http://doi.org/10.6109/jkiice.2021.25.2.267 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

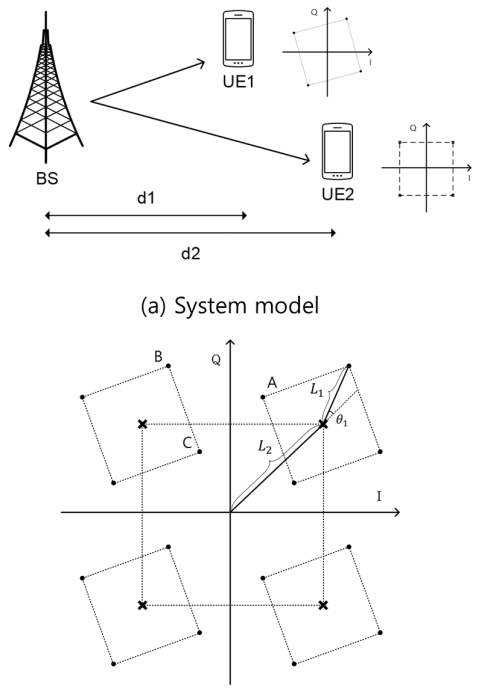
ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/ by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly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

Ⅰ. 서 론

비직교 다중 접속(Non orthogonal multiple access, NOMA)은 5G의 주요 후보 기술로 다수의 사용자에 대한 데이터를 중첩 할당을 통해 동시에 전송하여 주파수 효율을 향상하는 기술이다[1]. 일반적으로 신호를 전력 영역으로 다중화시킨 전력 영역 NOMA에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다[2, 3]. 하향링크 시나리오에서 기지국(Base station, BS)은 송신기로 각 사용자에게 서로 다른 전력 할당을 통해 신호를 전송한다. 각 사용자는 수신기로서 전력 할당 차를 기반으로 순차적 간섭 제거(Successive interference cancellation, SIC)를 이용해 원 신호를 복호한다. 이처럼 NOMA에서 전력 할당 값의 차이는 중요한 요소로 시스템 성능에 영향을 미친다. 예를 들어 전력 할당 값이 같거나 비슷한 경우 중첩 코딩된 신호 사이의 거리가 가까워지며, 이로 인해 시스템의 수신단에서 각 사용자에 할당된 신호를 분별하지 못하고 비트 오차율의 성능 저하 문제가 발생한다.

이를 해결하기 위해 NOMA와 위상 회전(Phase rotation, PR)을 적용한 연구가 진행되고 있다. NOMA의 신호에 위상 회전을 적용 시 유사한 채널 이득 환경으로 인해 가까워진 중첩 코딩된 신호 사이의 최소 거리를 늘림으로써 비트 오차율을 개선할 수 있다. 하지만 이전 연구에서는 대부분 NOMA의 페어링된 사용자 중 기지국으로부터 거리가 가까운 사용자에게만 위상 회전을 적용한 방식을 이용하였고, 그에 따른 최적 회전 각도에 관한 연구와 오차율 개선을 위한 검출기 연구에 집중되어 있다[4-7].

본 논문에서는 전송 용량 향상 및 비트 오차율 개선을 위해 위상 회전을 이용한 비직교 다중 접속 기반 새로운 인덱스 변조 기법(NOMA with phase rotation based index modulation, NOMA-PR-IM)을 제안한다. 인덱스 변조는 통신 시스템의 특성을 이용해 추가 정보를 전송하므로 5G와 Beyond 5G의 주파수 효율 개선을 위한 기법으로 주목받고 있다. 통신 시스템에서 OOK(On off keying) 원리를 이용해 송신 안테나, 부반송파 등과 같은 구성 요소의 상태를 변경함으로써 정보 비트를 맵핑하여 추가 비트를 전송한다[8, 9]. 본 연구에서는 하향링크 NOMA에서 위상 회전을 이용할 때, 각 사용자의 위상 회전 기법을 적용하는 상태에 따라 인덱스를 할당해 추가 정보 비트를 전송하고자 한다.



(a) System model

(b) Constellation

Fig. 1 System model of phase rotation based NOMA

위상 회전 기법이 적용 시 1을, 위상 회전을 안 할 시 0을 전송하여 상태를 구분할 수 있다. 이처럼 인덱스 변조 기법을 더하여 추가 정보 비트를 전송 가능하므로, 기존 NOMA 기법 대비 같은 주파수 환경에서 전송 용량을 향상할 수 있다. 또한, 최적 위상 회전의 경우 수신단에서 비트 오차율을 개선할 수 있다. 모의 실험을 통해 기존 시스템 대비 전송 가능한 가중 합(Achievable sum rate) 및 비트 오차율(Bit error rate, BER)이 개선됨을 확인하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 개념 정립을 위해 2-1. 기존 위상 회전 기반 비직교 다중 접속 시스템 모델 설명 후 2-2. 제안하는 시스템 모델 3. 모의 실험 4. 결론 순으로 진행하고자 한다.

Ⅱ. 본 론

전체 시스템은 그림 1.(a)와 같이 위상 회전을 이용한

하향링크 NOMA를 고려한다. 송신기인 하나의 기지국(BS)과 수신기로서 사용자 수 $K=2$인 사용자(UE1, UE2)가 있다고 가정한다. 여기서 BS에서 사용자까지의 거리 $d_i(i=1,2)$는 $d_1 \le d_2$로 고려한다. 전력 할당 값 $p_i(i=1,2)$은 거리에 비례하여 값을 지정하였다. 이때, UE1은 기지국에서 거리가 가까운 사용자(Near user, NU)로서 비교적 거리가 먼 사용자(Far user, FU)인 UE2 대비 좋은 채널 이득을 가지게 된다. 수신단에서 중첩 코딩된 신호를 복호하는 SIC를 사용하기 위해서는 기지국에서는 각 사용자에게 채널 이득에 따라 전력을 다르게 할당한다. 따라서, UE2는 UE1 대비 높은 송신 전력이 할당되어 두 신호는 중첩 코딩되어 전송된다.

2.1. 위상 회전 기반 NOMA

그림 1.(a)는 UE1에 할당된 사용자에게만 위상 회전을 적용한 위상 회전 기반 NOMA의 시스템 모델이며, 그림 1.(b)는 중첩 코딩된 신호의 성좌도를 나타낸다. 위상 회전을 적용한 중첩 코딩된 송신 신호 $\boldsymbol{x}$는 다음과 같이 표현된다.

$$\boldsymbol{x} = \sqrt{p_1}\exp(j\theta_1)\boldsymbol{x_1} + \sqrt{p_2}\boldsymbol{x_2} \tag{1}$$

여기서 $\boldsymbol{x_i}(i=1,2)$는 i번째 사용자의 송신 신호이고, θ_1는 위상 회전 각도를 의미한다. p_i ($\sqrt{p_i} = L_i$)는 i번째 사용자의 전력 할당 상수이며, 각 사용자의 전력 할당 상수의 합은 $\sum_{i=1}^{K} p_i = 1$로 가정한다. 최적 위상 회전을 위해 [4, 5]에서는 성좌도 상의 중첩된 점 사이의 최소 거리의 최댓값을 고려한다. 최소 거리의 최대화는 그림 1.(b)의 성좌도에서 $\overline{AB} = \overline{AC}$의 조건일 경우 가능하다. 따라서 최적 위상 회전 각도 θ_{opt}는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\theta_{opt} = \arcsin\left(\frac{L_1}{2L_2}\right) \tag{2}$$

예를 들어 그림 1의 시스템 모델에서 전력 할당 상수 $p_1 = 0.4$, $p_2 = 0.6$인 경우 식 (2)에 따라 최적 위상 회전 값은 24°이 된다.

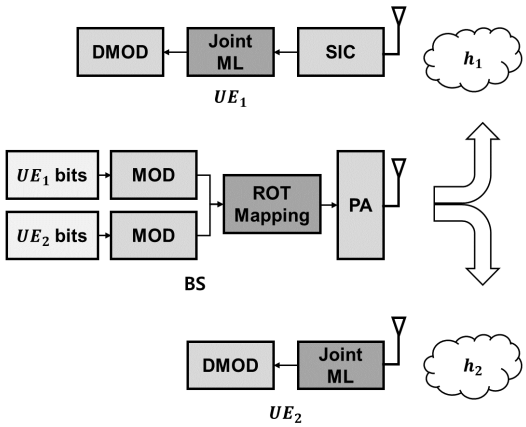


Fig. 2 Block diagram of proposed system(NOMA-PR-IM)

2.2. 제안하는 시스템 모델

그림 2는 제안하는 시스템 모델이다. 먼저, 송신기인 BS에서 입력 비트는 사용자마다 나누어지고, 변조기(MOD, modulation)를 통해 변조한다. 다음, 위상 회전기(ROT, rotation)를 이용하여 미리 약속한 그림 3의 맵핑 테이블을 기반으로 위상 회전 인덱스 비트를 할당한다. 사용자의 송신 신호는 전력 할당(PA, power allocation)을 이용해 각 사용자에게 전력을 할당하고, 중첩 코딩하여 채널 $\boldsymbol{h_i}(i=1,2)$를 통해 신호를 전송한다. 수신기는 NOMA의 원리에 따라 NU와 FU의 수신기 모델이 다르다. NU인 UE1은 순차적 간섭 제거 (SIC, successive interference cancellation)를 이용하여 전력 값이 큰 UE2의 신호를 먼저 제거한다. 그 후, Joint ML(Maximum likelihood)[5] 기법을 이용해 위상 회전된 신호에서 위상 회전 인덱스를 복호한 후, NOMA의 변조된 신호를 복호기(DMOD, demodulation)를 통해 원신호를 복호한다. FU인 UE2의 경우 UE1 대비 전력 할당 상수 값이 크기 때문에 UE1의 신호를 잡음으로 가정할 수 있으며 Joint ML로 인덱스 비트 복호와 DMOD로 변조 신호 복호를 통해 원신호를 복호한다.

위상 회전을 이용한 인덱스 할당을 위해서는 위상 회전에 따른 송신 신호 X_l는 다음과 같이 표현된다.

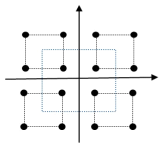
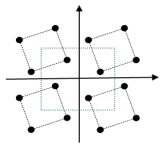
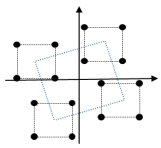
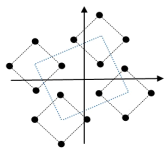
Status	Non PR	NU PR
Constellation		
Index Bits	00	01
Status	**FU PR**	**Both PR**
Constellation		
Index Bits	10	11

Fig. 3 The index mapping table of NOMA-PR-IM

$$X_l = \begin{cases} \boldsymbol{x} & \text{, without PR} \\ \exp(j\theta)\boldsymbol{x} & \text{, with PR} \end{cases} \tag{3}$$

위상 회전 기반 인덱스 변조에 따른 i번째 사용자의 전송 가능한 비트 수 SE_{UE_i}과 총 전송 가능한 비트 수 SE_{total}는 다음과 같다.

$$SE_{UE_i} = log_{\ 2}(M) + m_{pair} \tag{4}$$

$$SE_{total} = \sum_{i=1}^{K} SE_{UE_i} \tag{5}$$

M은 변조 차수이고, K는 총 사용자 수, m_{pair}는 페어링된 NOMA 사용자 수를 의미한다. 본 논문에서는 총 사용자 수가 2명이며, 두 사용자를 하나의 NOMA 페어로 가정한다. 따라서 $K = m_{pair} = 2$가 되어 위상 회전 인덱스 변조를 통해 $2bits$를 전송할 수 있다. 예를 들어 수신기인 두 사용자$(K=2)$가 있을 때, 변조 기법은 4-QAM$(M=4)$를 사용하는 경우 제안하는 위상 회전 인덱스 변조 기법의 인덱스 할당 맵핑 테이블은 그림 3과 같이 표현된다. 여기서 위상 회전 인덱스 변조 비트는 $l = [l_2\, l_1]$로, l_i은 i번째 사용자의 인덱스 비트를 의미한다. 위상 회전이 적용되지 않은 상태(Non PR)는 00, NU에만 위상 회전이 된 경우(NU PR)는 01, FU에만 위상 회전이 된 경우(FU PR)는 10, 모든 사용자에 위상 회전에 적용된 경우(Both PR)는 11을 할당한다. 이 경우 제안하는 시스템은 총 8bits/sec 전송 가능하며, 기존 NOMA는 4bits/sec 전송 가능해 기존 NOMA 대비 주파수 효율이 향상됨을 확인할 수 있다. 또한, 사용자 수가 3명일 경우 이전 연구 [6]을 기반으로 위와 같은 원리를 적용할 수 있다. 위상 회전이 가능하다면 인덱스 비트를 전송 가능하며, 인덱스 변조를 통해 $3bits$를 추가적으로 전송할 수 있다.

2.2.1. NOMA-PR-IM의 송수신기

위상 회전을 적용한 중첩 코딩된 송신 신호 χ는 다음과 같이 표현된다.

$$\chi = \begin{cases} \sqrt{p_1}\boldsymbol{x_1} + \sqrt{p_2}\boldsymbol{x_2} \\ \sqrt{p_1}exp(j\theta_1)\boldsymbol{x_1} + \sqrt{p_2}\boldsymbol{x_2} \\ \sqrt{p_1}\boldsymbol{x_1} + \sqrt{p_2}exp(j\theta_2)\boldsymbol{x_2} \\ \sqrt{p_1}exp(j\theta_3)\boldsymbol{x_1} + \sqrt{p_2}exp(j\theta_4)\boldsymbol{x_2} \end{cases} \tag{6}$$

여기서 θ_i는 위상 회전 각으로 전력 할당 값에 따른 최적 위상 회전 각과 같은 값($\theta_i = \theta_{opt}$)을 고려하였다. 위상 회전에 따른 인덱스 값 l에 따라 중첩 코딩 송신 신호를 선택하여 전송하게 된다. 중첩 코딩된 신호는 채널을 통해 수신단으로 전송한다. i번째 사용자 수신 신호 $\boldsymbol{y_i}$는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{y_i} &= \boldsymbol{h_i}(\sqrt{p_1}\,\boldsymbol{x_1} + \sqrt{p_2}\,\boldsymbol{x_2}) + \boldsymbol{n_i} \\ &= \boldsymbol{h_i}\chi_i + \boldsymbol{n_i} \end{aligned} \tag{7}$$

$\boldsymbol{h_i}$는 i번째 사용자와 기지국 사이의 채널을 나타낸다. Rayleigh fading 채널로 $\boldsymbol{h_i} \sim CN(0, \lambda_i = d_i^{-v})$를 고려한다. 평균이 0, 분산이 λ_i인 채널이며, v는 경로 손실 계수이다. $\boldsymbol{n_i}$는 가우시안 백색 잡음(Additive white gaussian noise, AWGN)으로서 평균이 0, 분산이 σ^2인 $\boldsymbol{n_i} \sim CN(0, \sigma^2)$로 나타낸다.

수신단에서는 SIC 과정 유무에 따라 원신호 복호 과정이 다르다. SIC 과정에 앞서 수신단은 사용자 UE1의 수신기는 zero forcing[10]을 통해 채널을 추정한다. 이때, Perfect CSI(Channel state information)를 가정한다. 추정된 채널은 $\tilde{\boldsymbol{h}}_i$로 나타낸다. 추정된 수신 신호 $\tilde{\boldsymbol{y}}_1$를 SIC 과정을 통해 FU의 신호를 제거한다. Perfect SIC 과정을 통해 얻은 추정 수신 신호 $\hat{\boldsymbol{x}}_1$는 다음과 같다.

$$\hat{x}_1 = \frac{\tilde{y}_1 - \sqrt{p_2}\, x_2}{\sqrt{p_1}} \tag{8}$$

위상 회전에 따른 인덱스 정보 비트를 복호하기 위해 joint ML[5]를 사용한다. 채널 추정한 수신 신호와 기존 맵핑 테이블을 비교해 얻을 수 있는 인덱스 정보 비트는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{l}_1 = \arg\min \| \hat{x}_1 - X_l \|^2 \tag{9}$$

사용자 FU(UE2)의 수신기는 중첩 코딩된 수신 신호에서 NU(UE1)를 잡음으로 고려한다. 따라서 SIC 과정 없이 zero forcing을 이용한 채널 추정 및 ML을 통해 인덱스 정보 비트를 복호할 수 있다.

$$\hat{l}_2 = \arg\min \| \hat{y}_2 - \tilde{h}_2 X_l \|^2 \tag{10}$$

2.2.2. 전송 가능한 가중 합

기존 NOMA의 i 번째 사용자에 따른 전송 용량 R_i을 나타낸다.

$$R_1 = B\log_2\left(1 + \frac{p_1 |h_1|^2}{B\sigma^2}\right) \tag{11}$$

$$R_2 = B\log_2\left(1 + \frac{p_2 |h_2|^2}{p_1 |h_2|^2 + B\sigma^2}\right) \tag{12}$$

여기서 B는 송신 주파수 대역폭을 의미하며 1로 가정한다. σ^2는 AWGN의 분산 값을 나타낸다. R_1의 경우 SIC 과정 후 원신호를 성공적으로 복호할 경우의 전송 용량이다. R_2는 SIC 과정이 없어 UE1의 신호를 간섭으로 고려하였을 때 전송 용량을 나타낸다. 따라서 기존 NOMA를 이용해 전송 가능한 가중 합은 다음과 같이 표현된다.

$$R_{NOMA} = R_1 + R_2 \tag{13}$$

위상 회전 인덱스 변조로 인한 전송 용량 R_{PR}는 전송 가능한 비트 수 m_{pair}와 같다. 따라서 제안하는 시스템의 전송 가능한 가중 합 R_{total}은 다음과 같이 표현된다.

$$R_{total} = R_{NOMA} + R_{PR} \tag{14}$$

Ⅲ. 모의 실험

본 장에서는 MATLAB을 이용한 모의실험을 통해 제안하는 기법의 성능을 평가한다. 전체 시스템은 SISO(Single input single output) 환경에서 기지국이 하나, 수신 단말이 2개 있을 때를 고려한다. 비슷한 채널 이득 환경일 때 고정된 전력 할당 값에 따라 기존의 NOMA 기법과 비교 실험을 진행하였다. 위상 회전 각은 식 (2)를 이용해 전력 할당 값에 따라 지정하였다. 또한, 수신기의 변조 기법은 모두 4-QAM을 사용하였다.

그림 4는 위상 회전 기반 NOMA와 기존 NOMA의 송신 SNR에 따른 NU와 FU의 평균 비트 오차율을 보여준다. 마커가 없는 경우가 기존 NOMA의 평균 비트 오차율이며, (x) 마커로 표시된 경우 위상 회전 기반

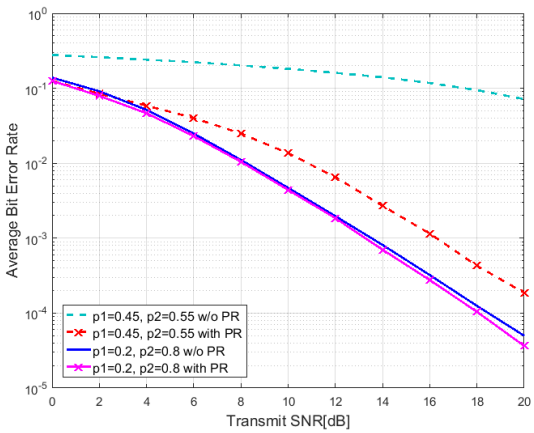


Fig. 4 Average Bit Error Rate in NOMA-PR

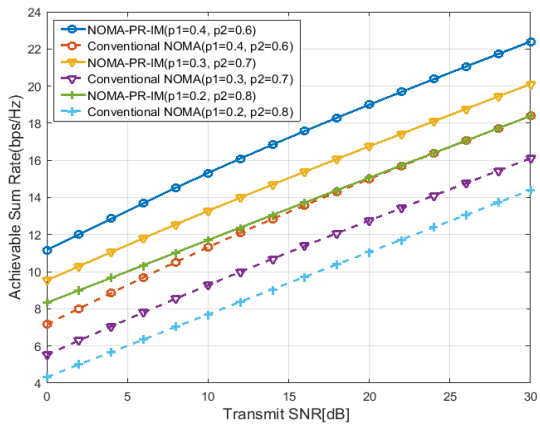


Fig. 5 Sum Rate in NOMA-PR-IM

NOMA의 평균 비트 오차율을 나타낸다.

먼저 그래프 상에서 점선은 비슷한 채널 이득 환경을 가정하였다. 즉, 기지국으로부터 사용자가 위치한 거리가 유사하고$(d_1 \approx d_2)$, 전력 할당 값이 큰 차이가 없을 때로 각 사용자에 할당할 전력 할당 값은 $p_1 = 0.45$, $p_2 = 0.55$을 가정하였다. 기존 NOMA의 경우 수신단에서 원신호 복호가 어려우므로 비트 오차율이 낮음을 확인할 수 있다. 그러나 같은 환경에서 위상 회전이 적용된 경우 복호 성능이 개선되어 기존 NOMA 대비 비트 오차율이 개선됨을 확인하였다. 실선은 두 사용자에게 할당된 전력 값이 차이가 나는 경우$(p_1 = 0.2, p_2 = 0.8)$를 고려하였다. 이때 위상 회전 있는 경우와 없는 경우의 비트 오류율 성능이 유사함을 확인하였다. 이는 quasi-static flat fading 채널 [5], Nakagami-m fading 채널[7] 환경에서 위상 회전에 따른 모의실험을 진행한 결과와 유사하다.

그림 5는 송신 SNR에 따른 전송 가능한 가중 합 결과이다. 식 (13)과 식 (14)를 기반으로 사용자 위치와 전력 할당 값을 변경하여 제안하는 시스템과 기존 NOMA의 결과를 비교하였다. 그래프 상 점선은 기존 NOMA 시스템, 실선은 NOMA-PR-IM 시스템의 결과이다. 사용자 위치에 따라 기지국에서 사용자까지 거리 (d_1, d_2)는 $(0.4, 0.6), (0.3, 0.7), (0.2, 0.8)$로 선정하였으며, 전력 할당 값 (p_1, p_2)은 거리에 비례한 값으로 설정하였다. 위상 회전 각은 식 (2)에 따라 전력 할당 값에 따라 $24^\circ, 19^\circ, 14.5^\circ$로 가정하였다. 제안하는 시스템은 기존 NOMA 대비 높은 가중 합을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 사용자 간 거리가 멀어질 때 가중 합의 성능이 향상됨을 확인하였다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 위상 회전을 이용한 비직교 다중 접속 기반 인덱스 변조 기법을 제안하였다. 제안하는 시스템은 위상 회전을 NOMA 사용자에 적용할 때 각 사용자당 위상 회전 상태에 따라 인덱스를 할당하여 추가 비트를 전송할 수 있다. 두 사용자가 있는 경우 같은 시스템 환경에서 기존 비직교 다중 접속의 성능과 비교하였을 때, 비슷한 채널 이득 환경에서 평균 비트 오차율 개선을 확인하였다. 그리고 기존 NOMA 대비 추가적인 인덱스 비트 만큼의 전송 용량이 늘어남을 확인하였다.

또한, 두 사용자를 하나의 사용자 페어링인 경우를 기준으로 고려하였으며, 세 사용자를 하나의 사용자 페어링인 시스템으로 확장 가능성을 제시하였다. 추후 사용자 수가 네 사용자 이상으로 늘어날 때 위상 회전 인덱스 변조 기법을 활용 시 새로운 사용자 페어링 및 최적 전력 할당에 관한 확장 연구를 진행할 예정이다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government. (MSIT) (No. 2019R1 A2C1089542)

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,” *2013 IEEE 77th vehicular technology conference (VTC Spring)*, Dresden, Germany, pp. 1-5, 2013.

[2] M. Irfan, J. W. Kim, and S. Y. Shin, “Spectral and Energy Efficient Spatially Modulated Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) For 5G,” *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*. vol. 40, no. 8, pp. 1507-1514, Aug. 2015.

[3] C. Yan, A. Harada, A. Benjebbour, Y. Lan, A. Li, and H. Jiang, “Receiver design for downlink non-orthogonal multiple access (NOMA),” *2015 IEEE 81st vehicular technology conference (VTC Spring)*, Glasgow, UK, pp. 1-6, 2015.

[4] Y. Chang and K. Fukawa, “Non-orthogonal multiple access with phase rotation employing joint MUD and SIC,” *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Porto, Portugal, pp. 1-5, 2018.

[5] B. K. Ng and C. T. Lam, “Joint power and modulation optimization in two-user non-orthogonal multiple access channels: A minimum error probability approach,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 11, pp. 10693-10703, Nov. 2018.

[6] Y. Chang and K. Fukawa, “Phase Rotated Non-Orthogonal

Multiple Access for 3-User Superposition Signals," *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Honolulu, USA, pp. 1-5, 2019.

[7] A. Chauhan and A. Jaiswal, "Non-Orthogonal Multiple Access: A Constellation Domain Multiplexing Approach," *2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, London, UK, pp. 1-6, 2020.

[8] E. Basar, M. Wen, R. Mesleh, M. Di Renzo, Y. Xiao, and H. Haas, "Index modulation techniques for next-generation wireless networks," *IEEE access*, vol. 5, pp. 16693-16746, Aug. 2017.

[9] M, Wen, X. Cheng, and L. Yang, *Index modulation for 5G wireless communications*, 2017.

[10] X. Su, H. Yu, W. Kim, C. Choi, and D. Choi, "Interference cancellation for non-orthogonal multiple access used in future wireless mobile networks," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 1, pp. 1-12, Sep. 2016.

이혜영(Hye Yeong Lee)

2016년 2월 : 금오공과대학교 전자공학부 졸업
2018년 2월 : 금오공과대학교 IT융복합공학과 석사
2018년 3월~현재 : 금오공과대학교 IT융복합공학과 박사과정
※관심분야 : 5G/B5G 무선 접속 기술, 머신러닝 및 딥 러닝 등

신수용(Soo Young Shin)

1999년 2월 : 서울대학교 전기공학부 졸업
2001년 2월 : 서울대학교 전기공학부 석사
2006년 2월 : 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
2010년 9월~현재 : 금오공과대학교 전자공학부 교수
※관심분야 : 5G/B5G 무선 접속 기술, 드론 응용, 혼합 현실, 블록체인, 머신러닝 및 딥 러닝 등