

고정전송률 다중사용자 상향링크 비직교 다중접속 시스템을 위한 지능반사표면 위상제어

강민철, 김준수, 김수민*

한국공학대학교

E-mail: {swrkdalscjf, junsukim, *suminkim}@tukorea.ac.kr

IRS Phase Control for Fixed-Rate Multi-User Uplink NOMA Systems

Min Chul Kang, Junsu Kim, and Su Min Kim*

Tech University of Korea

요약

본 논문에서는 고정전송률(fixed-rate) 다중사용자를 스케줄링하여 전송하는 IRS 도움 상향링크 NOMA 시스템에서 합전송률(sum-rate)을 최대화하기 위한 IRS 위상제어 기법을 제안한다. 순차간섭제거(SIC) 디코딩 성능은 사용자 간 채널 이득 차이에 의존하기에 이를 최대화 할 수 있는 최적화 문제를 설계한다. 또한, IRS 채널 추정 오버헤드를 줄이기 위해 직접 경로 채널 기반으로 부분 채널상태정보(CSI)로 사용자 간 채널이득 비율을 최대화하는 방식으로 사용자 채널이득의 분포를 넓혀주는 방법을 제안한다. 제안 IRS 위상제어 기법은 시뮬레이션을 통해 스케줄링 사용자 수 성능으로 평가하고, 제안 기법이 낮은 채널 추정 오버헤드에도 불구하고 중간 SNR에서 더 많은 사용자를 스케줄링하여 높은 합전송률을 달성할 수 있음을 보여준다.

I. 서론

비직교 다중접속(non-orthogonal multiple access, NOMA)은 다수의 사용자 신호를 동일한 시간 및 주파수 자원 내에서 동시에 전송할 수 있도록 하여, 밀집된 사물인터넷(Internet of things, IoT)환경이나 사용가능한 주파수 대역이 부족한 환경에서 매우 효과적인 기술로 주목받고 있다[1]. 상향링크 NOMA에서는 여러 사용자의 신호가 동시에 기지국에 도달하며 이를 순차간섭제거(successive interference cancellation, SIC) 기법을 통해 순서대로 복호한다. SIC의 성능은 중첩된 신호 간 채널 이득 차이에 크게 의존하며, 채널 간 차이가 충분하지 않을 경우 디코딩 성능이 저하되어 신호 분리가 어렵다[2]. 현실적인 환경에서는 사용자 간 채널 이득 차이가 작아 효율적인 디코딩이 어려운 경우가 빈번히 발생한다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 지능반사표면(intelligent reflecting surface, IRS)의 위상 제어를 통해 사용자 간 채널 이득 분포를 재조정하는 방식을 제안하여 더 많은 고정전송률 사용자를 스케줄링할 수 있음을 보인다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 하나의 기지국, 하나의 IRS, 그리고 K 명의 사용자로 구성된 상향링크 NOMA 시스템 모델을 고려한다. 이 때, k 번째 사용자의 송신 신호는 아래와 같이 표현된다.

$$x_k = \sqrt{P_k} s_k, \quad \forall k \in \{1, \dots, K\}. \quad (1)$$

기지국과 사용자 사이에는 직접 경로와 IRS를 경유하는 반사 경로가 존재한다. 따라서 기지국에서 수신하는 상향링크 신호는 스케줄링된 사용자들의 직접 경로와 IRS 반사 경로 신호를 합산한 형태로 나타낼 수 있다.

$$y = \sum_{k=1}^{\tilde{K}} (h_k + g_0^T \Phi g_k) x_k + n_k = \sum_{k=1}^{\tilde{K}} \lambda_k x_k + n_k, \quad (2)$$

여기서 \tilde{K} 는 스케줄링된 사용자 집합, h_k 는 사용자 k -기지국 채널, g_k 는 사용자 k -IRS 간 채널, g_0 는 IRS-기지국 채널, n_k 는 평균 0, 분산 σ^2 인 백색 가우스 잡음, $\Phi = \text{diag}([e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_N}])$ 은 IRS 위상행렬을 나타낸다.

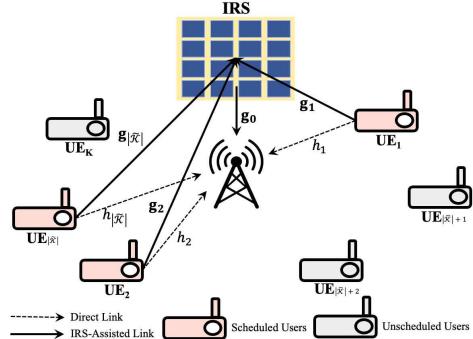


그림 1. IRS 도움 상향링크 NOMA 시스템 모델

상향링크 NOMA 시스템에서 기지국은 j 번째 사용자를 디코딩할 때, 해당 사용자 메시지보다 이후 순서로 디코딩되는 모든 메시지를 간섭으로 간주한다. 따라서 NOMA 시스템에서 각 사용자의 SINR은 해당 메시지보다 우선순위가 낮은 수신신호들의 집합에 의해 결정된다. 일반적으로 높은 SINR을 먼저 디코딩하기에 j 번째 사용자의 SINR은 (3)과 같다.

$$\gamma_j = \frac{|\lambda_j|^2 \rho_j}{\sum_{l \in Q_j} |\lambda_l|^2 \rho_l + 1}, \quad (3)$$

여기서 ρ_j 는 j 번째 송신 SNR이고, $Q_j = \{l : \pi_l > \pi_j\}$ 는 j 번째 사용자 보다 디코딩 우선순위가 낮은 사용자의 집합이다. $\pi = \{\pi_1, \dots, \pi_{|\tilde{K}|}\}$ 는 스케줄링된 사용자의 디코딩 순서로 π_1 은 첫 번째로 디코딩되는 사용자의 인덱스를 의미한다. 이 때, 데이터 전송률은 다음과 같이 나타낸다.

$$R_j = \log_2(1 + \gamma_j). \quad (4)$$

III. 고정전송률 다중사용자 NOMA를 위한 제안 IRS 위상 제어 기법

상향링크 NOMA 시스템에서 SIC는 강한 신호부터 먼저 디코딩하고, 해당 신호를 제거한 뒤 약한 신호를 순차적으로 디코딩하는 구조를 따른다. 이때, 각 사용자 간 채널 이득 차이가 충분히 클수록 강한 신호를 디코딩

하는 과정에서 SINR이 높아 에러율을 낮출 수 있으며, 이후 디코딩에서 남은 신호들에 대한 간섭제거가 효과적으로 이루어진다. 반면, 사용자 간 채널 이득이 유사한 경우에는 강한 사용자 신호를 정확히 디코딩하기 어려워져 디코딩 오류 누적 문제를 발생시키고, 이는 SIC기반 NOMA 시스템의 성능을 크게 저하시킨다. 따라서, 사용자 간 채널 이득 분포를 넓혀주는 것이 안정적인 SIC 디코딩 성능 확보를 위한 방법이다.

본 논문에서는 IRS 위상 제어를 통해 사용자 간 채널 이득 차이를 제조하는 방식을 제안한다. 이를 위해 IRS의 위상 θ 를 조정하여 가장 강한 사용자와 가장 약한 사용자의 채널 이득 간 비율이 최대화하도록 한다. 즉, 직접 경로와 반사 경로를 모두 고려한 복합 실효 채널의 대비를 극대화함으로써 사용자 간 채널 분포를 넓혀서 SIC 디코딩 성능을 향상시키는 것이 목적이다. 이를 위한 최적화 문제는 (5)와 같이 형성된다.

$$\max_{\theta \in \Theta} \frac{|\lambda_{\max}|^2}{|\lambda_{\min}|^2} \quad (5a)$$

$$\text{s.t. } \log_2(1 + |\lambda_{\min}|^2 \rho_{\min}) \geq R_{\min}, \quad (5b)$$

여기서 λ_{\max} , λ_{\min} 는 각각 직접 경로 채널이 가장 강한 사용자와 가장 약한 사용자에 대한 반사 경로까지 포함된 전체 실효 채널로 정의한다. $\Theta = \{\tilde{\theta}_1, \dots, \tilde{\theta}_M\}$ 은 균등(uniform) 이산(discrete) 위상 집합이다. 제약조건은 λ_{\min} 값이 매우 작아져 요구하는 최소전송률(R_{\min})보다 낮아지는 것을 방지한다. 이 목적함수는 전체 사용자에 대한 채널상태정보(channel state information, CSI) 없이도 직접 경로 채널의 CSI만으로 IRS 위상을 설정할 수 있어 채널 추정 오버헤드를 줄일 수 있다.

IV. 성능평가

제안 기법의 성능은 스케줄링 사용자 수로 평가한다. 본 논문에서는 각 사용자가 고정전송률(fixed-rate)의 IoT 센서노드인 것으로 가정하여 합전송률은 고정전송률과 스케줄링 사용자 수의 곱으로 단순 치환이 가능하고, 스케줄링 사용자 수는 보다 직관적인 SIC 성능을 제공한다. 성능 비교 기법은 총 3가지로 (i) 제안 partial-CSI max-ratio (pCSI-maxRatio) 기법, (ii) full-CSI max-ratio (fCSI-maxRatio) 기법, (iii) max direct channel (maxDirect) 기법이다. 제안 pCSI-maxRatio 기법은 III장에서 설명한대로 직접 경로 기반으로 사용자를 선택하고 (5a) 비율이 최대화되도록 IRS 위상을 설정한다. fCSI-maxRatio 기법은 모든 사용자에 대한 전체 CSI를 바탕으로 모든 사용자 조합에 대해 (5a) 비율이 최대화되는 사용자 쌍을 기준으로 IRS 위상을 설정한다. 마지막으로 maxDirect 기법은 직접 경로 채널이 가장 강한 단일 사용자(k^*)의 채널 이득을 최대화 할 수 있도록 위상의 합이 0에 가깝도록 (6)과 같이 설정한다.

$$\theta_n = \arg \min_{\theta_n \in \Theta} |\angle h_k - (\angle g_0 + \angle g_{k^*,n})|, \forall n = \{1, \dots, N\}. \quad (6)$$

모든 채널은 고정 IRS 배치를 고려하여 Rician 채널모델을 가정한다.

$$G = \sqrt{K_f / (K_f + 1)} G_L + \sqrt{1 / (K_f + 1)} G_N \quad (7)$$

여기서 K_f 는 Rician 인자, G_L 은 LoS요소, G_N 은 NLoS 요소로 Rayleigh 분포이다. 최소전송률 R_{\min} 은 0.5 bps/Hz, 총 사용자 수는 $K = 20$, IRS 반사요소 수는 $N = 4$, 총 타임슬롯의 수는 10,000으로 설정하였다.

그림 2는 SNR 변화에 따른 평균 스케줄링 사용자 수를 보여준다. 제안 pCSI-maxRatio 기법은 제한된 채널 정보만 이용함에도 불구하고 중간/높은 SNR 구간에서 스케줄링 사용자 수가 큰 것을 확인할 수 있다. fCSI-maxRatio 기법은 SNR이 증가함에 따라 스케줄링 사용자 수가 증가하며 높은 SNR 영역에서 가장 많은 사용자를 수용할 수 있다.

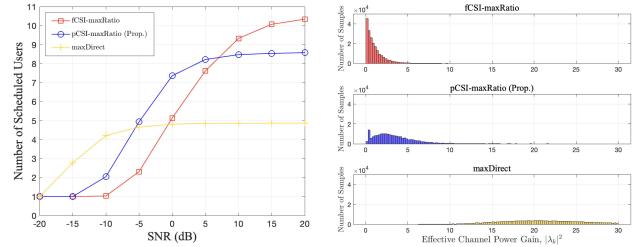


그림 2. 스케줄링 사용자 수

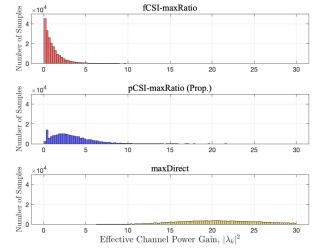


그림 3. 사용자 채널이득 분포

반면, maxDirect 기법은 특정 사용자의 채널만을 최대화하며 다른 사용자의 간섭 관리를 고려하지 않기 때문에 SNR이 증가하더라도 스케줄링 가능한 사용자 수가 제한적이다. SNR 영역에 따라 성능이 역전되는 구간이 발생하는데, 이는 목적함수를 최대화하는 과정에서 최소 채널이득을 작게 만들면서 최대 채널이득도 함께 작아지는 현상이 발생하기 때문이다. 즉, SNR이 매우 낮은 경우, 최소전송률을 만족하지 못하는 사용자가 많이 발생되면서 이를 고려하지 않은 것보다 성능이 저하될 수 있다.

그림 3은 중간 SNR 영역인 $\rho_k = 0$ dB 일 때, 각 기법의 위상값으로 설정된 사용자 채널이득($|\lambda_k|^2$)의 분포를 나타낸다. 사용자 최소전송률 0.5 bps/Hz를 감안하면 maxDirect 기법은 최소 사용자 채널이득 값이 커서 스케줄링 사용자 수가 줄어든 것으로 분석할 수 있고, fCSI-maxRatio는 전체 CSI 정보를 활용하여 최소 사용자 채널 이득값은 최소전송률에 맞춰 0.414 값 근처에 분포시키지만, 최대 사용자 채널 이득 분포값은 제안 기법보다 작은 것을 볼 수 있다. 제안 기법은 부분 CSI만으로 실제 동작영역에 가까운 중간 SNR 영역에서 효율적으로 채널 이득을 분포시킨다.

V. 결론

본 논문에서는 고정 전송률 다중사용자 상향링크 NOMA 시스템에서 전체 합전송률을 향상시키기 위한 IRS 위상제어 기법을 제안하였다. 제안 위상제어 기법은 직접 경로가 가장 강한 사용자와 가장 약한 사용자를 선택하여 채널 이득 비율이 최대화되도록 IRS 위상을 설정하는 구조로 부분 CSI만 요구되어 IRS 채널추정 오버헤드를 줄일 수 있다. 성능 평가 결과, 제안 기법은 낮은 오버헤드에도 불구하고 전체 CSI 기반의 이상적인 방식과 유사한 수준의 스케줄링 성능을 달성함을 확인하였다. 이는 최대/최소 사용자 채널 이득 분포를 효과적으로 넓혀 SIC 디코딩 성능을 개선한 결과이며, 실제 실효채널 이득 분포를 확인하여 이 효과를 입증하였다. 향후, 최소 채널이득이 보장된 상태에서 사용자 채널이득 분포를 보다 확산시켜 스케줄링 성능을 극대화하는 방식을 후속연구로 고려한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원-학·석사 연계ICT핵심인재양성(IITP-2025-RS-2022-00156326, 50%)과 과학기술 사업화진흥원-대학기술경영촉진(TLO혁신형)(RS-2024-00456813)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] Z. Ding, Y. Liu, J. Choi, Q. Sun, M. Elkashlan, and I. Chih-Lin, "Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 185–191, Feb. 2017.
- [2] J. Kim, D. K. Hendarminrat, and S. Shin, "A Study of NOMA-SSK for solving similar channel gain Problem of NOMA users," *Journal of KICS*, vol. 45, no. 3, pp. 474–481, Mar. 2020.