

STAR-RIS 기반 하이브리드 근거리장 및 원거리장 SWIPT

권도형, 정성아
서울시립대학교

midnight@uos.ac.kr, seongah@uos.ac.kr

STAR-RIS-aided SWIPT in Hybrid Near-Far Field

Dohyung Kwon, Seongah Jeong
University of Seoul

요 약

본 논문은 동시 전송 및 반사 재구성 가능한 지능형 표면 (Simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface, STAR-RIS) 기반의 근거리장 및 원거리장 동시 무선 정보 및 전력 전송 (Simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT) 네트워크에서 사용자 합 전송률 최대화를 목표로 한다. 이를 위해 가중 최소 평균제곱 오차 (Weighted minimum mean square error, WMMSE) 기반 수신 빔포밍, STAR-RIS 계수에 대한 페널티 기반 SDR (Semidefinite relaxation), 내부점법 기반 에너지 빔포밍을 교대 최적화로 결합한 알고리즘을 제안한다.

I. 서 론

동시 전송 및 반사 재구성 가능한 지능형 표면 (Simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface, STAR-RIS)은 6G 네트워크의 유망 기술로 주목받고 있다. STAR-RIS 기반 동시 무선 정보 및 전력 전송 (Simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT)은 표면 양측 사용자를 동시에 지원하여 안정적인 연결성과 에너지 공급을 제공할 수 있다. 또한 6G 에서 대규모 안테나 배열과 고주파수 대역 활용으로 근거리장 (near-field) 영역이 확대됨에 따라, 빔포커싱을 통해 에너지 수확 성능을 높이고 의도되지 않은 간섭을 줄일 수 있다 [1].

본 논문에서는 STAR-RIS 의 에너지 분할 (Energy splitting, ES) 프로토콜을 기반으로 하이브리드 근거리장 및 원거리장 SWIPT 네트워크에서 사용자 합 전송률을 최대화하는 알고리즘을 제안한다.

II. 시스템 모델 및 제안 알고리즘

전이중 하이브리드 액세스 포인트 (Full-duplex hybrid access point, HAP)는 송신 안테나 N_T 개와 수신 안테나 N_R 개를 갖는다. 단일 안테나 사용자는 STAR-RIS 의 전송 및 반사 영역에 위치하며 $\epsilon \in \{t, r\}$ 로 구분한다. 각 영역에는 N^ϵ 명의 사용자가 존재하고 K 개 그룹으로 분할되며, ϵ 영역의 p 번째 그룹을 U_p^ϵ 로 표기한다.

그룹 스위칭 방식으로 다운링크 무선 에너지 전송 (Wireless energy transfer, WET)과 업링크 무선 정보 전송 (Wireless information transfer, WIT)을 교대로 운용하며 [2], 이를 위해 전체 시간 T 는 K 개 슬롯으로 균등 분할된다. 각 슬롯에서 그룹 U_p^t, U_p^r 가 WIT 단계를 수행해 업링크로 HAP 에 데이터를 전송하고, 나머지 그룹은 HAP 및 WIT 사용자로부터 WET 단계에서 에너지를 수확한다. 그룹 U_p^ϵ 의 사용자 q 의 위치 벡터는

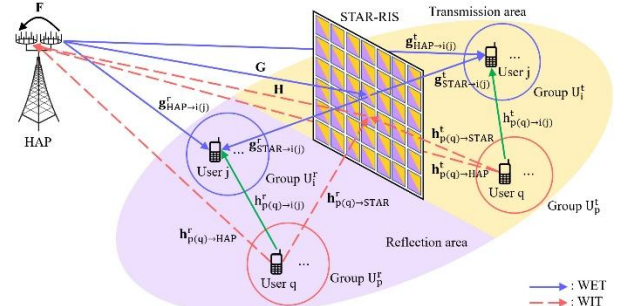


그림 1. STAR-RIS 기반 하이브리드 근거리장 및 원거리장 SWIPT

$\mathbf{u}_{p(q)}^\epsilon = [x_{p(q)}^\epsilon, y_{p(q)}^\epsilon, 0]^T$ 이다. STAR-RIS 의 기준 소자는 (x_f, y_f, z_f) 에 위치하고, m 번째 소자의 위치 벡터는 $\mathbf{p}_m = [x_f, k_y(m)d_R + y_f, k_z(m)d_R + z_f]^T$ 로 주어진다. d_R 은 소자 간격, $k_y(m)$, $k_z(m)$ 는 각각 수평, 수직 인덱스를 의미한다. STAR-RIS 는 M 개의 소자로 구성되고, k 번째 시간 슬롯에서의 진폭은 $\boldsymbol{\beta}^\epsilon[k] = (\beta_1^\epsilon[k], \dots, \beta_M^\epsilon[k])$, 위상 계수는 $\boldsymbol{\theta}^\epsilon[k] = \text{diag}(e^{j\theta_1^\epsilon[k]}, \dots, e^{j\theta_M^\epsilon[k]})$ 로 쓴다. ES 프로토콜에 따라 각 소자의 계수는 $\beta_m^\epsilon[k] \in [0, 1], \beta_m^t[k] + \beta_m^r[k] \leq 1, \mathbf{B}^\epsilon[k] = \text{diag}(\boldsymbol{\beta}^\epsilon[k]), \theta_m^\epsilon[k] \in [0, 2\pi)$ 를 만족한다.

본 논문은 근거리장과 원거리장 채널을 함께 고려하는 하이브리드 채널 모델을 사용한다. STAR-RIS-사용자 및 사용자간 채널은 근거리장 구면파 모델, HAP 이 포함된 채널은 원거리장 모델을 적용한다. 업링크 WIT 단계에서 STAR-RIS-HAP 채널은 \mathbf{H} , 그룹 U_p^ϵ 의 사용자 q 와 STAR-RIS 채널은 $\mathbf{h}_{p(q) \rightarrow \text{STAR}}$, HAP 채널은 $\mathbf{h}_{p(q) \rightarrow \text{HAP}}$, 그룹 U_i^ϵ 의 사용자 j 로의 채널은 $\mathbf{h}_{p(q) \rightarrow i(j)}$ 로 표기한다. 다운링크 WET 단계에서 HAP-STAR-RIS 채널은 \mathbf{G} , 그룹 U_i^ϵ 의 사용자 j 로의 채널은 $\mathbf{g}_{\text{HAP} \rightarrow i(j)}$, STAR-RIS 와 사용자 채널은 $\mathbf{g}_{\text{STAR} \rightarrow i(j)}$ 로 표기한다. STAR-RIS 의 m 번째 소자와 그룹 U_p^ϵ 의 사용자 q 의 근거리장 채널은

$$\frac{\lambda_c}{4\pi \|\mathbf{u}_{p(q)}^\epsilon - \mathbf{p}_m\|_2} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda_c} \|\mathbf{u}_{p(q)}^\epsilon - \mathbf{p}_m\|_2}, \quad (1)$$

이며, WIT 사용자와 WET 사용자의 근거리장 채널은 $(\lambda_c/4\pi\|\mathbf{u}_{p(q)}^\epsilon - \mathbf{u}_{i(j)}^\epsilon\|_2)e^{-j\frac{2\pi}{\lambda_c}\|\mathbf{u}_{p(q)}^\epsilon - \mathbf{u}_{i(j)}^\epsilon\|_2}$ 로 나타낸다.

k 번째 시간 슬롯에서 그룹 U_i^ϵ 의 사용자 j 가 수신한 다운링크 WET 신호는

$$\begin{aligned} y_{i(j)}^\epsilon[k] = & (\mathbf{g}_{HAP \rightarrow i(j)}^\epsilon + \mathbf{g}_{STAR \rightarrow i(j)}^\epsilon \sqrt{\mathbf{B}^\epsilon[k] \boldsymbol{\Theta}^\epsilon[k] \mathbf{G}}) \mathbf{q}[k] s[k] \\ & + \sum_{q \in U_p^\epsilon} (h_{p(q) \rightarrow i(j)}^\epsilon + \mathbf{g}_{STAR \rightarrow i(j)}^\epsilon \sqrt{\mathbf{B}^\epsilon[k] \boldsymbol{\Theta}^\epsilon[k] \mathbf{h}_{p(q) \rightarrow STAR}^\epsilon}) \\ & \sqrt{v_{p(q)}^\epsilon[k]} x_{p(q)}^\epsilon[k] + n_{i(j)}^\epsilon[k], \end{aligned} \quad (2)$$

이며, $\mathbf{q}[k]$ 는 에너지 빔포밍, $s[k]$ 는 HAP의 에너지 신호, $n_{i(j)}^\epsilon[k]$ 는 가우시안 노이즈, $v_{p(q)}^\epsilon[k]$ 와 $x_{p(q)}^\epsilon[k]$ 는 WIT 사용자의 업링크 송신 전력과 신호를 의미한다. 한편 HAP가 수신한 업링크 WIT 신호는

$$\begin{aligned} y_{HAP}^\epsilon[k] = & \sum_{q \in U_p^\epsilon} \mathbf{h}_{p(q)}^\epsilon \sqrt{v_{p(q)}^\epsilon[k]} x_{p(q)}^\epsilon[k] \\ & + (\mathbf{F} + \mathbf{H}^\epsilon \sqrt{\mathbf{B}^\epsilon[k] \boldsymbol{\Theta}^\epsilon[k] \mathbf{G}}) \mathbf{q}[k] s[k] + \mathbf{n}[k], \end{aligned} \quad (3)$$

이며, $\mathbf{h}_{p(q)}^\epsilon$ 는 WIT 사용자의 통합 업링크 채널, \mathbf{F} 는 $\mathbb{E}\{\|\mathbf{F}\|_F^2\} = \alpha$ 를 갖는 HAP의 자기간섭 채널, $\mathbf{n}[k] \sim \mathcal{CN}(0, \delta^2 \mathbf{I}_{N_R})$ 은 가우시안 노이즈를 의미한다. 등화된 신호는 $\hat{y}_{HAP, p(q)}^\epsilon[k] = \mathbf{w}_{p(q)}^\epsilon[k]^H \bar{\mathbf{y}}_{HAP}^\epsilon[k]$ 이며, $\mathbf{w}_{p(q)}^\epsilon[k]$ 는 수신 빔포밍, $\bar{\mathbf{y}}_{HAP}^\epsilon[k]$ 는 자기간섭 제거 이후의 수신 신호이다. WIT 사용자의 전송률은 $R_{p(q)}^\epsilon = t[k] \log_2(1 + \gamma_{p(q)}^\epsilon)$ 이며, $t[k]$ 는 k 번째 시간 슬롯의 길이이다. 또한 신호 대 간섭 및 잡음비 $\gamma_{p(q)}^\epsilon$ 는 다음과 같고,

$$\gamma_{p(q)}^\epsilon = \frac{v_{p(q)}^\epsilon[k] |\mathbf{w}_{p(q)}^\epsilon[k]^H \mathbf{h}_{p(q)}^\epsilon[k]|^2}{\sum_{q' \in U_p^\epsilon \setminus \{q\}} v_{p(q')}^\epsilon[k] |\mathbf{w}_{p(q')}^\epsilon[k]^H \mathbf{h}_{p(q)}^\epsilon[k]|^2 + \alpha \xi \|\mathbf{q}[k]\|^2 + \delta^2}, \quad (4)$$

ξ 는 양자화 오차 계수이다. 수확 에너지는 piecewise linear 모델 $E_{i(j)}^\epsilon[k] = t[k] \min\{\lambda P_{i(j)}^\epsilon[k], P_{sat, i(j)}^\epsilon\}$ 을 적용한다. 이때 λ 는 에너지 변환 효율, $P_{sat, i(j)}^\epsilon$ 는 사용자의 포화 전력, $P_{i(j)}^\epsilon[k]$ 는 WET 사용자가 k 번째 시간 슬롯동안 수신한 전력을 의미한다.

사용자 합 전송률을 최대화하기 위해 수신 빔포밍, 에너지 빔포밍, STAR-RIS 계수를 공동으로 최적화하는 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{w}, \mathbf{q}, \mathbf{B}, \boldsymbol{\Theta}} \quad & \sum_{\epsilon \in \{t, r\}} \sum_{p=1}^K \sum_{q \in U_p^\epsilon} R_{p(q)}^\epsilon \\ \text{s.t.} \quad & R_{p(q)}^\epsilon \geq R_{p(q)}^{\epsilon, \min}, \quad \forall \epsilon, p, q, \\ & \sum_{k \neq p}^K E_{p(q)}^\epsilon[k] \geq E_{\min}, \quad \forall \epsilon, p, q, \\ & \|\mathbf{q}[k]\|^2 \leq P_{\max}, \quad \forall k, \\ & 0 \leq \theta_m^\epsilon[k] < 2\pi, \quad \forall \epsilon, m, k, \\ & \beta_m^t[k] + \beta_m^r[k] \leq 1, \quad \forall m, k, \\ & 0 \leq \beta_m^\epsilon[k] \leq 1, \quad \forall \epsilon, m, k, \\ & \|\mathbf{w}_{p(q)}^\epsilon\|^2 = 1, \quad \forall \epsilon, p, q. \end{aligned} \quad (5)$$

위 문제에서 변수들이 서로 결합되어 비볼록이므로, 교대 최적화를 위해 세 가지 하위 문제로 분해한다. 수신 빔포밍은 WMMSE 방식으로 갱신하고 [3], STAR-RIS 계수에 포함된 rank-one 비볼록 제약은 SDR (Semidefinite relaxation)과 1차 테일러 근사를 통해 완화한다. 이후 에너지 빔포밍은 내부점법으로 해를 도출하며 [4], 각 단계 해를 반복 갱신하여 최적화한다.

III. 수치 결과

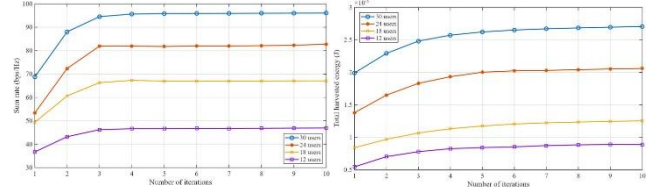


그림 2. 사용자의 합 전송률과 총 수확 에너지

그림 2는 반복 횟수에 따른 제안된 알고리즘의 합 전송률과 총 수확 에너지의 수렴 특성을 나타낸다. 두 그래프 모두 안정적으로 수렴하는 경향을 보이며, 사용자 밀집 환경에서도 안정적인 SWIPT 성능을 달성함을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 STAR-RIS 기반 근거리장 및 원거리장 SWIPT 네트워크에서 합 전송률을 최대화하는 교대 최적화 기반 알고리즘을 제안하였다. 수치 결과를 통해 사용자 밀집 환경에서의 합 전송률 및 에너지 수확 성능과 수렴 특성을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2023-NR077102).

본 연구성과는 과기정통부 • 정보통신기획평가원의 ‘디지털혁신 기술국제공동연구사업’으로 수행한 결과입니다. (No. RS-2025-25464665, 6G 저궤도위성 네트워크 지연 감소를 위한 지능형 전파환경인식 기반 통신 및 엣지컴퓨팅 핵심 기술 개발)

참 고 문 헌

- [1] H. Li, Y. Liu, X. Mu, Y. Chen, and P. Zhiwen, “Joint beamforming for STAR-RIS in near-field communications,” in IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), pp. 625–630, IEEE, 2023.
- [2] H. Xie, B. Gu, D. Li, Z. Lin, and Y. Xu, “Gain without pain: Recycling reflected energy from wireless-powered RIS-aided communications,” IEEE Internet of Things Journal, vol. 10, no. 15, pp. 13264–13280, 2023.
- [3] Q. Shi, M. Razaviyayn, Z. 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, 2011.
- [4] G. Scutari, F. Facchinei, L. Lampariello, and P. Song, “Parallel and distributed methods for nonconvex optimization,” in IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pp. 840–844, IEEE, 2014.