

소수의 능동 소자를 포함한 재구성 가능한 지능형 표면을 위한 채널 추정

이교승, 이형택, 최준일*
한국과학기술원

{iee4432, hlee8459, *junil}@kaist.ac.kr

요 약

본 논문은 재구성 가능한 지능형 표면(reconfigurable intelligent surface, RIS)의 도움을 받는 다중 유저 다중 입력 단일 출력 통신 시스템에서의 채널 추정 기법을 제안한다. RIS 에 소수의 능동 소자를 배치함으로써, RIS 는 학습 신호를 수신하고 처리할 수 있다. 능동 소자로부터 얻어진 부분 채널 상태 정보(channel state information, CSI)를 통해, 전체 채널을 추정하기 위한 전체 학습 오버헤드를 크게 줄일 수 있다. 채널 추정 복잡도를 최소화하기 위해, 제안 기법은 선형 행렬 연산만을 필요로 하는 부분 CSI의 선형 결합을 기반으로 한다. RIS 소자들 사이의 상관관계를 이용하여 선형 결합을 위한 적절한 가중치와 정규화 연산자가 개발되었다. 시뮬레이션 결과는 능동 소자의 개수가 적을 때 제안 기법이 정규화된 평균 제곱 오차 관점에서 다른 기법보다 성능이 좋음을 보여주며, 능동 소자의 개수는 낮은 비용과 전력 소비를 유지하기 위해 적은 수가 사용되어야 한다.

I. 서 론

재구성 가능한 지능형 표면(reconfigurable intelligent surface, RIS)은 높은 에너지 효율을 달성하고 미래 무선 통신 시스템의 하드웨어 비용 문제를 해결할 수 있는 신기술로 고려되고 있다. RIS 와 관련된 채널을 추정하기 위한 실용적인 접근법 중 하나는 radio frequency(RF) 체인을 통해 훈련 신호를 독립적으로 수신하고 처리할 수 있는 소수의 능동소자를 RIS 에 배치시키는 방법이다.

본 논문에서는 RIS 의 도움을 받는 다중 사용자 다중 입력 단일 출력(multi-user multiple-input single-output, MU-MISO) 시스템에 대한 새로운 채널 추정 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 능동 소자로부터 얻은 부분 채널 상태 정보(channel state information, CSI)를 선형 결합하여 전체 채널을 추정한다. RIS 소자 사이의 상관관계를 이용하여 선형 결합을 위한 적절한 가중치가 개발되었다. 또한, 선형 결합된 채널의 노름 값을 실제 채널의 노름에 가깝게 만들기 위해 정규화 계수가 도입되었다.

II. 시스템 모델

시간 분할 이중화(time division duplexing, TDD)에서 RIS 의 도움을 받는 MU-MISO 시스템을 본 논문에서 고려한다. 기지국(base station, BS)에서는 N 개의 안테나를 운용하며 단일 안테나를 가진 M 명의 유저(user equipment, UE)를 서비스한다. RIS 는 L_h 개의 수평방향의 소자와 L_v 개의 수직방향의 소자를 갖는 균일한 평면 배열(uniform planar array, UPA) 구조를 가진다고 가정하며, $L = L_h L_v$ 는 RIS 의 전체 소자 개수를 나타낸다. 각 RIS 소자의 면적은 $A = d_h d_v$ 로 표현되며, d_h 는 수평 폭, d_v 는 수직 높이이다. 총 L 개의 RIS 소자 중에서, L_{act} 개의 능동 소자는 각 RF 체인에서 신호를 수신 또는 반사하는 모드로 동작할 수 있다. RIS 는 BS 가 원하는 방향으로 신호 반사를 위해 RIS 요소를 제어할 수 있는 컨트롤러를 통해 BS 에 연결되어 있다.

상향 링크 전송에서, BS 에서 수신된 신호는 아래와 같이 주어진다.

$$\mathbf{y} = \sum_{m=1}^M (\mathbf{h}_{d,m} + \mathbf{H}_{RB} \mathbf{\Theta} \mathbf{h}_{UR,m}) s_m + \mathbf{n}_{BS}, \quad (1)$$

여기서 s_m 은 m 번째 UE 로부터의 송신 신호이며, $\mathbf{n}_{BS} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_{BS}^2 \mathbf{I}_N)$ 는 기지국에서의 잡음 벡터이다. m 번째

UE 로부터 BS 로 가는 직접 링크 채널은 $\mathbf{h}_{d,m} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$, 상향링크 RIS-BS 채널은 $\mathbf{H}_{RB} \in \mathbb{C}^{N \times L}$, m 번째 UE 와 RIS 사이의 채널은 $\mathbf{h}_{UR,m} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 로 표현된다. RIS 의 $L \times L$ 반사 계수 행렬은 $\mathbf{\Theta} = \text{diag}([e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_L}])^T$ 로 정의된다.

직접 링크 채널의 추정은 기존의 MU-MISO 채널 추정 문제로 볼 수 있기 때문에, RIS 와 관련된 채널 추정 문제에 초점을 맞춘다. RIS-BS 링크와 UE-RIS 링크에 대해서 상관관계가 존재하는 레일리(Rayleigh) 채널 모델을 채택하였다 [1]. RIS 는 등방성 산란 환경에 배치되어 있는 것으로 가정한다. RIS 는 일반적으로 동일한 RIS 상관 관계를 경험할 수 있는 밀접한 위치에 있는 사용자 집합을 지원한다. 하지만, UE 들은 기하학적으로 몇 파장만큼 분리되어 있을 것이기 때문에, 각 UE 와 RIS 사이의 채널은 선형 독립이라고 가정될 수 있다 [2]. 따라서, m 번째 UE 와 RIS 사이의 채널 $\mathbf{h}_{UR,m}$ 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{h}_{UR,m} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, A\mu_{UR}\mathbf{R}), m = 1, \dots, M, \quad (2)$$

여기서 $A\mu_{UR}\mathbf{R}$ 은 평균 신호 감쇠로 모델링 될 수 있는 UE-RIS 링크의 대규모 페이딩 계수 μ_{UR} 을 갖는 $L \times L$ 공분산 행렬이다. BS 안테나가 잘 분리되어 있다면, RIS-BS 채널 \mathbf{H}_{RB} 의 각 행은 (2)와 유사하게 정의될 수 있다. RIS 소자 사이의 상관 관계는 정규화된 공간 상관 행렬 \mathbf{R} 로 표현되며, 등방성 산란 환경에서 \mathbf{R} 의 (a, b) 번째 요소는 아래와 같이 표현된다 [1].

$$[\mathbf{R}]_{a,b} = \text{sinc}\left(\frac{2\|\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_b\|}{\lambda}\right), a, b = 1, \dots, L, \quad (3)$$

여기서 $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$ 는 sinc 함수, λ 는 파장, $\mathbf{u}_a = [0, i(a)d_h, j(a)d_v]^T$ 는 a 번째 소자의 위치벡터에 해당하고, $i(a) = \text{mod}(a-1, L_h)$, $j(a) = \lfloor (a-1)/L_h \rfloor$ 이다.

III. 제안하는 채널 추정 기법

본 논문에서는 UE-RIS 채널 추정에 대해 설명하고, RIS-BS 채널은 같은 방법으로 추정될 수 있다.

전체 UE-RIS 부 채널을 $\mathbf{H}_{UR,act} = [\mathbf{h}_{UR,1}, \dots, \mathbf{h}_{UR,M}] \in \mathbb{C}^{L_{act} \times M}$ 로 정의한다. 여기서 $\mathbf{h}_{UR,m}$ 은 $\mathbf{h}_{UR,m}$ 에서 능동 소자에 인덱스에 해당하는 요소들을 모아 놓은 채널이다. 또한, $\tilde{\mathbf{H}}_{UR,act}$ 을 $\mathbf{H}_{UR,act}$ 의 추정된 채널로 정의한다. $\tilde{\mathbf{H}}_{UR,act}$ 는 최소 제곱법과 같은 기법을 이용하여 추정될 수 있다.

제안하는 기법은 $\mathbf{H}_{UR,act}$ 의 완전 랭크 특성을 이용하기 때문에, $\mathbf{H}_{UR,act}$ 의 랭크를 분석해야 한다. 수치 결과와 수학적 분석을 통해, L_{act} 가 L 에 비해 충분히 작을 때

능동 소자의 배치와 관계없이 $\mathbf{H}_{\text{UR,act}}$ 은 완전 랭크 행렬이 됨을 보일 수 있다. 일반적으로 능동 소자는 RIS 에서 추가 전력 소비를 최소화하기 위해 적은 수가 사용되어야 하기 때문에, $\mathbf{H}_{\text{UR,act}}$ 가 완전 랭크 행렬임을 가정하는 것은 타당하다.

제안하는 기법은 $L_{\text{act}} \geq M$ 를 가정하는데, 이는 BS 가 각 coherence block 에서 L_{act} 이하의 UE 를 서비스하는 경우 쉽게 만족될 수 있다. 그러면, $\mathbf{H}_{\text{UR,act}}$ 는 완전 열 랭크 행렬이라고 가정할 수 있다. 이는 $\mathbf{H}_{\text{UR,act}}$ 의 M 개의 행이 전체 UE-RIS 채널 $\mathbf{H}_{\text{UR}} = [\mathbf{h}_{\text{UR},1}, \dots, \mathbf{h}_{\text{UR},M}]$ 의 행 기저를 이루며, \mathbf{H}_{UR} 에서 수동 소자의 인덱스에 해당하는 행들은 $\mathbf{H}_{\text{UR,act}}$ 의 M 개의 행들의 선형 결합으로 표현될 수 있음을 의미한다.

\mathcal{J}_{act} 을 RIS 의 능동 소자에 해당하는 인덱스의 집합으로 정의한다. 전체 채널을 추정하기 위해서는, \mathcal{J}_{act} 의 인덱스에 해당하지 않는 나머지 $L - L_{\text{act}}$ 개의 행을 추정해야 한다. $\mathbf{H}_{\text{UR,act}}$ 가 능동 소자의 배치에 관계없이 완전 랭크 행렬이기 때문에, $\mathbf{H}_{\text{UR,act}}$ 의 L_{act} 개의 행 중에서 임의로 선택된 M 개의 행은 \mathbf{H}_{UR} 의 행 기저가 된다. $\mathbf{H}_{\text{UR,act}}$ 에서 임의의 M 개의 행이 \mathbf{H}_{UR} 의 ℓ 번째 행 $\mathbf{H}_{\text{UR}}(\ell, :)$ 을 추정하기 위해 사용될 수 있지만, $\mathbf{H}_{\text{UR}}(\ell, :)$ 과 상관관계가 높은 행들을 선택하는 것이 바람직하다. $\forall m = 1, \dots, M$ 에 대하여 $\mathbf{h}_{\text{UR},m}$ 의 a 번째 요소와 b 번째 요소의 상관관계는 $[\mathbf{R}]_{a,b}$ 로 표현되기 때문에, $[\mathbf{R}]_{a,b}$ 는 $\mathbf{H}_{\text{UR}}(a, :)$ 과 $\mathbf{H}_{\text{UR}}(b, :)$ 사이의 상관관계를 나타내는 좋은 척도가 된다. $\mathbf{H}_{\text{UR}}(\ell, :)$ 는 주어지지 않고 추정해야 하지만, $\mathbf{H}_{\text{UR}}(\ell, :)$ 과 $\mathbf{H}_{\text{UR,act}}$ 의 행 사이의 상관관계는 \mathbf{R} 을 통해서 얻을 수 있다. 따라서 제안하는 기법은 $\mathbf{H}_{\text{UR}}(\ell, :)$ 과 상관관계가 가장 높은 M 개의 행들을 \mathbf{R} 을 활용하여 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{UR,act}}$ 로부터 선택하고, 선형 결합을 위한 가중치로서 해당하는 상관계수를 활용한다.

가중 선형 결합을 위해, 상관관계가 높은 행들에 더 높은 가중치를 주는 방법을 고려하여 가능한 방법 중 지수(exponential) 가중치를 고려하였다. $\pi_1^{(\ell)}, \dots, \pi_M^{(\ell)}$ 을 $\mathbf{H}_{\text{UR}}(\ell, :)$ 과 상관관계가 가장 큰 $\mathbf{H}_{\text{UR,act}}$ 에서의 M 개의 행들의 인덱스로 정의하고, $\psi_1^{(\ell)}, \dots, \psi_M^{(\ell)}$ 을 해당하는 \mathbf{H}_{UR} 에서의 인덱스로 정의한다. 그러면 지수 가중치는 아래와 같이 주어진다.

$$w([\mathbf{R}]_{\ell, \psi_m^{(\ell)}}) = \text{sign}([\mathbf{R}]_{\ell, \psi_m^{(\ell)}}) \exp(\alpha |[\mathbf{R}]_{\ell, \psi_m^{(\ell)}}|), \quad (4)$$

여기서 디자인 매개변수 α 는 가중치 계수를 나타내며, 수치적으로 최적화될 수 있다.

가중 선형 결합을 적용한 후에, 추정된 행의 노름 값을 실제 채널의 노름 값과 비슷하게 만들어 주는 정규화 과정이 필요하다. \mathbf{H}_{UR} 의 행의 노름의 통계적 분포를 통해, \mathbf{H}_{UR} 의 행의 노름의 제곱 사이의 상관관계는 \mathbf{R} 의 요소로 표현됨을 보일 수 있다. 따라서, 정규화 계수로서 가중 선형 결합을 위해 사용하였던 M 개의 행들의 표본평균을 사용하는 것은 합리적이다. \mathbf{H}_{UR} 의 ℓ 번째 추정된 행의 정규화 계수 N_ℓ 은 아래와 같이 주어진다.

$$N_\ell = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \|\hat{\mathbf{H}}_{\text{UR,act}}(\pi_m^{(\ell)}, :)\|. \quad (5)$$

최종적으로, $\forall \ell \notin \mathcal{J}_{\text{act}}$ 에 대해서 가중 선형 결합과 정규화를 적용한 $\mathbf{H}_{\text{UR}}(\ell, :)$ 의 추정치는 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{H}}_{\text{UR}}(\ell, :) = \frac{N_\ell \sum_{m=1}^M w([\mathbf{R}]_{\ell, \psi_m^{(\ell)}}) \hat{\mathbf{H}}_{\text{UR,act}}(\pi_m^{(\ell)}, :)}{\left\| \sum_{m=1}^M w([\mathbf{R}]_{\ell, \psi_m^{(\ell)}}) \hat{\mathbf{H}}_{\text{UR,act}}(\pi_m^{(\ell)}, :) \right\|}. \quad (6)$$

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 기법의 UE-RIS 채널 추정 성능을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 같은 클러스터 내에 $M =$

8 명의 UE 가 존재한다. RIS 소자의 개수는 $L = 16 \times 16$ 이고, $d_h = d_v = \lambda/8$ 이다. (4)에 있는 가중치 계수는 $\alpha = 5$ 로서 수치적으로 최적화되었다.

그림 1 에서는 능동 소자의 개수 L_{act} 에 따른 정규화된 평균 제곱 오차(normalized mean squared error, NMSE)를 비교한다. NMSE 는 아래와 같이 정의된다.

$$\text{NMSE} = \frac{1}{L} \sum_{\ell=1}^L \frac{\|\mathbf{H}_{\text{UR}}(\ell, :) - \hat{\mathbf{H}}_{\text{UR}}(\ell, :)\|^2}{\|\mathbf{H}_{\text{UR}}(\ell, :)\|^2}. \quad (7)$$

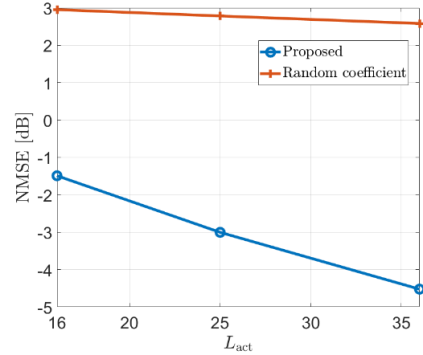


그림 1. L_{act} 에 따른 NMSE 채널 추정 성능 비교.

L_{act} 가 증가할수록, 제안하는 기법의 NMSE 는 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{UR,act}}$ 에서 상관관계가 더 높은 M 개의 행을 선형 결합에 사용할 가능성이 커지므로 감소하게 된다. $\hat{\mathbf{H}}_{\text{UR,act}}$ 로부터 M 개의 행을 임의로 선택하고, 선형 결합 계수를 $\mathcal{CN}(0,1)$ 로부터 독립적으로 생성한 random coefficient 기법은 성능 이득이 거의 보이지 않는데, 이로부터 상관관계가 높은 행을 사용하는 것이 채널 추정 성능을 증가시키는데 중요함을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 RIS 의 도움을 받는 다중 유저 다중 입력 단일 출력 통신 시스템에서의 새로운 채널 추정 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 전체 채널을 추정하기 위해 RIS 소자 사이의 공간 상관 행렬을 활용하여 선형 결합을 수행하며, 지수 가중치와 정규화 계수가 개발되었다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터지원사업의 연구결과 (IITP-2020-0-01787)와 2023 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원 (No.2021-0-00269, 6 세대 Tbps 급 데이터 전송율을 지원하는 sub-THz 대역 무선 전송 및 접속 요소 기술 개발)과 2023 년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0022557)

참 고 문 헌

- [1] E. Björnson and L. Sanguinetti, "Rayleigh Fading Modeling and Channel Hardening for Reconfigurable Intelligent Surfaces," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, no. 4, pp. 830-834, Apr. 2021.
- [2] E. G. Larsson et al., "Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems," in IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, Feb. 2014,