주파수 분할 이중 통신 시스템에서 STAR-RIS 기반 가중합 전송률 최대화

이태관*, 이교승*, 이형택†, 최준일*
*한국과학기술원, †이화여자대학교

*{taekwan, iee4432, junil}@kaist.ac.kr, †htlee@ewha.ac.kr

요 약

본 논문은 동시 송신 및 반사형 재구성 가능한 지능형 표면 (simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface, STAR-RIS) 기반의 주파수 분할 이중 통신 시스템(frequency division duplexing, FDD)에서 다중 유저가 존재할 때, 가중합 전송률 최대화 문제를 정의하고 풀이 기법을 제안한다. 문제 해결을 위해 교대 최적화(alternating optimization, AO) 알고리즘을 제안하며, 문제를 하향링크 기지국 송신 빔포밍, 상향링크 기지국 수신 빔포밍, 상향링크 유저 파워 할당, STAR-RIS 송신 및 반사 계수 최적화에 대한 4 가지 하위 문제로 분리하여 각 하위 문제를 해결하였다. 시뮬레이션 결과는 제안 기법이 가중합 전송률 관점에서 다른 기법보다 성능이 좋음을 보여준다.

Ⅰ. 서 론

동시 송신 및 반사형 재구성 가능한 지능형 표면 (simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface, STAR-RIS)은 높은 에너지 효율을 달성하며 하드웨어 비용을 낮출 수 있는 장점이 있기에 미래 무선 통신 시스템에 적용될 신기술로 고려되고 있다. 주파수 분할 이중(frequency division duplexing, FDD) 시스템에서는 하향링크와 상향링크 신호가 같은 시간에 전송되기 때문에 STAR-RIS 의 송신 및 반사 계수는 두 전송을 동시에 지원하기 위해 최적화되어야 한다.

본 논문에서는 STAR-RIS 기반의 FDD 시스템에서 다중 안테나를 가진 기지국(base station, BS)이 단일 안테나를 가진 다중 유저(user equipment, UE)를 서비스하는 경우 전체 시스템의 하향링크와 상향링크의 가중합 전송률을 최대화하는 기법을 제안한다.

Ⅱ. 시스템 모델 및 문제 설계

본 논문에서는 STAR-RIS 기반의 FDD 통신 시스템을 고려한다. BS 에서는 N 개의 안테나를 운용하며 단일 안테나를 가진 K명의 UE 를 서비스한다. STAR-RIS 는 L 개의 소자를 갖는 균일한 평면 배열 구조이다. 각 STAR-RIS 소자는 들어오는 신호를 동시에 송신하면서 반사하는 모드로 동작한다. $\beta_l^t, \beta_l^r \in [0,1]$ 은 STAR-RIS 의 l번째 소자에서 송신 계수와 반사 계수의 진폭 변화를 의미하고, $\theta_l^t, \theta_l^r \in [0,2\pi)$ 은 STAR-RIS 의 l번째 소자에서 송신 계수와 반사 계수의 위상 변화를 의미한다. STAR-RIS 의 l번째 소자에 들어온 신호를 s_l 이라고 하면 송신하는 신호는 $t_l = \left(\sqrt{\beta_l^t} e^{j\theta_l^t}\right) s_l$, 반사하는 신호는 $r_l = \left(\sqrt{\beta_l^r} e^{j\theta_l^r}\right) s_l$ 로 표현할 수 있다. 이때 에너지 보존 법칙에 따라 $\beta_l^t + \beta_l^r = 1$ 이 성립한다. 모든 STAR-RIS 소자의 계수들을 벡터 $\mathbf{q}^\tau = \left[\sqrt{\beta_1^\tau} e^{j\theta_1^\tau}, \cdots, \sqrt{\beta_l^\tau} e^{j\theta_l^\tau}, \cdots, \sqrt{\beta_L^\tau} e^{j\theta_L^\tau}\right]^{\mathrm{T}} \in \mathbb{C}^{L\times 1}, \tau \in \{t, r\}$ 로 표현한다.

BS 와 UE 사이의 직접 채널은 장애물에 의해 차단 되어있다고 가정하면 하향링크 전송에서, k번째 UE 가 수신한 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$y_{\mathrm{D},k} = \mathbf{h}_{\mathrm{D},k}^{\mathrm{H}} \sum_{i=1}^{K} \mathbf{w}_i s_{\mathrm{D},i} + n_{\mathrm{D},k} \tag{1}$$

여기서 $s_{\mathrm{D},i}$은 $\mathbb{E}\left[|s_{\mathrm{D},i}|^2\right] = 1$을 만족하는 i번째 UE 에 대한 BS 의 송신 심볼, $\mathbf{w}_i$는 i번째 UE 에 대한 BS 의 송신 빔포밍 벡터, 그리고 $n_{\mathrm{D},k} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{\mathrm{D}}^2)$ 는 분산이 σ_{D}^2 인 UE 에서의 잡음 스칼라이다. BS 와 k 번째 사이의 하향링크 연쇄 채널은 $\mathbf{h}_{\mathrm{D},k}^{\mathrm{H}} = \mathbf{h}_{\mathrm{RU},k}^{\mathrm{H}} \boldsymbol{\Theta}_\tau \mathbf{H}_{\mathrm{BR}} \in \mathbb{C}^{1\times N}$ 이며, 이 때 $\mathbf{h}_{\mathrm{RU},k}^{\mathrm{H}} \in \mathbb{C}^{1\times L}$은 k번째 UE 와 STAR-RIS 사이의 채널, $\mathbf{H}_{\mathrm{BR}} \in \mathbb{C}^{L\times N}$ 은 STAR-RIS 와 BS 의 채널, 그리고 $\boldsymbol{\Theta}_\tau = \mathrm{diag}(\mathbf{q}^\tau) \in \mathbb{C}^{L\times L}$는 STAR-RIS 의 계수 행렬이다.

상향 링크 전송에서, BS 에서 수신한 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{y}_{\mathrm{U}} = \sum_{i=1}^{K} \mathbf{h}_{\mathrm{U},i} \sqrt{p_i}\, s_{\mathrm{U},i} + \mathbf{n}_{\mathrm{U}} \tag{2}$$

여기서 $s_{\mathrm{U},i}$은 $\mathbb{E}\left[|s_{\mathrm{U},i}|^2\right] = 1$을 만족하는 i번째 UE 의 송신 심볼이며, p_i 는 i 번째 UE 의 송신 파워이다. $\mathbf{n}_{\mathrm{U}} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_{\mathrm{U}}^2 \mathbf{I}_N)$는 분산이 σ_{U}^2 인 BS 에서의 잡음 벡터이다. i번째 UE 와 BS 사이의 상향링크 연쇄 채널은 $\mathbf{h}_{\mathrm{U},i} = \mathbf{H}_{\mathrm{RB}}^{\mathrm{H}} \boldsymbol{\Theta}_\tau \mathbf{h}_{\mathrm{UR},i} \in \mathbb{C}^{N\times 1}$ 이며, 이 때 $\mathbf{H}_{\mathrm{RB}}^{\mathrm{H}} \in \mathbb{C}^{N\times L}$ 는 STAR-RIS 와 BS 사이의 채널, $\mathbf{h}_{\mathrm{UR},i} \in \mathbb{C}^{L\times 1}$ 는 i번째 UE 와 STAR-RIS 사이의 채널이다. k 번째 UE 에 대한 BS 에서의 수신 빔포밍 벡터를 $\mathbf{v}_k^{\mathrm{H}}$ 로 정의하면, k번째 UE 에 대한 수신 신호는 $y_{\mathrm{U},k} = \mathbf{v}_k^{\mathrm{H}} \mathbf{y}_{\mathrm{U}}$ 로 표현된다.

FDD 시스템에서는 하향링크와 상향링크 신호가 다른 주파수 대역에서 동시에 전송되기 때문에 본 논문에서는 하향링크와 상향링크의 가중합 전송률을 최대화하는 문제를 아래와 같이 설계하였다.

$$\begin{aligned}
\max_{\mathbf{W},\mathbf{V},\mathbf{p},\boldsymbol{\Theta}_\tau} \ & \sum_{k=1}^{K} \epsilon_{\mathrm{D},k} \log(1 + \mathrm{SINR}_{\mathrm{D},k}) + \sum_{k=1}^{K} \epsilon_{\mathrm{U},k} \log(1 + \mathrm{SINR}_{\mathrm{U},k}) \\
\mathrm{s.t.} \ & \sum_{k=1}^{K} \| \mathbf{w}_k \|^2 \le p_{\max}^{\mathrm{D}}, \\
& 0 \le p_k \le p_{\max}^{\mathrm{U}}, \forall k, \\
& \theta_l^\tau \in [0, 2\pi), \tau \in \{t, r\}, \forall l, \\
& \beta_l^r + \beta_l^t = 1, \beta_l^r, \beta_l^t \in [0,1], \forall l.
\end{aligned} \tag{3}$$

여기서 $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \cdots, \mathbf{w}_K]$, $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1, \cdots, \mathbf{v}_K]$, $\mathbf{p} = [p_1, \cdots, p_K]^{\mathrm{T}}$이며, $\mathrm{SINR}_{\mathrm{D},k} = \frac{\left|(\mathbf{h}_{\mathrm{D},k})^{\mathrm{T}} \mathbf{w}_k\right|^2}{\left(\sigma_{\mathrm{D}}^2 + \sum_{i=1, i\neq k}^{K} \left|(\mathbf{h}_{\mathrm{D},k})^{\mathrm{T}} \mathbf{w}_i\right|^2\right)}$ 와 $\mathrm{SINR}_{\mathrm{U},k} = \frac{p_k \left|(\mathbf{h}_{\mathrm{U},k})^{\mathrm{H}} \mathbf{v}_k\right|^2}{\mathbf{v}_k^{\mathrm{H}} \left(\sigma_{\mathrm{U}}^2 \mathbf{I}_N + \sum_{i=1, i\neq k}^{K} p_i \mathbf{h}_{\mathrm{U},i} (\mathbf{h}_{\mathrm{U},i})^{\mathrm{H}}\right) \mathbf{v}_k}$는 각각 k번째 UE 에 대한 하향링크와 상향링크의 신호 대 간섭 및 잡음비(signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR)에 해당한다. $\epsilon_{\mathrm{D},k}$, $\epsilon_{\mathrm{U},k}$ 는 각각 하향링크 및 상향링크에서의 k 번째 UE 에 대한 가중치를 나타내며 $\sum_{k=1}^{K} \epsilon_{\mathrm{D},k} = 1, \sum_{k=1}^{K} \epsilon_{U,k} = 1$ 을 만족한다. $p_{\max}^{\mathrm{D}}$ 는 BS 의 최대 파워를 나타내며 $p_{\max}^{\mathrm{U}}$는 UE 의 최대 파워를 나타낸다.

Ⅲ. 제안하는 기법

위의 가중합 전송률 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 교대 최적화 알고리즘을 제안한다. 이에 따라 기존 문제는 하향링크 BS 송신 빔포밍, 상향링크 BS 수신 빔포밍, 상향링크 UE 파워 할당, STAR-RIS 송신 및 반사 계수 최적화에 대한 4 개의 하위 문제들로 나뉘어진다.

다른 모든 변수들이 고정된 상태에서 하향링크 BS 송신 빔포밍에 대한 하위 문제는 가중 최소 평균 제곱 오차(weighted minimum mean squared error, WMMSE) 알고리즘[1]을 통해 해결하였다. 구체적으로, 다음의 세 변수를 목적함수가 수렴할 때까지 순차적으로 갱신하여 k 번째 UE 의 하향링크 BS 송신 빔포밍 벡터 $\mathbf{w}_k$ 를 구한다.

$$u_k = \frac{\sigma_{\mathrm{D}}^2 + \sum_{i=1}^{K} \left|(\mathbf{h}_{\mathrm{D},k})^{\mathrm{T}} \mathbf{w}_i\right|^2}{\left(\sigma_{\mathrm{D}}^2 + \sum_{i=1, i\neq k}^{K} \left|(\mathbf{h}_{\mathrm{D},k})^{\mathrm{T}} \mathbf{w}_i\right|^2\right)},\ t_k = \frac{\left|(\mathbf{h}_{\mathrm{D},k})^{\mathrm{T}} \mathbf{w}_k\right|^2}{\left(\sigma_{\mathrm{D}}^2 + \sum_{i=1}^{K} \left|(\mathbf{h}_{\mathrm{D},k})^{\mathrm{T}} \mathbf{w}_i\right|^2\right)},$$

$$\mathbf{w}_k = \epsilon_{\mathrm{D},k} u_k t_k (\lambda \mathbf{I}_N + \sum_{i=1}^{K} \epsilon_{\mathrm{D},i} u_i |t_i|^2\, \mathbf{h}_{\mathrm{D},i}{}^{*} \mathbf{h}_{\mathrm{D},i}{}^{\mathrm{T}})^{-1}\, \mathbf{h}_{\mathrm{D},i}{}^{*} \quad (4)$$

여기서 $\lambda \geq 0$은 라그랑주 승수에 해당한다.

k 번째 UE 에 대한 BS 에서의 상향링크 수신 빔포밍은 다음과 같이 최소 평균 제곱 오차(minimum mean squared error, MMSE) 수신기를 통해 구한다.

$$\mathbf{v}_k = \frac{(\sigma_{\mathrm{U}}^2 \mathbf{I}_N + \sum_{i=1}^{K} p_i \mathbf{h}_{\mathrm{U},i} (\mathbf{h}_{\mathrm{U},i})^{\mathrm{H}})^{-1} \mathbf{h}_{\mathrm{U},k}}{\| (\sigma_{\mathrm{U}}^2 \mathbf{I}_N + \sum_{i=1}^{K} p_i \mathbf{h}_{\mathrm{U},i} (\mathbf{h}_{\mathrm{U},i})^{\mathrm{H}})^{-1} \mathbf{h}_{\mathrm{U},k} \|} \quad (5)$$

상향링크 UE 파워 할당에 대한 하위 문제는 분수계획법 (fractional programming, FP)을 이용해 해결하였다. 구체적으로, 다음의 세 변수를 목적함수가 수렴할 때까지 순차적으로 갱신하여 k번째 UE 의 송신 파워 p_k를 구한다.

$$\chi_k = \frac{\sqrt{\epsilon_{\mathrm{U},k}(1+\gamma_k) + \left|(\mathbf{h}_{\mathrm{U},k})^{\mathrm{H}} \mathbf{v}_k\right|^2 p_k}}{\sigma_{\mathrm{U}}^2 + \sum_{i=1}^{K} \left|(\mathbf{h}_{\mathrm{U},i})^{\mathrm{H}} \mathbf{v}_k\right|^2 p_i},\ \gamma_k = \frac{\left|(\mathbf{h}_{\mathrm{U},k})^{\mathrm{H}} \mathbf{v}_k\right|^2 p_k}{\sigma_{\mathrm{U}}^2 + \sum_{i=1, i\neq k}^{K} \left|(\mathbf{h}_{\mathrm{U},i})^{\mathrm{H}} \mathbf{v}_k\right|^2 p_i},$$

$$p_k = \{p_{\max}^{\mathrm{U}}, \frac{\chi_k^2 \epsilon_{\mathrm{U},k} (1+\gamma_k) \left|(\mathbf{h}_{\mathrm{U},k})^{\mathrm{H}} \mathbf{v}_k\right|^2}{(\sum_{i=1}^{K} \chi_i^2 \left|(\mathbf{h}_{\mathrm{U},k})^{\mathrm{H}} \mathbf{v}_i\right|^2)^2}\} \quad (6)$$

마지막으로, (3)을 기반으로 한 STAR-RIS 송신 및 반사계수에 대한 하위문제는 제약 완화(relaxation)와 연속적인 볼록 근사(successive convex approximation, SCA)를 이용해 아래와 같이 근사할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\min_{\psi}\ & \sum_{k=1}^{K} \epsilon_{\mathrm{D},k} \gamma_{\mathrm{D},k} + \sum_{k=1}^{K} \epsilon_{\mathrm{U},k} \gamma_{\mathrm{U},k} \\
\text{s.t.}\ & \mathbf{Q}_{t(l,l)} + \mathbf{Q}_{r(l,l)} \leq 1, \\
& \tilde{R}_{\eta,k} \geq \gamma_{\eta,k}, \eta \in \{\mathrm{D},\mathrm{U}\}, \forall k, \\
& \frac{1}{A_{\mathrm{D},k}} \leq \mathrm{Tr}(\mathbf{H}_{\mathrm{D},k} \mathbf{Q}_\tau), \forall k, \\
& B_{\mathrm{D},k} \geq \sigma_{\mathrm{D}}^2 + \sum_{i=1, i\neq k}^{K} \mathrm{Tr}(\mathbf{H}_{\mathrm{D},i} \mathbf{Q}_\tau), \forall k, \\
& \frac{1}{A_{\mathrm{U},k}} \leq p_k \mathrm{Tr}(\mathbf{H}_{\mathrm{U},k} \mathbf{Q}_\tau), \forall k, \\
& B_{\mathrm{U},k} \geq \sigma_{\mathrm{U}}^2 + \sum_{i=1, i\neq k}^{K} p_i \mathrm{Tr}(\mathbf{H}_{\mathrm{U},i} \mathbf{Q}_\tau), \forall k, \\
& \mathbf{Q}_\tau \geq 0.
\end{aligned} \quad (7)$$

이 때, $\mathbf{Q}_\tau = \mathbf{q}^\tau (\mathbf{q}^\tau)^{\mathrm{H}}$, $\mathbf{H}_{\mathrm{D},k} = (\mathbf{H}_{\mathrm{BR}}^{\mathrm{T}} \mathbf{w}_k (\mathbf{H}_{\mathrm{BR}}^{\mathrm{T}} \mathbf{w}_k)^{\mathrm{H}}) \odot (\mathbf{h}_{\mathrm{RU},k}^{*} (\mathbf{h}_{\mathrm{RU},k}^{*})^{\mathrm{H}})^{\mathrm{T}}$, $\mathbf{H}_{\mathrm{U},k} = (\mathbf{H}_{\mathrm{RB}}^{\mathrm{H}} \mathbf{v}_k (\mathbf{H}_{\mathrm{RB}}^{\mathrm{H}} \mathbf{v}_k)^{\mathrm{H}}) \odot (\mathbf{h}_{\mathrm{UR},k} (\mathbf{h}_{\mathrm{UR},k})^{\mathrm{H}})^{\mathrm{T}}$, $\psi = \{\mathbf{Q}_\tau, A_{\eta,k}, B_{\eta,k}, \gamma_{\eta,k}\}$ 로 정의한다. 위 문제는 볼록 문제인 준정부호 계획법(semidefinite programming, SDP)이며, MATLAB 의 CVX 와 같은 solver 를 통해 해를 구할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 기법의 성능을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. BS 에서는 $N = 8$ 개의 안테나를 운용한다. $K = 4$ 명의 UE 가 존재하며 송신 영역과 반사 영역에 각각 2 명씩 존재한다. 채널 $\mathbf{h}_{\mathrm{UR},i}$, $\mathbf{h}_{\mathrm{RU},k}^{\mathrm{H}}$, $\mathbf{H}_{\mathrm{BR}}$, $\mathbf{H}_{\mathrm{RB}}^{\mathrm{H}}$ 은 라이시안(Rician) 채널로 모델링 되었다. BS 과 STAR-RIS 의 위치는 각각 (0 m, 50 m), (100 m, 0 m) 이고, 송신 영역 UE 와 반사 영역 UE 의 위치는 각각 중심이 (100 m, −30 m), (100 m, 30 m) 이고 반지름이 20 m 인 원 안에 무작위로 분포하도록 설정하였다.

그림 1 에서는 STAR-RIS 소자의 개수 L 에 따른 가중합 전송률 $R_{\mathrm{WSR}} = \sum_{k=1}^{K} \epsilon_{\mathrm{D},k} \log(1 + \mathrm{SINR}_{\mathrm{D},k}) + \sum_{k=1}^{K} \epsilon_{\mathrm{U},k} \log(1 + \mathrm{SINR}_{\mathrm{U},k})$ 을 비교한다. L 이 증가하여 STAR-RIS 가 더 많은 소자를 가질수록 사용 가능한 자유도가 높아지기 때문에, 제안하는 기법의 R_{WSR} 은 증가한다. 또한, 제안 기법과 STAR-RIS 의 송신 및 반사 계수를 무작위로 설정한 Random coefficient 기법과 성능 차이를 통해서, FDD 시스템에서 하향링크와 상향링크를 동시에 고려하여 STAR-RIS 의 송신 및 반사 계수를 최적화하는 것이 시스템 성능을 크게 향상시킴을 알 수 있다.

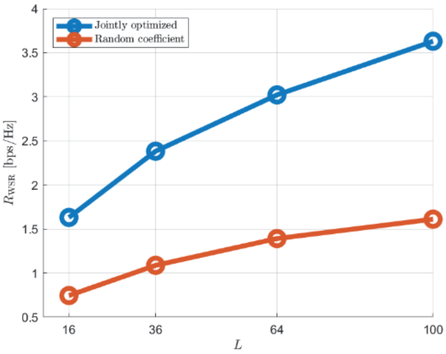

그림 1. L에 따른 가중합 전송률 성능 비교.

V. 결론

본 논문에서는 STAR-RIS 기반의 FDD 시스템에서 가중합 전송률 최대화 문제를 푸는 기법을 제안하였다. 이 문제를 해결하기 위해 교대 최적화 알고리즘을 제안했으며, 4 개의 하위 문제로 나누어 문제를 해결하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안 기법으로 STAR-RIS 를 최적화하였을 때가 STAR-RIS 의 송신 및 반사 계수를 무작위로 설정한 경우에 비해 더 큰 가중합 전송률을 보였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2025-RS-2020-II201787, 기여율 50%)과 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00395824, (총괄1-세부2) Upper-mid Band를 지원하는 Cloud virtualized RAN (vRAN) 시스템 기술 개발, 기여율 50%)

참 고 문 헌

[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," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 9, pp. 4331-4340, Sep. 2011.