RIS MIMO 시스템에서 Beam Training 오버헤드 감소를 위한 2차원 Atomic Norm 기반 채널 추정 알고리즘

정현진, 김선우
한양대학교 전자컴퓨터통신공학과
{hyeonjingo, remero}@hanyang.ac.kr

2D Atomic Norm-based Channel Estimation for Beam Training Overhead Reduction in RIS-aided MIMO Systems

Hyeonjin Chung and Sunwoo Kim
Department of Electronic Engineering, Hanyang University

요 약

본 논문에서는 RIS (reconfigurable intelligent surface) MIMO (multiple-input-multiple-output) 시스템에서의 채널을 보다 적은 beam search로 정확하게 추정할 수 있는 알고리즘을 제안한다. BS (base station)과 RIS의 위치를 활용하여 BS에서 RIS 방향으로 빔을 형성함으로써 beam training을 간소화시킨다. 이후 간소화된 beam training 과정에서 수신한 파일럿 신호를 하나의 행렬로 종합하고, 2D atomic norm을 이용해 앞서 종합된 행렬로부터 채널을 추정한다. 시뮬레이션을 통해 동일한 회수의 beam search 수행 시 제안 알고리즘이 타 알고리즘보다 높은 채널 추정 정확도를 가지는 것을 확인하였다.

Ⅰ. 서 론

최근 B5G 및 6G 이동통신을 위한 RIS (reconfigurable intelligent surface) 관련 연구가 활발히 진행되고 있으며, RIS 사용 시 BS (base station)와 UE (user equipment) 사이의 신호 경로를 다양화 시킬 수 있어 밀리미터파 통신 분야에서 특히 주목받고 있다 [1]. 하지만 RIS 사용 시 채널 추정을 위한 beam training 오버헤드가 과도하게 길어지는 문제점이 있다. 본 논문에서는 고정된 BS와 RIS의 위치를 활용해 BS에서의 beam search를 줄여 beam training을 간소화한다. 이후 beam training 동안 수신한 파일럿 신호로부터 채널을 추정하는 2D atomic norm 기반 채널 추정 알고리즘을 제안하고 타 알고리즘과 성능을 비교한다.

Ⅱ. RIS MIMO 채널 모델

본 논문에서 BS, RIS, UE는 각각 M_{B}, M_{R}, M_{U} 개의 안테나로 이루어진 반파장 등간격 선형 배열을 사용한다. BS과 UE 사이의 신호 경로가 막혀있다고 가정할 때, RIS MIMO (multiple-input-multiple-output) 시스템에서의 채널은 BS-to-RIS 채널, RIS-to-UE 채널로 구성된다. BS-to-RIS 채널 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{BR}}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\boldsymbol{H}_{\mathrm{BR}} &= \sum_{l=1}^{L_{\mathrm{BR}}} \alpha_{\mathrm{BR}}^{l} \boldsymbol{a}(\phi_{\mathrm{BR}}^{l}) \boldsymbol{a}(\theta_{\mathrm{BR}}^{l})^{H} \\ &= \boldsymbol{A}(\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{BR}}) \mathrm{diag}(\boldsymbol{\rho}_{\mathrm{BR}}) \boldsymbol{A}(\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{BR}}) \in C^{M_{\mathrm{R}} \times M_{\mathrm{B}}},\end{aligned} \tag{1}$$

여기서 L_{BR} 은 BS와 RIS 간 신호 경로 수를 의미하며 $\boldsymbol{a}(\theta)$ 는 θ 로의 조향벡터를 의미한다. α_{BR}^{l}, ϕ_{BR}^{l}, θ_{BR}^{l} 는 각각 l 번째 경로의 채널 이득, BS-to-RIS 도래각, BS-to-RIS 발사각을 의미한다. 본 논문에서는 BS와 RIS 사이 항상 LoS (line-of-sight) 경로만 존재한다고 가정한다.

RIS-to-UE 채널 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{BR}}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\boldsymbol{H}_{\mathrm{RU}} &= \sum_{l=1}^{L_{\mathrm{RU}}} \alpha_{\mathrm{RU}}^{l} \boldsymbol{a}(\phi_{\mathrm{RU}}^{l}) \boldsymbol{a}(\theta_{\mathrm{RU}}^{l})^{H} \\ &= \boldsymbol{A}(\boldsymbol{\phi}_{\mathrm{RU}}) \mathrm{diag}(\boldsymbol{\rho}_{\mathrm{RU}}) \boldsymbol{A}(\boldsymbol{\theta}_{\mathrm{RU}}) \in C^{M_{\mathrm{U}} \times M_{\mathrm{R}}},\end{aligned} \tag{2}$$

여기서 L_{RU} 은 RIS와 UE 간 신호 경로 수를 의미한다. α_{RU}^{l}, ϕ_{RU}^{l}, θ_{RU}^{l} 는 각각 l 번째 경로의 채널 이득, RIS-to-UE 도래각, RIS-to-UE 발사각을 의미한다.

RIS 제어 행렬 $\boldsymbol{\Omega}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{\Omega} = \mathrm{diag}(\boldsymbol{\omega}),\ \boldsymbol{\omega} = [e^{j\vartheta_1}, e^{j\vartheta_2}, \ldots, e^{j\vartheta_{M_{\mathrm{R}}}}]^{T} \in C^{M_{\mathrm{R}} \times 1}, \tag{3}$$

여기서 $\mathrm{diag}(\bullet)$ 는 해당 벡터의 원소들을 대각 성분으로 하는 대각행렬을 의미한다. ϑ_m 은 m 번째 RIS 안테나의 위상 천이를 의미하며 $\vartheta_m \sim [0, 2\pi)$ 이다. 종합적으로 RIS MIMO 시스템에서의 채널 $\boldsymbol{H}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{H}_{\mathrm{RU}} \boldsymbol{\Omega} \boldsymbol{H}_{\mathrm{BR}} \in C^{M_{\mathrm{U}} \times M_{\mathrm{B}}}. \tag{4}$$

Ⅲ. Beam Training 오버헤드 감소를 위한 2차원 Atomic Norm 기반 RIS MIMO 채널 추정 알고리즘

RIS MIMO 시스템에서 채널 추정 시 BS, RIS, UE에서 진행되는 beam search로 인해 beam training 오버헤드가 과도하게 길어지는 문제점이 있다 [1]. 본 논문에서는 고정된 BS와 RIS의 위치가 사전에 주어진다고 가정하여 그림 1과 같이 BS에서의 beam search를 간소화함으로써 beam training 오버헤드를 줄이고자한다.

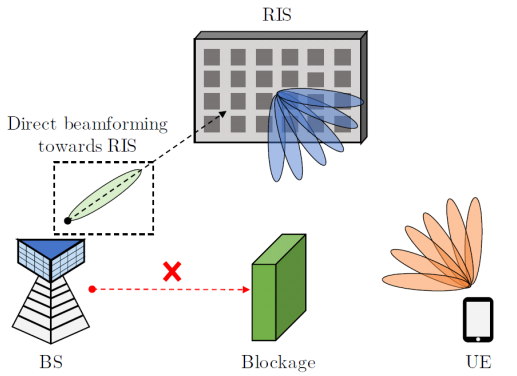

그림 1. BS와 RIS의 위치 정보 활용 시 간소화 된 beam training 모식도

Beam training 시 frame마다 RIS 제어 행렬이 바뀌며 각 frame마다 UE가 전방향으로 beam search를 진행한다. 이 때, BS의 송신 빔은 RIS 방향으로 고정되어 precoding vector $\boldsymbol{f}$ 는 $\boldsymbol{a}(\theta_{\mathrm{BR}}^{1})/\sqrt{M_{\mathrm{B}}}$ 와 같다. 총 M_{R} 개의 frame에서 수신한 파일럿 신호를 종합한 결과인 $\boldsymbol{X}$ 는 다음과 같다.

$$\boldsymbol{X} = P_{\mathrm{Tx}} (\boldsymbol{f}^{T} \otimes \boldsymbol{C}^{H}) (\boldsymbol{H}_{\mathrm{BR}}^{T} \diamond \boldsymbol{H}_{\mathrm{RU}}) \boldsymbol{W} + \boldsymbol{N} \in C^{M_{\mathrm{U}} \times M_{\mathrm{R}}}, \tag{5}$$

여기서 $\otimes$ 와 $\diamond$ 는 각각 Kronecker 곱과 Khatri-Rao 곱을 의미한다. P_{Tx} 는 파일럿 신호가 기지국으로부터 송신되는 세기이다. $\boldsymbol{C}$ 는 크기 $M_{\mathrm{U}} \times M_{\mathrm{U}}$의 full-rank combining matrix이며, $\boldsymbol{W}$ 는 RIS 제어 행렬의 대각 성분으로 구성된 벡터로 만든 크기 $M_{\mathrm{R}} \times M_{\mathrm{R}}$의 full-rank matrix이다. $\boldsymbol{N}$ 는 노이즈를 의미한다. 수식 (8)에서의 $\boldsymbol{H}_{\mathrm{BR}}^{T} \diamond \boldsymbol{H}_{\mathrm{RU}}$ 은 BS-to-RIS 채널, RIS-to-UE 채널 정보를 모두 내포하고 있으며, 이를 effective 채널이라고 칭한다.

Beam training 이후 $\boldsymbol{W}$ 의 역행렬을 다음과 같이 $\boldsymbol{X}$ 에 곱한다.

$$\boldsymbol{G} = \boldsymbol{X}\boldsymbol{W}^{-1} = (\boldsymbol{f}^{T} \otimes \boldsymbol{C}^{H})\boldsymbol{Z} + \boldsymbol{E} \in C^{M_{\mathrm{U}} \times M_{\mathrm{R}}}, \tag{6}$$

여기서 $\boldsymbol{Z} = P_{\mathrm{Tx}}(\boldsymbol{H}_{\mathrm{BR}}^{T} \diamond \boldsymbol{H}_{\mathrm{RU}}^{H})$ 이며, $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{N}\boldsymbol{W}^{-1}$ 이다. 2D atomic norm 사용 시 $\boldsymbol{G}$ 로부터 $\boldsymbol{Z}$ 를 추정할 수 있으며, 이 때 $\boldsymbol{Z}$ 의 atomic set $\mathring{\mathrm{A}}_{\mathrm{2D}}$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다 [2].

$$\mathring{\mathrm{A}}_{\mathrm{2D}} = \Big\{ \big(\boldsymbol{a}_1(\theta_1)^{*} \otimes \boldsymbol{a}_2(\theta_2)\big)\boldsymbol{b}^{T} \in C^{M_{\mathrm{B}}M_{\mathrm{U}} \times M_{\mathrm{R}}} : \boldsymbol{b} \in C^{M_{\mathrm{R}} \times 1},\ \|\boldsymbol{b}\|_2 = 1,\ 0^{\circ} < \theta_1, \theta_2 \le 180^{\circ} \Big\} \tag{7}$$

여기서 $\big(\boldsymbol{a}_1(\theta_1)^{*} \otimes \boldsymbol{a}_2(\theta_2)\big)\boldsymbol{b}^{T}$ 는 $\boldsymbol{Z}$ 의 atom이다. 수식 (7)에서 정의된 atomic set으로 도출한 2D atomic norm을 이용하여 $\boldsymbol{Z}$ 를 추정하는 수식은 다음과 같은 SDP (semidefinite programming)으로 나타낼 수 있다 [2].

$$\begin{aligned} &\{\hat{\boldsymbol{T}}_{\mathrm{2D}}, \hat{\boldsymbol{P}}, \hat{\boldsymbol{Z}}\} = \\ &\underset{\boldsymbol{T}_{\mathrm{2D}}, \boldsymbol{P}, \overline{\boldsymbol{Z}}}{\operatorname{argmin}} \frac{\tau \mathrm{Tr}(\boldsymbol{T}_{\mathrm{2D}})}{2M_{\mathrm{B}}M_{\mathrm{U}}} + \frac{\tau \mathrm{Tr}(\boldsymbol{P})}{2} + \frac{\|\boldsymbol{G} - \boldsymbol{Q}\overline{\boldsymbol{Z}}\|_{\mathrm{F}}^{2}}{2} \\ &s.t. \begin{bmatrix} \boldsymbol{T}_{\mathrm{2D}} & \overline{\boldsymbol{Z}} \\ \overline{\boldsymbol{Z}}^{H} & \boldsymbol{P} \end{bmatrix} \ge 0, \end{aligned} \tag{8}$$

여기서 $\boldsymbol{T}_{\mathrm{2D}}$ 는 2D Toeplitz 행렬을 의미하며 τ 는 노이즈에 대응하기 위한 regularization parameter이다. Effective 채널은 $\hat{\boldsymbol{Z}}/P_{\mathrm{Tx}}$ 로서 근사할 수 있다.

Ⅳ. 시뮬레이션 환경 및 결과

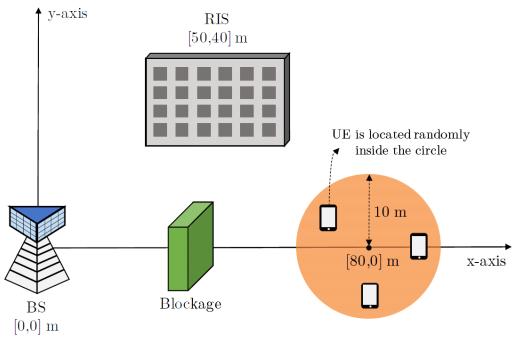

그림 2. 시뮬레이션 시 BS, RIS, UE의 배치도

제안 알고리즘의 성능 분석을 위해 effective 채널 추정 NMSE (normalized mean square error)을 도출하여 위치 정보를 사용하지 않는 채널 추정 알고리즘 [1], [3]와 비교한다. 동일한 조건에서의 성능 비교를 위해 모든 알고리즘의 총 beam search 수는 32로 고정하였다. 그림 2와 같이 BS는 [0,0] m, RIS는 [50 40]m 에 배치하며, UE는 [80,0]m를 중심으로 반경 10 m 안에 무작위로 배치한다. BS-to-RIS 채널은 경로 손실 계수가 2.1 인 LoS 채널로서 모델링하며, RIS-to-UE 채널은 [4]의 28 GHz 채널모델로서 모델링한다. 이외 시뮬레이션 환경 파라미터는 표 1과 같다.

그림 3은 BS 신호 송신 세기에 따른 effective 채널 추정 NMSE 결과를 나타낸다. 그림 3을 통해 동일한 회수의 beam search를 수행하였을 때 제안 알고리즘이 기존 알고리즘보다 뛰어난 성능을 보이는

표 1. 시뮬레이션 환경 파라미터

파라미터	값	파라미터	값
$M_{\mathrm{B}}, M_{\mathrm{R}}, M_{\mathrm{U}}$	4, 16 ,4	$\boldsymbol{C}, \boldsymbol{W}$	DFT 행렬
노이즈 세기	-100 dBm	Monte Carlo 반복 회수	300

것을 확인할 수 있다. 제안 알고리즘의 경우 타 알고리즘과 동일한 회수의 beam search 수행 시 위치정보를 통해 BS의 beam search를 줄인만큼 RIS, UE에서의 beam search를 더 늘릴 수 있어 타 알고리즘 대비 높은 채널 추정 정확도를 달성할 수 있다. 또한 [1]의 경우 grid-mismatch로 인해 채널 추정 정확도가 제한되는 문제가 있는데, atomic norm 사용 시 이를 해결할 수 있어 더 높은 채널 추정 정확도를 기대할 수 있다.

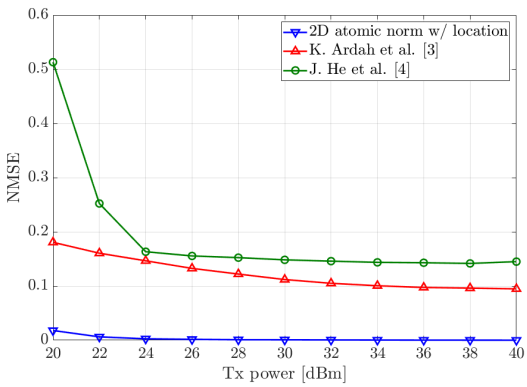

그림 3. BS 신호 송신 세기에 따른 effective 채널 추정 NMSE 결과

Ⅴ. 결론

본 논문에서는 위치정보를 통해 보다 적은 beam search를 사용하여 RIS MIMO 채널을 추정하는 2D atomic norm 기반 알고리즘을 제안한다. 고정된 BS와 RIS의 위치정보가 주어졌을 때 BS에서 RIS 방향으로 빔을 형성함으로써 beam training 시 소요되는 beam search를 줄일 수 있으며, 2D atomic norm을 사용하여 beam training 과정에서 수신한 파일럿 신호로부터 effective 채널을 추정한다. 시뮬레이션을 통해 제안 알고리즘이 위치 정보를 사용하지 않는 기존 채널 추정 알고리즘 대비 낮은 채널 추정 NMSE를 달성함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2021-2017-0-01637)

참 고 문 헌

[1] K. Ardah, et al., "TRICE: A channel estimation framework for RIS-aided millimeter-wave MIMO systems," *IEEE Signal Process. Lett.*, pp. 1 - 1, Feb. 2021.

[2] Z. Yang, L. Xie, and P. Stoica, "Vandermonde decomposition of mul-tilevel Toeplitz matrices with application to multi dimensional super-resolution," *IEEE Trans. Inf Theory*, vol. 62, pp. 3685 - 3701, Apr. 2016.

[3] J. He, H. Wymeersch, and M. Juntti, "Channel estimation for RIS-aided mmWave MIMO systems via atomic norm minimization," *Arxiv*, Jan. 2021.

[4] M. K. Samimi and T. S. Rappaport, "3-D millimeter-wave statistical channel model for 5G wireless system design," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 64, pp. 2207 - 2225, Jun. 2016.