

지능형 반사 표면을 활용한 비율 분할 다중 접속 기반 하이브리드 빔포밍 기법

조혜상, 최준일*
한국과학기술원, *한국과학기술원

nanjohn96@kaist.ac.kr, *junil@kaist.ac.kr

RIS-aided Hybrid Beamforming with Rate-Splitting Multiple Access

Cho Hyesang, Choi Junil*
KAIST, *KAIST

요약

본 논문에서는 지능형 반사 표면(reconfigurable intelligent surface, RIS)이 보조하는 하이브리드 빔포밍 환경에서 최소 정보 전송률을 극대화하기 위한 비율 분할 다중 접속(rate-splitting multiple access, RSMA) 기반 통신 시스템을 제안한다. 구체적으로, 동일 RIS를 통해 지원하는 사용자들을 하나의 그룹으로 정의하고, 하이브리드 빔포밍 구조에 적합한 그룹 기반 비율 분할(group RS, GRS) 구조를 적용한다. 이를 바탕으로 아날로그 빔포머, 디지털 빔포머, rate-splitting 비율 및 RIS 반사 행렬을 최적화하는 최소 전송률 최대화 문제를 설계하고 해결한다. 제안 기법은 radio frequency(RF) 체인 수가 적은 환경에서도 효과적으로 동작하며, 기존 다중 접속 기법 대비 향상된 최소 전송률 성능을 달성함을 확인한다.

I. 서론

밀리미터파 대역 통신 시스템은 넓은 대역폭을 활용하여 높은 데이터 전송률을 제공할 수 있어 차세대 무선 통신의 핵심 기술로 주목받고 있다. 그러나 해당 대역에서는 높은 경로 손실로 인해 다수의 안테나를 필요로 하며, 이를 그대로 적용할 경우 RF 체인 수 증가에 따른 비용 및 전력 소모 문제가 발생한다. 이러한 제약을 완화하기 위해 하이브리드 빔포밍 구조가 도입되었으나, RF 체인 수보다 많은 사용자를 동시에 서비스하는 과부하 환경에서는 성능 저하가 발생한다.

과부하 하이브리드 빔포밍 환경의 한계를 극복하기 위해, 본 논문에서는 RIS를 활용한 통신 구조를 고려한다. RIS는 수동 소자를 이용하여 전파 환경을 제어함으로써 차단에 취약한 고주파 통신에서 커버리지를 향상시킬 수 있다. 이와 함께, 간섭을 관리하는 방식으로 과부하 환경에서 우수한 성능을 보이는 RSMA는 하이브리드 빔포밍 환경에 적합한 다중 접속 기법으로 주목받고 있다.

본 논문에서는 다수 사용자를 효율적으로 서비스하기 위해 하이브리드 빔포밍 구조에 적합한 GRS 구조를 활용한다. 동일 RIS를 통해 서비스되는 사용자들을 하나의 그룹으로 정의함으로써 GRS의 성능 이점을 극대화하고, 이를 기반으로 최소 정보 전송률 최대화 문제의 해답을 도출한다. 제안 기법은 기존 다중 접속 기법 대비 향상된 공정성과 성능을 제공함을 시뮬레이션을 통해 확인한다.

II. 본론

본 논문에서는 N_t 개의 안테나와 N_{RF} 개의 RF 체인을 갖는 하이브리드 빔포밍 기지국이 K 명의 사용자를 지원하는 하향링크 통신 시스템을 고려한다. 통신 환경에는 각각 S 개의 소자를 지닌 M 개의 RIS가 배치되어 있으며, m 번째 RIS 주변에는 K_m 명의 사용자가 존재한다. 이때 전체 사용자 수는 $K = \sum_{m=1}^M K_m$ 을 만족한다. 기지국과 사용자 간의 직접 채널은 모두 차단되어 있다고 가정하며, 모든 사용자는 RIS를 통해서만 지원한다.

다수의 사용자를 효율적으로 지원하기 위해, 본 논문에서는 GRS 구조를 활용한다 [1]. GRS 구조에서는 사용자들을 그룹으로 분류한 후, 각 그룹에 대해 하나의 공통 스트리밍(common stream)을 정의한다. 본 논문에서는 다중 RIS 환경을 고려하여, 각 RIS를 하나의 그룹으로 정의하고 총 M 개의 그룹으로 구성된 GRS 구조를 적용한다. 이에 k 번째 사용자는 자신의 정보를 포함하는 개인 스트리밍(private stream) s_k 를 수신하며, m 번째 그룹에 속하는 사용자들은 공통 스트리밍 $s_{c,m}$ 을 수신한다.

하이브리드 빔포밍 기지국에서의 송신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB} \mathbf{s}.$$

이때 \mathbf{F}_{RF} 는 아날로그 빔포머, \mathbf{F}_{BB} 는 디지털 빔포머를 의미하며, $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_K, s_{c,1}, \dots, s_{c,M}]^T$ 는 전체 송신 신호 벡터이다.

이후 k 번째 사용자가 수신하는 신호는 채널 \mathbf{h}_k 를 거쳐 다음과 같이 표현된다.

$$y_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{x} + n_k.$$

여기서 n_k 는 백색 가우시안 잡음이다.

k 번째 사용자가 m 번째 그룹에 속한다고 가정하면, 해당 사용자의 채널은 RIS를 고려하여 다음과 같이 분해할 수 있다.

$$\mathbf{h}_k = \mathbf{H}_m \boldsymbol{\Phi}_m \mathbf{g}_k.$$

여기서 \mathbf{H}_m 은 기지국과 m 번째 RIS 사이의 채널, \mathbf{g}_k 는 RIS와 k 번째 사용자 사이의 채널을 나타내며, $\boldsymbol{\Phi}_m$ 은 m 번째 RIS의 반사 행렬이다.

m 번째 그룹에 속한 k 번째 사용자는 먼저 공통 스트리밍을 디코딩하며, 이때의 정보 전송률은 다음과 같다.

$$R_{c,k} = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{F}_{RF} \mathbf{f}_{c,m}|^2}{J_{c,k}} \right).$$

여기서 $J_{c,k} = \sum_{j=1}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{F}_{RF} \mathbf{f}_j|^2 + \sum_{l \neq m} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{F}_{RF} \mathbf{f}_{c,l}|^2 + 1$ 는 간섭이다. 공통 스트림은 해당 그룹에 속한 모든 사용자가 성공적으로 디코딩해야 하므로, m 번째 그룹의 공통 정보 전송률은 다음 조건을 만족해야 한다.

$$\sum_{j \in \mathcal{K}_m} C_j \leq R_{c,k}, k \in \mathcal{K}_m.$$

여기서 C_k 는 k 번째 사용자의 공통 정보 부분이다.

공통 스트림을 디코딩한 이후, 각 사용자는 successive interference cancellation (SIC)을 통해 해당 스트림의 영향을 제거한 뒤 개인 스트림을 디코딩한다. 이때 개인 스트림의 정보 전송률은 다음과 같다.

$$R_{p,k} = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{F}_{RF} \mathbf{f}_k|^2}{J_{p,k}} \right).$$

여기서 $J_{p,k} = J_{c,k} - |\mathbf{h}_k^H \mathbf{F}_{RF} \mathbf{f}_k|^2$ 는 간섭이다. 따라서 k 번째 사용자의 총 정보 전송률은 $R_k = R_{p,k} + C_k$ 로 표현된다.

해당 시스템 모델을 바탕으로, 본 논문에서는 다음과 같은 최소 정보 전송률 최대화 문제를 고려한다.

$$(P1): \max_{\mathbf{F}_{RF}, \mathbf{F}_{BB}, \mathbf{c}, \Phi} \min_{k \in \mathcal{K}} R_k$$

$$\text{s. t. } \|\mathbf{F}_{RF} \mathbf{F}_{BB}\|_F^2 \leq P_t$$

$$|\mathbf{F}_{RF}[i, j]| = 1$$

$$|\Phi_{m,s}| = 1$$

여기서 $\mathbf{c} = [C_1, \dots, C_K]^T$ 는 공통 정보 분배 변수이며, 첫 번째 제약 조건은 기지국 전력 제약, 두 번째와 세 번째 제약은 각각 아날로그 빔포머와 RIS 반사 행렬의 unit-modulus 제약을 의미한다. 문제 (P1)은 비볼록 문제로, 직접적인 해법을 적용하기 어렵다. 이에 본 논문에서는 교대 최적화 기법을 활용하여 문제를 해결한다.

먼저, 아날로그 빔포머는 기지국과 RIS 사이 채널의 특성을 이용하여 설계한다. 일반적으로 기지국-RIS 채널은 강한 직진성을 가지며 line-of-sight(LoS) 지배적인 특성을 보이므로, 각 RIS 방향으로 빔을 형성하는 array response 기반의 아날로그 빔포머로 고정한다. 디지털 빔포머와 공통 정보 분배 변수는 기존 GRS 구조에서 제안된 방식과 유사하게 successive convex approximation(SCA) 기법을 적용하여 국소 최적해를 도출한다 [1]. 마지막으로 RIS 반사 행렬은 문제를 변형한 후 semi-definite relaxation(SDR) 형태로 완화하고, SCA 기법을 적용하여 해를 구한 뒤 Gaussian randomization을 통해 feasible한 해를 얻는다. 자세한 유도 과정은 분량 제한상 생략한다.

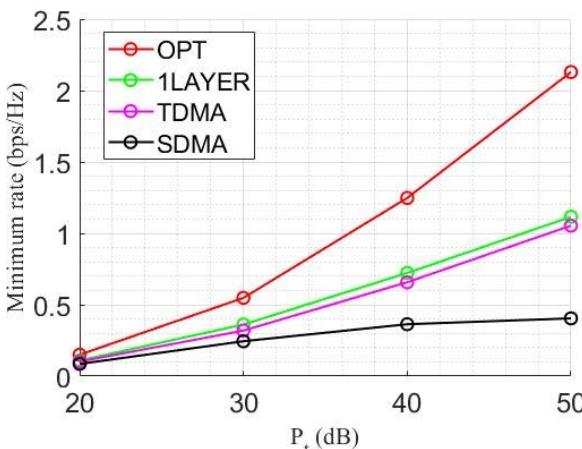


그림 1. 기지국 전력에 따른 최소 정보 전송률.

그림 1에서는 제안 구조의 성능을 검증하기 위해 기존 다중접속 기법과의 비교를 수행하였다. 제안 기법은 OPT로 표기한다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 TDMA 및 SDMA 대비 현저히 높은 최소 정보 전송률을 달성함을 확인할 수 있다. 또한 RSMA 기반 구조인 1LAYER와 비교하였을 때도 우수한 성능을 보여, 고려한 GRS 구조의 우수성과 적합성을 확인할 수 있다.

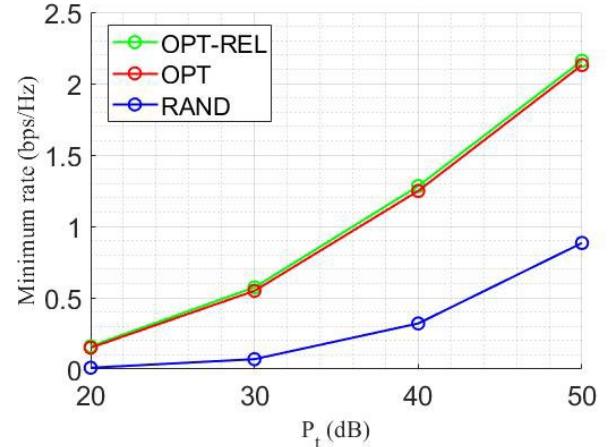


그림 2. 기지국 전력에 따른 최소 정보 전송률.

그림 2에서는 RIS 반사 행렬 설계 기법에 따른 성능 비교를 수행하였다. 제안 기법 OPT와 함께, rank-one 제약을 완화한 OPT-REL, 그리고 RIS 반사 행렬을 임의로 설정한 RAND를 비교하였다. 결과적으로 제안 기법은 RAND 대비 월등한 성능을 보이며, OPT-REL과 OPT 간의 성능 차이가 크지 않음을 확인할 수 있다. 이는 Gaussian randomization을 통해 feasible한 해를 도출하는 과정에서의 성능 손실이 제한적임을 의미한다.

III. 결론

본 논문에서는 RF 채인 수가 제한된 하이브리드 빔포밍 환경에서 다수 사용자를 공정하게 서비스하기 위해 RIS와 RSMA를 결합한 통신 기법을 제안하였다. 동일 RIS를 통해 서비스되는 사용자 그룹에 GRS 구조를 적용함으로써, 과부화 환경에서도 최소 전송률을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 보였다. 또한, 최적화 기반 알고리즘을 제시하여 제안 기법의 우수성 및 적합성을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 오픈랜인력양성프로그램 연구 결과로 수행되었으며 (IITP-2026-RS-2024-00429088), 과학기술정보통신부에서 지원하는 과학기술원 InnoCORE 사업에 의해 수행되었음 (N10250155).

참 고 문 헌

- [1] H. Cho and J. Choi, "Sum Rate Maximization With Rate-Splitting Multiple Access for Hybrid Precoding Systems," in IEEE Transactions on Communications, vol. 73, no. 9, pp. 7874-7886, Sep. 2025.