

능동 지능형 반사 표면을 활용한 시스템에서 강건한 전송 기법 설계

양진호, 이형택, 최준일
한국과학기술원(KAIST)

{dwplo3479, htlee8459, junil}@kaist.ac.kr

요약

본 논문은 능동 지능형 반사 표면(active RIS)을 활용하는 시스템에서 채널의 추정 오류를 고려하여 기지국의 빔포머(beamformer)와 RIS의 반사계수(reflection coefficient)를 설계하는 기법을 제안한다. 각 사용자의 최소 전송률(minimum achievable rate)의 합을 최대화하는 것을 목표로 문제를 설정하였고, 원래의 최적화 문제를 다루기 쉬운 형태의 하한(lower bound)을 최대화하는 문제로 변환한 후 교대 최적화 기법을 적용하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안 기법이 채널의 추정 오류를 고려하지 않은 기법보다 더 높은 합 전송률(Sum-rate)을 달성하는 것을 확인하였다.

I. 서론

지능형 반사 표면(RIS)은 낮은 비용으로 주파수 효율 및 에너지 효율을 증가시킬 수 있는 기술로 주목받고 있다. RIS는 많은 수의 수동 소자로 이루어져 있으며, 각 소자는 수신된 신호의 위상을 조절하여 신호가 전파되는 환경을 원하는 대로 조절할 수 있다. 하지만, RIS를 통해 반사되는 신호는 높은 경로 손실(path-loss)을 겪어서 성능 향상이 제한적이다. 이를 극복하는 방법으로 기존 RIS 수동 소자에 증폭기를 추가하여 입사하는 신호를 반사할 때 신호의 위상뿐만 아니라 신호의 세기를 증폭시킬 수 있는 능동 RIS가 제안되었다.

이러한 능동 RIS를 사용하면 높은 성능을 얻을 수 있다는 것이 기존 연구들을 통해 알려져있는데, 대부분의 경우 완벽한 채널 상태 정보(CSI)를 가정하고 있다. 하지만 채널 추정 과정에서 불가피하게 추정 오류가 발생하므로 정확한 CSI를 얻는 것은 어렵다. 또한, 능동 RIS의 신호의 세기를 증폭시키는 기능은 추정 오류에 대한 영향을 증가시켜, 심각한 성능 열화를 겪게 만든다. 따라서, 능동 RIS를 활용하기 위해서는 기지국의 빔포머(beamformer)와 RIS의 반사계수(reflection coefficient)를 설정할 때 CSI 추정 오류를 고려해야 한다.

본 논문에서는 기지국의 빔포머와 RIS의 반사계수에 대한 강건한(robust) 설계 기법을 제안하였다. 최악의 경우를 고려한 각 사용자의 최소 전송률(minimum achievable rate)의 합을 최대화하는 문제를 설정하였고, 이를 다루기 쉬운 형태의 하한을 최대화하는 문제로 변환하였다. 마지막으로, 교대 최적화 기법을 이용하여 문제를 효율적으로 해결하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안 기법이 추정 오류를 고려하지 않은 비강건한(non-robust) 기법보다 좋은 성능을 보이는 것을 확인하였다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 능동 RIS를 활용하는 다중 사용자 다중 입력 단일 출력(MU-MISO) 시스템을 고려한다. 기지국에서는 N 개의 안테나를 사용하여 K 명의 사용자를 지원하며, 능동 RIS는 M 개의 반사 소자로 구성되어 있다. 전송 심볼 벡터는 $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_K]^T \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 로 표현되고 빔포머를 $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_K] \in \mathbb{C}^{N \times K}$ 로 나타낸다. RIS의 반사계수를 $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\mathbf{w}) \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 로 나타내며 이를 벡터 형태로 $\mathbf{w} = [w_1, \dots, w_M]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 로 표현한다. 각 RIS 반사 소자마다 최대 증폭시킬 수 있는 크기가 $|w_m|^2 \leq$

a_{\max} 로 제한되어 있다. k 번째 사용자에서 수신된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_k = \sum_{i=1}^K (\mathbf{h}_{d,k}^H + \mathbf{h}_{r,k}^H \mathbf{\Lambda} \mathbf{H}_{BR}) \mathbf{f}_i s_i + \mathbf{h}_{r,k}^H \mathbf{\Lambda} \mathbf{z} + n_k, \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{h}_{d,k}^H$, $\mathbf{h}_{r,k}^H$, \mathbf{H}_{BR} 는 각각 기지국과 k 번째 사용자 사이의 채널, RIS와 k 번째 사용자 사이의 채널, 기지국과 RIS 사이의 채널을 의미한다. RIS에서 발생한 잡음 벡터는 $\mathbf{z} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}_M, \sigma_z^2 \mathbf{I}_M)$, k 번째 사용자에서의 잡음은 $n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_k^2)$ 로 나타낸다. 또한, RIS에서 능동 소자를 사용함에 따라 RIS에서의 전력 소모는 다음과 같다.

$$\|\mathbf{\Lambda} \mathbf{H}_{BR} \mathbf{F}\|_F^2 + \sigma_z^2 \|\mathbf{w}\|_2^2 \leq P_R, \quad (2)$$

여기서 P_R 은 RIS에서의 최대 전력을 의미한다.

일반적으로 RIS에서는 기저대역 신호 처리 능력이 없기 때문에 RIS와 관련된 채널들을 정확하게 추정하는 것은 어렵다. 따라서, 기지국과 사용자 사이의 채널, RIS와 사용자 사이의 채널에 대해서는 추정 오류가 존재한다고 가정한다. 이를 고려하면 k 번째 사용자에 대한 채널들은 $\mathbf{h}_{d,k} = \hat{\mathbf{h}}_{d,k} + \Delta \mathbf{h}_{d,k}$ 와 $\mathbf{h}_{r,k} = \hat{\mathbf{h}}_{r,k} + \Delta \mathbf{h}_{r,k}$ 로 표현되며, $\hat{\mathbf{h}}_{d,k}$ 와 $\hat{\mathbf{h}}_{r,k}$ 는 추정 채널 $\Delta \mathbf{h}_{d,k}$ 와 $\Delta \mathbf{h}_{r,k}$ 는 추정 오류를 나타낸다. 추정 오류에 대해서는 통계적 CSI 오류 모델을 적용시켜 정규 분포 $\Delta \mathbf{h}_{d,k} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}_N, \sigma_{d,k}^2 \mathbf{I}_N)$ 와 $\Delta \mathbf{h}_{r,k} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}_M, \sigma_{r,k}^2 \mathbf{I}_M)$ 를 따르는 것으로 모델링한다. 기지국과 RIS의 위치가 고정됨에 따라 \mathbf{H}_{BR} 에 대해서는 정확한 CSI를 가정한다.

III. 제안하는 강건한 기법 설계

본 논문에서는 각 사용자마다 최악의 경우를 고려한 최소 전송률의 합인 R_{sum} 을 최대화하는 것을 목표로 하여 기지국의 빔포머와 RIS의 반사계수를 최적화한다. 이때 최적화 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$(P1): \max_{\mathbf{F}, \mathbf{w}} R_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K R_{\min,k} \quad (3)$$

$$\text{s. t. } \|\mathbf{F}\|_F^2 \leq P_B, \quad (4)$$

$$\|\mathbf{\Lambda} \mathbf{H}_{BR} \mathbf{F}\|_F^2 + \sigma_z^2 \|\mathbf{w}\|_2^2 \leq P_R, \quad (5)$$

$$|w_m|^2 \leq a_{\max}, m = 1, \dots, M, \quad (6)$$

여기서 P_B 는 기지국의 최대 송신 전력이며, $R_{\min,k}$ 는 k 번째 사용자의 최소 전송률을 의미하며 다음과 같다.

$$R_{\min,k} = \log_2 \left(1 + \frac{|\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_k|^2}{\Gamma_k} \right), \quad (7)$$

위 수식에서 $\hat{\mathbf{h}}_k^H$ 는 기지국과 k 번째 사용자 사이의 추정 채널, Γ_k 는 추정 오류의 통계적인 특성을 고려한 간섭 및 잡음(interference-plus-noise)을 의미하며 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{h}}_k^H = \hat{\mathbf{h}}_{d,k}^H + \hat{\mathbf{h}}_{r,k}^H \mathbf{A} \mathbf{H}_{BR}, \quad (8)$$

$$\Gamma_k = \sum_{i \neq k}^K |\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_i|^2 + \sigma_z^2 \|\hat{\mathbf{h}}_{r,k}^H \mathbf{A}\|_2^2 + \sigma_z^2 \sigma_{r,k}^2 \|\mathbf{w}\|_2^2 + \sum_{i=1}^K (\sigma_{d,k}^2 \|\mathbf{f}_i\|_2^2 + \sigma_{r,k}^2 \|\mathbf{A} \mathbf{H}_{BR} \mathbf{f}_i\|_2^2) + \sigma_k^2. \quad (9)$$

문제 (P1)의 목적함수(objective function)는 \mathbf{F} 와 \mathbf{w} 에 대해 공동으로 오목(concave)하지 않으며 문제의 제약조건(constraint) (5)도 볼록(convex)하지 않기 때문에 (P1)은 볼록 최적화 문제가 아니다.

이러한 문제를 풀기 위해 $R_{\min,k}$ 의 다루기 쉬운 하한을 유도하여 각 $R_{\min,k}$ 의 하한의 합을 최대화하는 방식으로 문제를 재구성한다. $R_{\min,k}$ 의 하한은 가중 평균 제곱 오차 최소화(WMMSE) 방법과 유사하며 [1], 다음과 같이 나타낸다.

$$R_{\min,k} \geq \log_2 v_k - v_k e_k(u_k, \mathbf{F}, \mathbf{w}) + c, \quad (10)$$

여기서 $v_k \in \mathbb{R}_{++}$ 와 $u_k \in \mathbb{C}$ 는 임의의 상수를 의미하며, 상수 c 와 함수 $e_k(u_k, \mathbf{F}, \mathbf{w})$ 는 다음과 같다.

$$c = \log_2 e - \log_2(\log_2 e), \quad (11)$$

$$e_k(u_k, \mathbf{F}, \mathbf{w}) = |1 - u_k^* \hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_k|^2 + \sum_{i \neq k}^K |u_k^* \hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_i|^2 + \sum_{i=1}^K (\sigma_{d,k}^2 \|u_k^* \mathbf{f}_i\|_2^2 + \sigma_{r,k}^2 \|u_k^* \mathbf{A} \mathbf{H}_{BR} \mathbf{f}_i\|_2^2) + \sigma_z^2 \|u_k^* \hat{\mathbf{h}}_{r,k}^H \mathbf{A}\|_2^2 + \sigma_z^2 \sigma_{r,k}^2 \|u_k^* \mathbf{w}\|_2^2 + \sigma_k^2 |u_k|^2. \quad (12)$$

따라서, 유도한 하한을 이용하여 문제 (P1)을 다음과 같이 변환한다.

$$(P2): \max_{\mathbf{v}, \mathbf{u}, \mathbf{F}, \mathbf{w}} \sum_{k=1}^K \log_2 v_k - v_k e_k(u_k, \mathbf{F}, \mathbf{w}) \quad (13)$$

s.t. (4), (5), (6),

여기서 $\mathbf{v} = [v_1, \dots, v_K]^T \in \mathbb{R}_{++}^{K \times 1}$ 와 $\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_K]^T \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 는 보조 변수(auxiliary variable)를 나타낸다.

여전히 문제 (P2)는 볼록 최적화 문제가 아니므로 이를 효율적으로 풀기 위해 교대 최적화 기법을 사용한다. 우선, \mathbf{F} 와 \mathbf{w} 를 고정시키고 \mathbf{v} 와 \mathbf{u} 에 대한 최적화를 진행한다. First-order optimality condition을 만족하는 점을 찾으면 \mathbf{v} 와 \mathbf{u} 에 대한 최적의 해는 다음과 같이 나타낸다.

$$v_k^* = \frac{1}{\ln 2} \left(1 + \frac{|\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_k|^2}{\Gamma_k} \right), u_k^* = \frac{\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_k}{|\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_k|^2 + \Gamma_k}. \quad (14)$$

다음으로, 기지국의 빔포머 \mathbf{F} 에 대한 최적화를 진행한다. 이때 함수 $e_k(u_k, \mathbf{F}, \mathbf{w})$ 는 \mathbf{F} 에 대해 볼록 함수이며, 제약 조건들 또한 볼록 집합이기 때문에 문제 (P2)는 \mathbf{F} 에 대한 볼록 최적화 문제로 최적의 해 \mathbf{F}^* 를 얻을 수 있다.

마지막으로, RIS의 반사계수 \mathbf{w} 에 대한 최적화를 진행한다. 함수 $e_k(u_k, \mathbf{F}, \mathbf{w})$ 는 \mathbf{w} 에 대해 볼록 함수이며, 마찬가지로 제약 조건들 또한 볼록 집합이기 때문에 문제 (P2)는 최적의 해 \mathbf{w}^* 를 얻을 수 있는 볼록 최적화 문제이다.

IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제안한 기법의 성능을 확인하였다. 기지국에서는 균일 평면 배열(UPA) 구조로

$N = 4 \times 4$ 개의 안테나로 $K = 4$ 명의 사용자를 지원하고 있다. RIS도 UPA 구조로 $M = 8 \times 8$ 또는 $M = 12 \times 8$ 개의 능동 소자로 이루어져 있다. 기지국과 RIS는 각각 (0 m, 0 m)와 (500 m, 20 m)에 배치하였고 사용자들은 중심이 (500 m, 0 m), 반지름이 10 m인 원 안에 무작위로 존재한다. RIS와 사용자들의 잡음 분산은 $\sigma_z^2 = \sigma_k^2 = -104$ dBm으로 설정한다. RIS의 전력제한은 $P_R = -10$ dBm으로 가정한다.

추정 채널 $\hat{\mathbf{h}}_{d,k}$, $\hat{\mathbf{h}}_{r,k}$, \mathbf{H}_{BR} 에 대해서는 라이시안 페이딩을 가정하고 CSI 추정 오류 분산은 $\sigma_{d,k}^2 = \frac{\delta^2}{N} \|\hat{\mathbf{h}}_{d,k}\|_2^2$ 와 $\sigma_{r,k}^2 = \frac{\delta^2}{M} \|\hat{\mathbf{h}}_{r,k}\|_2^2$ 로 표현되며 $\delta \in [0, 1]$ 는 CSI 불확실성(uncertainty)의 상대적인 양을 의미한다.

제안하는 기법의 성능을 평가하기 위해서 합 전송률을 성능 지표로 삼았으며, 이는 다음과 같이 나타낸다.

$$\sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{|\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_k|^2}{\sum_{i \neq k}^K |\hat{\mathbf{h}}_k^H \mathbf{f}_i|^2 + \sigma_z^2 \|\hat{\mathbf{h}}_{r,k}^H \mathbf{A}\|_2^2 + \sigma_k^2} \right), \quad (15)$$

여기서 $\mathbf{h}_k^H = \hat{\mathbf{h}}_{d,k}^H + \hat{\mathbf{h}}_{r,k}^H \mathbf{A} \mathbf{H}_{BR}$ 는 기지국과 k 번째 사용자 사이의 유효 채널을 의미한다. 성능을 비교하기 위해 perfect CSI와 non-robust 방법을 고려하였다. Perfect CSI의 경우에는 모든 채널을 정확하게 알고 있고 non-robust의 경우에는 추정 채널만을 알고 있는 경우이다.

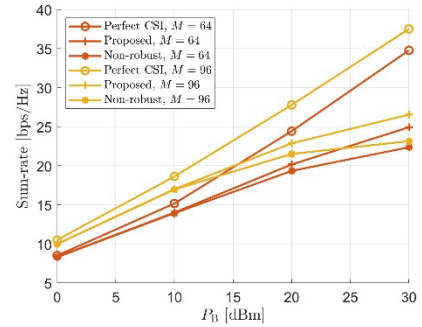


그림 1. $\alpha_{\max} = 30$ dB, $\delta = 0.2$ 일 때 P_B 에 따른 합 전송률.

그림 1에서는 기지국에서의 최대 송신 전력에 따른 합 전송률을 보여준다. P_B 가 증가함에 따라 제안된 robust 기법이 non-robust 경우보다 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 제안된 기법에서 전송률의 최악의 경우를 고려한 점이 추정 오류의 영향이 큰 상황에서 성능 향상을 가져올 수 있는 것을 의미하며, non-robust의 경우에는 추정 채널만을 고려하기 때문에 성능 저하가 발생하는 것을 보여준다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터지원사업의 연구결과와(IITP-2024-2020-0-01787) 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2021-0-00269, 6세대 Tbps급 데이터 전송율을 지원하는 sub-THz 대역 무선 전송 및 접속 요소 기술 개발)

참고 문헌

- [1] Q. Shi, M. Razaviyayn, Z.-Q. Luo, and C. He, "An Iteratively Weighted MMSE Approach to Distributed Sum-Utility Maximization for a MIMO Interfering Broadcast Channel," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 9, pp. 4331-4340, Sep. 2011.