

밀리미터파 대역 지능형 반사 표면 기반 채널 추정 기술 분석

황석준[†], 권진호[†], 서경식, 전정원, 노송[‡]
인천대학교

{cody628, pppe123, ksseo, jungwon1702, songnoh}@inu.ac.kr

요약

지능형 반사 표면(IRS: Intelligent Reflecting Surface) 기술은 밀리미터파 통신에 핵심 요소로 기대하고 있다. 또한 IRS 는 밀리미터파 주파수 대역의 높은 경로 손실 및 전파 차단율을 보상하여 향상된 통신성능을 제공할 수 있다. 실제환경에서 이러한 성능 향상을 획득하기 위해서는 정확한 채널 상태 정보를 획득하는 것이 필수적이다. 따라서 이 논문에서는 IRS 지원 밀리미터파 통신을 위한 채널 추정 기법의 분류 및 특징을 확인하고, 요구되는 파일럿 오버헤드를 분석한다.

I. 서론

5 세대(5G) 이동 통신의 핵심 기술 요소 중 하나인 밀리미터파(millimeter wave) 대역 통신은, 통신 대역으로 수 GHz 단위의 넓은 주파수 스펙트럼을 활용하여, 고데이터 용량을 요구하는 모바일 서비스 지원을 위한 주요 기술로 고려되고 있다 [1]. 밀리미터파 대역에서 예상되는 높은 경로 손실을 극복하기 위해, 최근 밀리미터파 통신을 지원하는 지능형 반사 표면(IRS: Intelligent Reflecting Surface) 기술이 연구되고 있다 [2]. 특히 밀리미터파와 IRS 를 결합하면 추가적인 간접 가시선(line-of-sight) 경로를 통해 밀리미터파 대역의 전파 차단을 완화하고 수신측에서 필요한 안테나 수를 줄이는 등 매우 긍정적인 효과를 얻을 수 있다. 그러나 IRS 의 이점을 활용하려면 정확한 채널의 정보를 획득하는 것이 중요하다. 이에 본 논문에서는 밀리미터파 통신을 위한 채널 추정 기법으로 간접 경로 개별 채널 추정 기법과 간접 경로 종속 채널 추정 기법의 특징을 확인하고 파일럿 오버헤드에 대한 분석을 목표로 한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 단일 사용자(UE: User Equipment)와 기지국(BS: Base Station)과의 연결을 지원하기 위해 지능형 반사 표면을 사용하는 통신모델을 고려한다. IRS 는 BS 와의 제어 링크를 통해서 지능형 반사 표면체의 반사신호 위상/진폭을 조정한다. 이때, BS-IRS 채널환경은 변화가 거의 없는 최소 채널을 가정하였다. 기지국에서 IRS 를 거쳐서 수신한 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = \text{diag}(\mathbf{x})(\mathbf{1}_K \alpha_0 + \mathbf{W}^H \mathbf{h}_I) + \mathbf{n}, \quad (1)$$

K 는 블록 전송에서 채널추정에 필요한 파일럿 시퀀스의 길이이며, \mathbf{x} 는 채널추정에 필요한 파일럿 시퀀스 벡터이다, α_0 는 직접채널(BS-UE) 이득이며 직접채널환경이 변하지 않는 구간 내에서 일정하게 유지된다. \mathbf{W} 는 IRS 의 반사 패턴 행렬, \mathbf{h}_I 는 IRS 를 거쳐서 생성된 간접채널이다. \mathbf{n} 은 가우시안 분포를 따르는 가산성 백색잡음(AWGN)을 가정한다. 이때, 밀리미터파 대역의 채널 회소성을 고려한 간접 채널 \mathbf{h}_I 는 다음과 같이 나타난다[3].

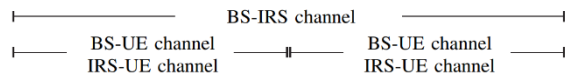
$$\begin{aligned} \mathbf{h}_I &= \sum_{p=1}^{L^{(b)}} \sum_{q=1}^{L^{(u)}} \alpha_p^{(b)} \alpha_q^{(u)} \mathbf{u}(\phi_p^{(b)} + \phi_q^{(u)}) \\ &=: \sum_{\ell=1}^{L^{(b)} L^{(u)}} \alpha_{\ell} \mathbf{u}(\phi_{\ell}), \end{aligned} \quad (2)$$

이때, $L^{(b)}$ 와 $L^{(u)}$ 는 각각 BS-IRS 및 IRS-UE 링크의 경로 수를 나타내며, 종속경로의 이득 α_{ℓ} , 각도 ϕ_{ℓ} 는 각각 개별 링크의 이득 $\alpha_p^{(b)}$, $\alpha_q^{(u)}$ 의 곱과 각도 $\phi_p^{(b)}$, $\phi_q^{(u)}$ 의 합으로 도출된다.

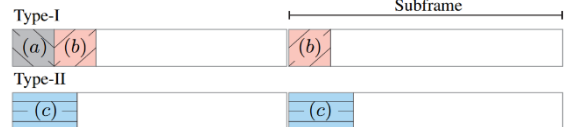
III. 채널 추정 기법 분석

IRS에서 채널추정은 간접 채널의 처리방법에 따라 크게 두 가지로 나뉜다. 첫 번째 방법은 모든 개별 채널(BS-IRS, IRS-UE, BS-UE) 을 추정하는 것이고, 두 번째 방법은 직접채널(BS-UE)과 간접 경로 종속 채널(BS-IRS-UE)을 추정하는 것이다.

Channel coherence time



Frame structure



- (a) Pilot symbols for BS-IRS channel
- (b) Pilot symbols for BS-UE and IRS-UE channels
- (c) Pilot symbols for BS-UE and BS-IRS-UE channels
- Data transmission

그림 1. 채널 추정 전략에 기반한 프레임 구조

그림1은 두 가지 채널 추정 전략과 관련된 채널 추정 및 데이터 전송을 위한 프레임 구조를 설명한다. 개별 채널 추정 전략은 프레임 구성 유형1에 해당하고, 프레임 구성 유형2는 종속 채널 추정 전략을 나타낸다. 전체 프레임의 길이는 느리게 변하는 BS-IRS 채널의 상관 시간(Channel coherence time)으로 설정되고 서브프레임의 길이는 빠르게 변하는 IRS-UE 또는 BS-UE 채널의 상관 시간으로 설정된다. 각 서브프레임은 파일럿 전송 단계와 후속 데이터 전송단계로 구성된다. 첫 번째 서브프레임에서 유형1은 직/간접 개별 채널을 각각 추정하기 위하여 유형2보다 높은 파일럿 오버헤드를 요구한다. 그러나 BS-IRS 채널의 상관 시간이 유지되는 후속 서브프레임에서는 간접 경로만 추정하는

유형1이 낮은 혼련 오버헤드로 더 많은 데이터 심볼을 전송할 수 있다. 따라서 BS-IRS 채널 상관 시간에 따라 전략적으로 채널 추정 기법을 선택하여 사용하는 것이 가능하다. 최근 연구된 채널 기법은 다음과 같다.

A. 간접 경로 개별 채널 추정 기법[4], [5]

간접 경로 개별 채널 추정 기법은 첫 번째 서브프레임에서 BS-UE, IRS-UE 채널 추정을 위한 파일럿 시퀀스 (b) 그리고 BS-IRS 채널 추정을 위한 파일럿 시퀀스 (a)를 전송하는 프레임 구조 유형1에 의해 지원된다. 이 기법은 모든 개별채널의 정보가 획득되기 때문에 기존의 지연 기반 프리코딩 기술을 IRS 지원 통신에 적용할 수 있다. 일반적으로 이 기법은 추정할 채널환경의 차원 증가로 많은 혼련 오버헤드가 필요하다.

B. 간접 경로 종속 채널 추정 기법[6], [7]

간접 경로 종속 채널 추정 기법의 경우, 종속채널 환경의 차원이 개별채널 각각의 경우보다는 크고, 간접 경로 종속 채널의 상관 시간 또한, BS-UE와 IRS-UE 채널의 최소값이라는 사실을 고려해, 모든 서브프레임마다 더 긴 단일 파일럿 시퀀스 (c)가 전송된다. 따라서 프레임 구조 유형2는 첫 번째 서브프레임에서 프레임 구조 유형1보다 더 긴 데이터 전송시간을 확보할 수 있지만, 두 번째 서브프레임에서는 상대적으로 더 적은 데이터 전송시간을 가지는 것을 확인할 수 있다.

IV. 성능 분석 및 결론

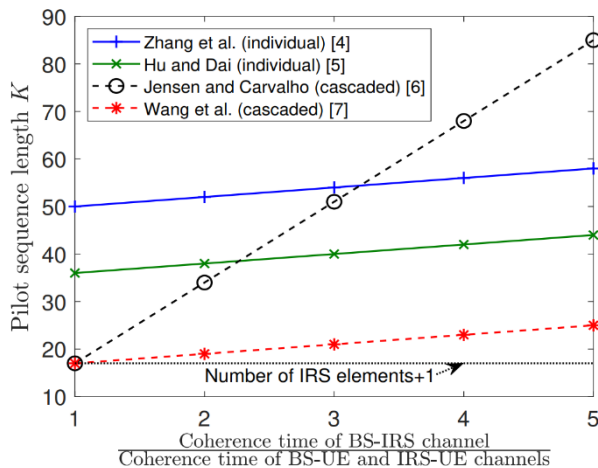


그림 2. 채널 추정 전략에 기반한 혼련 오버헤드

[4], [5]에서는 간접 경로 개별 채널 추정을 고려하기 때문에 BS-IRS 채널과 BS-UE, IRS-UE 채널의 상관 시간 비율이 1에 가까울 때 혼련 오버헤드가 상대적으로 커진다. [5]에서는 전이중 기지국을 가정해 혼련 오버헤드를 줄인다. [6], [7]에서는 BS-IRS와 BS-UE, IRS-UE 채널의 상관 시간 비율이 1일 때 최소 혼련 오버헤드가 'IRS요소의 개수 + 1'인 종속 채널 추정을 고려했다. 따라서 그림. 2 에서 보는 바와 같이 [6]에서는 상관 시간 비율이 증가함에 따라, 혼련 오버헤드의 증가가 크다. 반면에, [7]에서의 혼련 오버헤드 기울기는 개별 채널 추정의 것과 동일하게 나타난다. 이 방법에서는 첫번째 서브프레임에서만 전체 종속채널을 추정하고, 후속 서브프레임에서는 BS-UE, IRS-UE 채널만 추정하기 때문이다.

본 논문에서는 IRS 밀리미터파 통신을 위한 채널추정 방식을 간접채널의 처리방법에 따라서 두가지로 확인하고, 각 기법마다의 파일럿 오버헤드를 분석했다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 2022 년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원의 지원과, 2022 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: P0022557, NRF-2022R1F1A1074612).

참 고 문 헌

- [1] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan., and M. Zorzi, "Toward 6G networks: Use cases and technologies," *IEEE Wireless Commun. Mag.*, vol. 58, no. 3, pp. 55 – 61, Mar. 2020.
- [2] S. Gong, X. Lu, D. T. Hoang, D. Niyato, L. Shu, D. I. Kim, and Y.-C. Liang, "Toward smart wireless communications via intelligent reflecting surfaces: A contemporary survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 22, no. 4, pp. 2283 – 2314, 4th Quarter 2020.
- [3] S. Noh, H. Yu, and Y. Sung, "Training signal design for sparse channel estimation in intelligent reflecting surface-assisted millimeter-wave communication," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 4, pp. 2399 – 2413, Apr. 2022.
- [4] J. Zhang, C. Qi, P. Li, and P. Lu, "Channel estimation for reconfigurable intelligent surface aided massive MIMO system," in *Proc. IEEE Int. Workshop Signal Process. Adv. for Wireless Commun. (SPAWC)*, Atlanta, GA, May 2020.
- [5] C. Hu, L. Dai, S. Han, and X. Wang, "Two-timescale channel estimation for reconfigurable intelligent surface aided wireless communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 11, pp. 7736 – 7747, Nov. 2021.
- [6] T. L. Jensen and E. De Carvalho, "An optimal channel estimation scheme for intelligent reflecting surfaces based on a minimum variance unbiased estimator," in *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust. Speech and Signal Process. (ICASSP)*, Barcelona, Spain, May 2020.
- [7] Z. Wang, L. Liu, and S. Cui, "Channel estimation for intelligent reflecting surface assisted multiuser communications: Framework, algorithms, and analysis," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 10, pp. 6607 – 6620, Oct. 2020.