

STAR-RIS 소자 할당을 통한 OFDM 통신 시스템의 합산 정보 전송률 최대화

문정현, 조혜상, 최준일
한국과학기술원

jh0908@kaist.ac.kr, nanjohn96@kaist.ac.kr, junil@kaist.ac.kr

STAR-RIS Element Allocation to Maximize Sum Rate of OFDM Systems

Moon Jeonghyun, Cho Hyesang, Choi Junil
KAIST

요약

본 논문에서는 동시에 송신하고 반사하는 재구성 가능한 지능형 표면 (simultaneously transmitting and reflecting-reconfigurable intelligent surface, STAR-RIS)이 설치된 다중 입력 단일 출력 (multiple-input single-output, MISO) 직교 주파수 분할 다중 방식 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 시스템에서 STAR-RIS 소자 할당을 통해 합산 정보 전송률을 최대화하는 알고리즘을 제안한다. 제안 기법은 소자 할당을 통해 송신 및 반사 계수를 closed-form으로 얻을 수 있어 낮은 복잡도로 기존의 최적화 기반의 기법과 유사한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

I. 서론

RIS는 수동 소자로만 구성되어 낮은 비용과 낮은 에너지 소비로 정보 전송률을 증가시킬 수 있는 기술이다. 하지만, RIS는 신호를 들어온 신호와 같은 방향에 있는 UE로만 반사할 수 있다는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 360도 coverage를 달성할 수 있는 STAR-RIS가 등장했다.

STAR-RIS는 들어온 신호와 같은 방향에 있는 UE와 반대 방향에 있는 UE 모두에게 신호를 전달할 수 있다. STAR-RIS에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있지만, 기존의 연구는 대부분 최적화 기반으로 진행되어 높은 복잡도를 갖는다.

본 논문에서는 소자 할당 개념을 활용하여 낮은 복잡도로 합산 정보 전송률을 최대화하는 알고리즘을 제안한다. 소자 할당은 RIS가 설치된 통신 환경에서 제안된 기법으로 각각의 RIS의 소자를 하나의 UE에 할당하는 기법이다 [1]. 본 논문에서는 이전에 제안된 RIS 소자 할당 기법을 STAR-RIS가 설치된 통신 환경에 맞게 확장하여 STAR-RIS 소자 할당 기법을 제안한다. STAR-RIS 소자 할당 기법을 통해 특정 채널만을 고려하여 STAR-RIS 송신 및 반사 계수를 얻을 수 있어, 기존의 최적화 기반의 기법들에 비해 낮은 복잡도를 갖는다. 그럼에도, 결과를 통해 제안 기법이 기존의 최적화 기반의 기법과 유사한 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다.

II. 본론

본 논문에서는 N_t 개의 안테나를 가진 기지국 (base station, BS)이 M 개의 소자로 구성된 STAR-RIS가 설치된 상황에서 K 개의 단일 안테나 UE를 지원하는 환경을 가정한다. N 개의 subcarrier를 갖는 OFDM 시스템을 고려하고, 이때 각 subcarrier는 하나의 UE만을 지원한다고 가정한다.

STAR-RIS로부터 송신된 신호를 받는 영역을 송신 영역, 반사된 신호를 받는 영역을 반사 영역이라고 한다.

각 영역에 속한 UE들의 집합을 $\mathcal{K}_t := \{1, \dots, K_t\}$, $\mathcal{K}_r := \{K_t + 1, \dots, K\}$ 로 정의하며 전체 UE들의 집합을 $\mathcal{K} = \mathcal{K}_t \cup \mathcal{K}_r$ 로 정의한다. STAR-RIS의 송신 및 반사 계수는 다음과 같다.

$$\Phi_t = \text{diag}(\beta_{t,1}e^{j\theta_{t,1}}, \dots, \beta_{t,M}e^{j\theta_{t,M}}),$$
$$\Phi_r = \text{diag}(\beta_{r,1}e^{j\theta_{r,1}}, \dots, \beta_{r,M}e^{j\theta_{r,M}}).$$

이때 $\beta_{t,m}$ 와 $\beta_{r,m}$ 는 m 번째 소자의 크기 계수이며, 에너지 보존 법칙에 의하여 $\beta_{t,m}, \beta_{r,m} \in [0, 1]$, $\beta_{t,m}^2 + \beta_{r,m}^2 = 1, \forall m \in \mathcal{M} := \{1, \dots, M\}$ 을 만족한다. $\theta_{t,m}$ 와 $\theta_{r,m}$ 는 m 번째 소자의 위상 계수이며, $\theta_{t,m}, \theta_{r,m} \in [0, 2\pi)$, $\forall m \in \mathcal{M}$ 를 만족한다. $\theta_{t,m}$ 와 $\theta_{r,m}$ 는 BS에서 독립적으로 제어할 수 있다고 가정한다. 편의를 위해 아래와 같은 변수를 사용한다.

$$c = \begin{cases} t, & \text{if } k \in \mathcal{K}_t \\ r, & \text{if } k \in \mathcal{K}_r \end{cases}$$

OFDM 시스템에서 주파수 영역의 채널은 이산 푸리에 변환 (discrete Fourier transform)를 통해 얻을 수 있다. k 번째 UE의 주파수 영역의 채널은 아래와 같다.

$$\mathbf{h}_{k,n}^H = \mathbf{h}_{d,k,n}^H + \mathbf{h}_{c,k,n}^H \Phi_c \mathbf{G}_n, \quad c \in \{t, r\}.$$

이때 $\mathbf{h}_{d,k,n}^H$ 와 \mathbf{G}_n , $\mathbf{h}_{c,k,n}^H$ 는 각각 BS와 k 번째 UE 사이와 BS와 STAR-RIS 사이, STAR-RIS와 k 번째 UE 사이의 주파수 영역 채널의 n 번째 subcarrier 채널이다.

n 번째 subcarrier가 k 번째 UE를 지원할 때, 수신 신호는 아래와 같다.

$$\mathbf{y}_{k,n} = \mathbf{h}_{k,n}^H \mathbf{x}_{k,n} + \mathbf{z}_{k,n}$$
$$= (\mathbf{h}_{d,k,n}^H + \mathbf{h}_{c,k,n}^H \Phi_c \mathbf{G}_n) \mathbf{f}_{k,n} s_{k,n} + \mathbf{z}_{k,n}.$$

최적의 beamformer인 maximum ratio transmission beamformer를 사용하면, n 번째 subcarrier의 지원을 받는 k 번째 UE의 정보 전송률은 다음과 같다.

$$R_{k,n} = \log_2 \left(1 + \frac{p_{k,n}}{\sigma^2} \|\mathbf{h}_{k,n}\|^2 \right).$$

이때 $p_{k,n}$ 는 k 번째 UE의 n 번째 subcarrier에 할당된 최대 송신 전력이다.

이후 해당 시스템을 기반으로 합산 정보 전송률을 최대화하는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 총 4개의 블록으로 이루어진다. 각 블록에서는 다른 변수들은 고정하고 하나의 변수만을 고려한다.

첫번째로, subcarrier 할당 블록이다. 합산 정보 전송률을 최대화하기 위해서, n 번째 subcarrier 는 해당 subcarrier 의 채널 이득이 가장 큰 UE 에게 할당한다. 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$k = \operatorname{argmax}_{k' \in \mathcal{K}} \|\mathbf{h}_{k',n}\|^2$$

Subcarrier 할당이 되면, n 번째 subcarrier 의 k 번째 UE 의 전력은 다음과 같이 정의된다.

$$p_{k,n} = \begin{cases} p_n, & n \in \mathcal{N}_k \\ 0, & n \notin \mathcal{N}_k \end{cases}$$

이때 p_n 은 n 번째 subcarrier 의 전력으로 $\sum_{n=1}^N p_n = P$ 를 만족하고, \mathcal{N}_k 는 k 번째 UE 에게 할당된 subcarrier index 의 집합으로 $\sum_{k=1}^K |\mathcal{N}_k| = N$ 을 만족한다.

두번째로, STAR-RIS 소자 할당 및 위상 설정 블록이다. STAR-RIS 소자 할당 및 위상 설정은 STAR-RIS 의 위상 계수만을 고려한다. 각 subcarrier 는 하나의 UE 를 지원하기 때문에, n_c 번째 subcarrier 의 정보 전송률을 최대화하는 것은 n_c 번째 subcarrier 의 채널 이득을 최대화하는 것과 동일하므로 m 번째 소자의 최적의 위상 계수는 다음과 같다.

$$\theta_{c,m}^{(n_c)} = \angle \left(\mathbf{h}_{d,k_c,n_c}^H + \sum_{i=1, i \neq m}^M \phi_{c,i} h_{c,k_c,n_c,i}^* \mathbf{g}_{n_c,i}^H \right) \mathbf{h}_{c,k_c,n_c,m} \mathbf{g}_{n_c,m}$$

이때 $\phi_{c,i} = \beta_{c,i} e^{j\theta_{c,i}}$ 는 송신 및 반사 계수의 i 번째 요소이고, $h_{c,k_c,n_c,i}$ 는 \mathbf{h}_{c,k_c,n_c} 의 i 번째 요소, $\mathbf{g}_{n_c,i}^H$ 는 \mathbf{G}_{n_c} 의 i 번째 열이다. m 번째 소자가 n_c 번째 subcarrier 에 할당되었을 때 송신 및 반사 계수는 아래와 같다.

$$\Phi_c^{(m,n_c)} = \operatorname{diag} \left(\beta_{c,1} e^{j\theta_{c,1}}, \dots, \beta_{c,m} e^{j\theta_{c,m}^{(n_c)}}, \dots, \beta_{c,M} e^{j\theta_{c,M}} \right).$$

소자 할당 과정에서 각 영역의 합산 정보 전송률을 최대화하도록 m 번째 소자를 특정 subcarrier 에 할당한다. 각 영역의 합산 정보 전송률을 최대화하기 위해, 각 영역에 존재하는 UE 들의 subcarrier 들 중 각각의 subcarrier 의 채널 이득을 최대화하도록 위상 계수를 설정했을 때 가장 큰 합산 정보 전송률을 얻을 수 있는 subcarrier 에 m 번째 소자를 할당한다. m 번째 소자에 할당되는 subcarrier 는 다음과 같다.

$$n_{c,m} = \operatorname{argmax}_{n_c} \sum_{k \in \mathcal{K}_c} \sum_{n \in \mathcal{N}_c} \log_2 \left(1 + \frac{p_n}{\sigma^2} \|\mathbf{h}_{k,n}^{(m,n_c)}\|^2 \right).$$

이때 $(\mathbf{h}_{k,n}^{(m,n_c)})^H = \mathbf{h}_{d,k,n}^H + \mathbf{h}_{t,k,n}^H \Phi_c^{(m,n_c)} \mathbf{G}_n$ 로 m 번째 소자가 n_c 번째 subcarrier 에 할당되었을 때의 n 번째 subcarrier 의 주파수 영역 채널이다. $n_{c,m}$ 가 정해지면, m 번째 소자의 위상 계수는 $n_{c,m}$ 번째 subcarrier 에 맞게 업데이트 된다. 소자 할당 및 위상 설정은 첫번째 소자부터 마지막 소자까지 순서대로 소자 할당과 위상 설정을 진행한다.

세번째로, STAR-RIS 소자의 에너지 분할 블록이다. 송신 계수의 크기와 반사 계수의 크기는 에너지 보존 법칙에 의해 독립적인 제어가 불가능하여, 소자 할당을 통해 m 번째 소자에 할당된 $n_{t,m}$, $n_{r,m}$ 번째 subcarrier 들의 합산 정보 전송률을 최대화하도록 크기 계수들을 업데이트 한다. $n_{t,m}$, $n_{r,m}$ 번째 subcarrier 들의 합산 정보 전송률을 최대화하는 위상 계수는 아래의 문제를 통해 얻을 수 있다.

$$(P1): \max_{\beta_{t,m}, \beta_{r,m}} f_{t,m}(\beta_{t,m}) f_{r,m}(\beta_{r,m})$$

$$\text{s.t. } \beta_{t,m}, \beta_{r,m} \in [0,1], \quad (1a)$$

$$\beta_{t,m}^2 + \beta_{r,m}^2 = 1. \quad (1b)$$

이때 $f_{c,m}(\beta_{c,m}) = 1 + \frac{p_{n_{c,m}}}{\sigma^2} \|\mathbf{h}_{k_{c,m},n_{c,m}}\|^2$ 로 $\beta_{c,m}$ 에 대한 이차식이다. (P1)은 objective function 과 (1b)의 복잡함 특성으로 인해 closed-form 으로 풀 수 없다. 대안으로, objective function 의 하한(lower bound)을 도출하여 수렴할 때까지 반복적으로 lower bound 를 최대화한다.

Lower bound 를 최대화하는 문제는 다음과 같다.

$$(P2): \max_{\beta_{t,m}, \beta_{r,m}} g_{t,m}^{(v)}(\beta_{t,m}) g_{r,m}^{(v)}(\beta_{r,m})$$

$$\text{s.t. } (1a), (1b).$$

이때 v 는 iteration index 이고, $g_{c,m}^{(v)}(\beta_{c,m}) = \nabla f_{c,m}(\beta_{c,m}^{(v)}) (\beta_{c,m} - \beta_{c,m}^{(v)}) + f_{c,m}(\beta_{c,m}^{(v)})$ 이다. $\beta_{r,m}$ 를 $\sqrt{1 - \beta_{t,m}^2}$ 로 치환하고 $\beta_{t,m}$ 에 대해 미분하여 식을 정리하면 4차 방정식이 되어 (P2)의 해는 closed-form 으로 얻을 수 있다. STAR-RIS 소자 할당 및 위상 설정과 동일하게 첫번째 소자부터 마지막 소자까지 순서대로 STAR-RIS 소자의 에너지 분할을 진행한다. 마지막으로 전력 할당 블록이다. Water-filling 알고리즘으로 N 개의 subcarrier 에 전력을 할당한다.

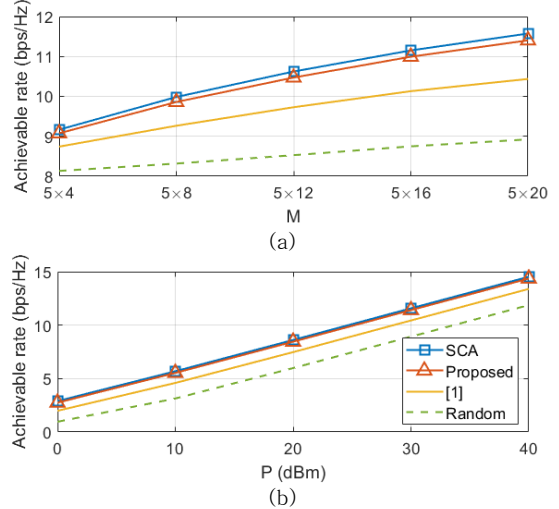


그림 1. (a) STAR-RIS 소자 개수 (b) 최대 송신 전력에 따른 합산 정보 전송률

결과를 검증하기 위해 3개의 비교대상으로 1) 최적화 기반의 기법인 successive convex approximation (SCA)과 2) 기존의 RIS 소자 할당 기법인 [1], 3) 송신 및 반사 계수를 임의의 위상과 크기를 갖도록 설정한 Random 을 사용하였다. 그림 1을 확인하면 제안 기법이 SCA 기법에 비해 낮은 복잡도를 가짐에도 유사한 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한, 제안 기법이 SCA 기법을 제외한 다른 비교 기법들 보다 우수한 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 STAR-RIS 소자 할당을 통한 OFDM 통신 시스템의 합산 정보 전송률을 최대화하는 기법을 제안하였다. 제안 기법은 기존의 최적화 기반의 기법에 비해 낮은 복잡도를 가지며, 결과를 통해 최적화 기반의 기법과 유사한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터지원사업의 연구결과로 수행되었음. (IITP-2024-2020-0-01787)

참고 문헌

- [1] H. Cho and J. Choi, "Alternating Beamforming With Intelligent Reflecting Surface Element Allocation," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 6, pp. 1232-1236, 2021.