

# 다중 RIS 기반 mmWave 통신 시스템을 위한 전송 기법 설계

오민택, 최진석

전기 및 전자공학부, 한국과학기술원

ohmin@kaist.ac.kr, jinseok@kaist.ac.kr

## Transmission Design for Multi-RIS-Aided mmWave Communication Systems

Mintaek Oh and Jinseok Choi

School of Electrical Engineering, KAIST

### 요약

본 논문에서는 다중 RIS (reconfigurable intelligent surfaces)들이 지원하는 무선 통신 시스템을 위한 새로운 전송 설계 프레임워크를 제안한다. 제안된 기법은 주파수 효율의 합을 최대화하기 위해 프리코딩과 RIS 위상 시프트의 공동 최적화 문제를 교차 알고리즘 방식으로 해결한다. 우리는 시뮬레이션을 통해 기존 기법들과 성능을 비교함으로써 제안된 기법의 우수성을 입증한다.

### I. 서론

무선 통신 시스템의 성능을 향상시키기 위한 유망한 기술로 RIS (reconfigurable intelligent surfaces)가 주목받고 있다. RIS는 다수의 패시브 소자의 반사 위상 시프트를 동적으로 조정하여 무선 채널 환경을 최적화할 수 있다. 특히 mmWave 통신에서는 신호가 좁은 빔폭으로 인해 작은 장애물에도 쉽게 차단되는 문제가 있는데, RIS를 배치하여 해당 시스템의 스펙트럼 효율과 커버리지를 향상시킬 수 있다. 그러나 대부분의 연구는 단일 RIS를 사용하여 무선 링크 성능을 개선하는데 초점을 맞추고 있어, 무선 네트워크의 링크 용량을 최대한 활용하지 못하는 한계가 있다. 다중 RIS를 활용하여 무선 링크를 지원할 경우 패시브 빔포밍을 정교하게 최적화하여, 시스템 성능을 더욱 향상시킬 수 있다. 최근 들어 다중 RIS 지원 전송 설계에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있지만, 여전히 해결해야 할 과제가 남아있다.

본 논문에서는 다중 RIS 지원 통신 시스템에서 프리코딩과 RIS 위상 시프트를 공동으로 최적화하여 주파수 효율의 합을 극대화하는 새로운 전송 설계 프레임워크를 제안한다. 제안된 기법은 교차 알고리즘(Alternating algorithm) 방식을 통해 복잡도를 낮추면서도 최적 성능에 근접하는 솔루션을 얻을 수 있다.

### II. 본론

본 논문에서는  $N$ 개의 안테나를 가진 기지국과  $L$ 개의 RIS를 통해  $K$ 명의 단일 안테나 사용자에게 서비스를 제

공하는 다운링크 통신 시스템을 고려한다. 각 RIS는  $M$ 개의 반사 소자를 가지며, 기지국은 RIS 컨트롤러에 최적의 위상 시프트 정보를 피드백한다. 고려된 시스템에서 사용자와 기지국 간 직접 경로 링크가 차단된 상황과 RIS에 대한 이중 반사링크가 없음을 가정한다. 기지국에서는 균일 선형 구조 안테나를 RIS에서는 균일 평면 구조의 반사 소자 배열을 사용한다. mmWave 채널 환경을 모델링하기 위해 Saleh-Valenzuela (SV) 채널 모델을 적용하였다. 전체 통신 링크에 대한 종단간 채널은  $\ell$ 번째 RIS에 대한 기지국-RIS 행렬  $\mathbf{H}_{1,\ell}$ ,  $k$ 번째 RIS-사용자 채널 벡터  $\mathbf{h}_{2,k,\ell}$ 로 표현된다.  $\ell$ 번째 RIS 위상 시프트 행렬  $\Phi_\ell$ 을 이용하여 실질적인  $k$ 번째 사용자 채널은 다음과 같이 정의된다:

$$\mathbf{h}_k = \sum_{\ell=1}^L \mathbf{H}_{1,\ell} \Phi_\ell \mathbf{h}_{2,k,\ell}$$

고려된 시스템에서 프리코딩을 포함한 전송 신호는  $\mathbf{x} = \mathbf{F}\mathbf{s}$ 이며, 여기서  $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_K] \in \mathbb{C}^{N \times K}$ 는 프리코딩 행렬,  $\mathbf{s} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}_{N \times 1}, \mathbf{P}\mathbf{I}_N)$ 는 유저 심볼 벡터이며,  $\mathbf{P}$ 는 최대 전송 전력이다. 이를 토대로  $k$ 번째 유저의 SINR은 다음과 같고 주파수 효율은 다음과 같다:

$$\gamma_k = \frac{|\sum_{\ell=1}^L \mathbf{H}_{1,\ell} \Phi_\ell \mathbf{h}_{2,k,\ell}|^H \mathbf{f}_k|^2}{\sum_{i=1, i \neq k}^K |\sum_{\ell=1}^L \mathbf{H}_{1,\ell} \Phi_\ell \mathbf{h}_{2,k,\ell}|^H \mathbf{f}_i|^2 + \frac{\sigma^2}{P}}, R_k = \log_2(1 + \gamma_k).$$

이를 기반으로 다중 RIS 기반 주파수 효율 합 최대화 문제를 다음과 같이 표현한다.

$$\text{maximize}_{\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_K, \Phi} \sum_{k=1}^K R_k(\mathbf{f}_k, \Phi)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^K \|\mathbf{f}_k\|_2^2 \leq 1, |\phi_{\ell,m}|, \ell = 1, \dots, L, m = 1, \dots, M.$$

### 알고리즘 1: Alternating 알고리즘

1. Initialize  $\bar{\mathbf{f}}^{(0)}, \bar{\boldsymbol{\phi}}^{(0)}$
2. Update  $\bar{\mathbf{f}}^{(t+1)}$  using GPIP Algorithm for given  $\bar{\boldsymbol{\phi}}^{(t)}$
3. Update  $\bar{\boldsymbol{\phi}}^{(t+1)}$  using MM Algorithm for given  $\bar{\mathbf{f}}^{(t+1)}$
4. Repeat 2-3 until  $\frac{|f(\bar{\mathbf{f}}^{(t+1)}, \bar{\boldsymbol{\phi}}^{(t+1)}) - f(\bar{\mathbf{f}}^{(t)}, \bar{\boldsymbol{\phi}}^{(t)})|}{f(\bar{\mathbf{f}}^{(t)}, \bar{\boldsymbol{\phi}}^{(t)})} < \epsilon$

여기서  $\boldsymbol{\Phi} = [\boldsymbol{\Phi}_1, \boldsymbol{\Phi}_2, \dots, \boldsymbol{\Phi}_L] \in \mathbb{C}^{M \times LM}$  이며, 첫 번째 제약 조건은 최대 전송 전력을 의미하며, 두 번째 제약 조건은 RIS 위상 시프트의 유닛 계수를 의미한다. 위에서 정의된 최적화 문제는 non-convex 하며, 제약 조건이 다루기 어려운 형태로 얽혀져 있어 풀기 힘들다. 이는 두 단계로 문제를 분해한 뒤 번갈아 최적화하는 방법인 교차 알고리즘을 사용한다.

#### 1) 프리코더 $\mathbf{F}$ 최적화

정의된 최적화 문제에서  $\boldsymbol{\Phi}$ 를 고정한 뒤, 프리코더 행렬을  $\text{vec}(\mathbf{F}) = \bar{\mathbf{f}}$  로 표현하여 GPI (generalized power iteration) 형태로 나타낼 수 있다:

$$\underset{\bar{\mathbf{f}}_1, \bar{\mathbf{f}}_2, \dots, \bar{\mathbf{f}}_K}{\text{maximize}} \sum_{k=1}^K \log_2 \left( \frac{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{A}_k \bar{\mathbf{f}}}{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{B}_k \bar{\mathbf{f}}} \right)$$

위의 수식의 자세한 방식은 [1]에 정리되어 있다. 프리코더를 최적화할 때 GPI 기법을 이용하면 non-convex한 목적함수의 최고의 국부 최적해는 파워 반복 기법을 통해 찾을 수 있다. 이후 해당 프리코딩 최적화 알고리즘을 GPIP로 나타내어 사용한다.

#### 2) RIS 위상 시프트 $\boldsymbol{\Phi}$ 최적화

이번 단계에서는 GPIP를 통해 얻어진 프리코더를 고정한 뒤, majorization-minimization (MM) 알고리즘을 통해 RIS 위상 시프트를 최적화해 나간다. 우선 모든 RIS 요소들을 쌓아 벡터화 시킨 뒤  $\text{vec}(\boldsymbol{\Phi}) = \bar{\boldsymbol{\phi}}$ , 기존 문제를 MM 알고리즘에 적용하기 적합한 형태로 나타낸다.

$$\underset{\bar{\boldsymbol{\phi}}}{\text{maximize}} \text{Re}\{\bar{\boldsymbol{\phi}}^H \mathbf{q}^{(t)}\}$$

$$\text{s.t. } |\phi_{\ell, m}|, \ell = 1, \dots, L, m = 1, \dots, M.$$

새롭게 정의된 문제의 자세한 방식은 [2]에 정리되어 있다. 위의 최적화 문제의 해는 다음과 같은 업데이트 과정으로 얻어진다:  $\bar{\boldsymbol{\phi}}^{(t+1)} = e^{j \arg(\mathbf{q}^{(t)})}$ .

#### 3) Alternating 알고리즘

1)과 2)에서 제안된 최적화 기법을 이용하여, 알고리즘 1에서 alternating 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 GPIP 알고리즘과 MM 알고리즘을 수렴할 때까지 반복적으로 작동시킨다. 목적 함수를  $f(\cdot)$ 으로 표현한 뒤,

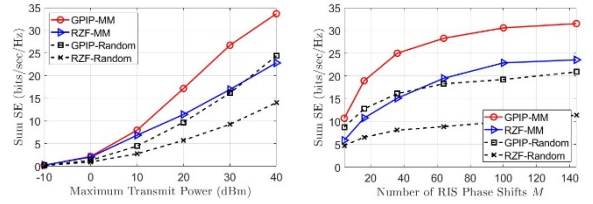


그림 1. 전송 전력 대 주파수 효율 합 (왼쪽), RIS 반사 소자 개수 대 주파수 효율 합 (오른쪽) 이전 단계와 업데이트 단계의 차이를 이용하여 수렴 여부를 파악한다.

#### 4) 시뮬레이션 결과

우리는  $N = 6, K = 4, L = 2$ 인 상황에서 28GHz 중심 주파수 및 1GHz의 대역폭을 가진 시스템을 고려한다.

그림 1은  $M = 50$ 을 기반으로 주파수 효율 합과 전송 전력에 대한 그래프를 보여준다. 전송 전력 이 증가함에 따라 제안된 알고리즘과 기존 기법들 간에 성능 차이가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 1에서는  $P = 30$  dBm을 기반으로 주파수 효율합과 RIS 반사 소자 개수의 대한 결과를 보여준다. 해당 그래프에서 제안된 알고리즘이  $M$ 에 대해 높은 주파수 효율 성능을 보이는 것이 확인된다. 모든 기법들은  $M$ 이 커짐에 따라 성능이 수렴하는 것이 관측된다.

#### III. 결론

본 논문에서는 다중 RIS가 지원하는 통신 시스템에서 주파수 효율 합을 최대화하기 위한 전송 기법을 설계하였다. 제안된 기법은 GPI 기반 프리코딩과 MM 기반 위상 시프트 최적화 알고리즘을 교차 적용하는 방식을 사용하였다. 시뮬레이션 결과 제안된 기법은 모든 전송 전력 및 RIS 반사 소자 개수에 대해 기존 대비 뛰어난 성능을 달성함을 확인하였다. 이는 향후 RIS 기반 무선 통신 시스템에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRIT-CT-22-040, 이종 위성군 우주 감시정찰 기술 특화연구센터).

#### 참고 문헌

- [1] J. Choi, et al. "Joint user selection, power allocation, and precoding design with imperfect CSIT for multi-cell MU-MIMO downlink systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 1, pp. 162-176, 2019.
- [2] C. Pan, et al. "Multicell MIMO communications relaying on intelligent reflecting surfaces," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 8, pp. 5218-5233, 2020.