

# 근거리장 전파 특성을 고려한 XL-MIMO V2I 채널 추정 성능 분석

이종범, 김용균, 이병주

인천대학교 정보통신공학과

{sjgsjb3, yonggyunkim, bjlee}@inu.ac.kr

## Channel Estimation Performance Analysis in Near-Field XL-MIMO V2I Systems

Jongbeom Lee, Yongkyun Kim, Byungju Lee

Department of Information and Telecommunication Engineering

Incheon National University

### 요약

본 논문은 사용자 이동성이 존재하는 XL-MIMO 환경에서 근거리장 전파 특성이 채널 추정 성능에 미치는 영향을 분석한다. 근거리장 환경에서는 채널 응답이 각도와 거리 모두에 의존하며, 이동에 따라 이러한 구조가 시간적으로 변화한다. 시뮬레이션 결과, 근거리장 채널 가정은 원거리장 대비 채널 추정 성능의 열화 양상이 상이하게 나타남을 보이며, 이는 이동 환경에서 근거리장 특성을 고려한 채널 모델링의 필요성을 시사한다.

### I. 서론

차세대 6G 이동통신에서는 초대규모 안테나 배열과 밀리미터파(mmWave) 및 테라헤르츠(THz) 대역의 활용이 핵심 기술 요소로 고려되고 있다. 이러한 환경에서는 안테나 배열의 물리적 크기 증가와 동작 주파수 상승으로 인해 전파 특성이 기존 원거리장 기반 평면파(planar wave) 가정에서 벗어나는 경우가 발생한다. 특히 Rayleigh distance 가 수십에서 수백 미터 수준으로 확장되면서, 실제 통신 링크가 근거리장 영역에 포함되고 전파는 구면파(spherical wave) 특성을 갖게 된다 [1]. 이에 따라 근거리장 환경에서는 채널 응답이 각도뿐 아니라 송수신기 간 거리에도 의존하게 되며, 원거리장 가정에 기반한 선형 배열 응답 구조와는 상이한 채널 특성이 나타나게 된다.

한편, V2X(Vehicle-to-Everything)와 같은 이동 환경에서는 사용자 이동에 따라 채널 상태 정보(Channel State Information, CSI)가 시간적으로 변화하여 채널 불일치가 발생하지만, 기존 연구는 주로 원거리장 가정을 기반으로 채널 변화 및 채널 에이징(channel aging) 현상을 분석해 왔으나, 근거리장 특성에 대한 논의는 제한적이다. 이에 본 논문은 XL-MIMO(Extremely Large-Scale Multi-Input Multiple-Output) 환경에서 근거리장 전파 특성과 이동성이 결합된 경우를 중심으로 기존 연구 동향을 정리하고, 시뮬레이션을 통해 이동 환경에서 근거리장 및 원거리장 채널 가정을 적용했을 때의 채널 추정 성능을 비교 및 분석한다.

### II. XL-MIMO 근거리장 채널 모델

XL 시스템에서는 안테나 배열의 물리적 크기 증가와 동작 주파수 상승으로 인해 사용자와 안테나 배열 간 전파가 근거리장 영역에 위치하는 경우가 빈번하게 발생한다. 근거리장 환경에서는 채널 응답이 각도뿐 아니라 송수신기 간 거리에도 의존하며, 이에 따라 배열 응답의 위상은 안테나 인덱스에 대해 비선형적으로 변화한다 [1].

원거리장 환경에서는 전파를 평면파로 가정하여,  $m$  번째 서브 캐리어에서의 채널을 다음과 같이 표현한다.

$$\mathbf{h}_m^{\text{far}} = \sqrt{\frac{N}{L}} \sum_{l=1}^L g_l e^{-jk_m r_l} \mathbf{a}(\theta_l) \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 안테나 수,  $L$ 은 전파 경로 수,  $g_l$ 은  $l$  번째 경로의 복소 이득,  $r_l$ 은 전파 거리,  $\theta_l$ 은 입사각(angle of arrival, AoA)을 나타내며,  $k_m = 2\pi f_m / c$ 는  $m$  번째 서브 캐리어 주파수  $f_m$ 에 대응되는 파수이며, ULA(Uniform Linear Array)를 가정할 때 배열 응답 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{a}(\theta_l) = \frac{1}{\sqrt{N}} [1, e^{j\pi\theta_l}, \dots, e^{j\pi(N-1)\theta_l}]^T \quad (2)$$

원거리장 환경에서는 식 (2)와 같이 배열 응답의 위상이 안테나 인덱스에 대해 선형적으로 변화한다.

안테나 수 증가와 동작 주파 수 상승으로 인해 Rayleigh distance  $Z = \frac{\lambda_c}{2}$ 가 확장되면, 사용자와 배열 간 거리가  $Z$  보다 작은 경우 전파는 근거리장 영역에 위치한다. 이 경우 채널은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{h}_m^{\text{near}} = \sqrt{\frac{N}{L}} \sum_{l=1}^L g_l e^{-jk_m r_l} \mathbf{b}(\theta_l, r_l) \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{b}(\theta_l, r_l)$ 은 각도와 거리 정보에 동시에 의존하는 근거리장 배열 응답 벡터로, 구면파 전파를 고려하면 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{b}(\theta_l, r_l) = \frac{1}{\sqrt{N}} [e^{-jk_c(r_l^{(0)} - r_l)}, \dots, e^{-jk_c(r_l^{(N-1)} - r_l)}]^T \quad (4)$$

여기서  $k_c = 2\pi/\lambda$ 이며,  $r_l^{(n)}$ 은  $n$  번째 안테나 소자와  $l$  번째 경로에 대응되는 사용자 또는 산란체 간의 전파 거리를 나타낸다. 근거리장 환경에서는 이러한 소자별 거리 차이가 배열 응답의 위상에 직접 반영되어, 배열 전반에 걸쳐 비선형적인 위상 구조가 형성된다 [1].

기존 원거리장 모델은 배열 응답이 입사각에만 의존한다는 평면파 가정을 전제로 하여 채널의 공간 구조를 각도 도메인으로 한정한다. 그러나 근거리장 환경에서는 동일한 입사각에서도 소자별 거리 차이에 의해 구면파 형태의 위상 변화가 발생하므로 [2], 각도와 거리를 동시에 고려하는 극좌표계 기반 채널 모델링이 필요하다.

이동 사용자가 존재하는 환경에서는 송수신기 간 상대적 움직임으로 인해 도플러 천이(Doppler shift)가 발생하며, 이는 채널의 시변(time-varying) 특성을 유발한다. 채널 추정 시점과 실제 데이터 전송 시점 간의 시간 지연 동안 사용자의 이동이 발생할 경우, 추정된 CSI 와 실제 채널 간 불일치가 발생하는 채널 에이징 현상이 나타난다 [3].

기존 원거리장 모델에서는 평면파 가정에 따라, 배열 내 모든 안테나 소자에서 관측되는 도플러 주파수가 입사각에 의해 결정된다고 가정한다. 그러나 XL-MIMO 환경에서는 구면파 전파 특성으로 인해 배열 전반에 걸쳐 위상 및 도플러 천이가 비균일하게 분포하며, 소자별로 상이한 도플러 성분이 관측된다. 이로 인해 채널의 시변성은 단일 도플러 기반 시간 상관 모델로는 정확히 설명되기 어렵다 [4]. 특히, 근거리장 구면파 환경에서는 사용자 속도 벡터가 배열 내 각 소자에 서로 다른 방향 성분으로 투영되며, 도플러 천이는 방사 및 횡방향 성분 모두에 의존하게 된다 [5].

근거리장 전파 특성과 사용자 이동성이 동시에 존재하는 XL-MIMO V2I(Vehicle-to-Infrastructure) 환경에서는 채널의 공간적·시간적 특성이 복합적으로 형성된다. 먼저, 소자별 전파 경로 길이 차이로 인해 배열 전반에 걸쳐 공간적 비균일성이 발생하며, 이러한 구조는 사용자 이동에 따라 시간적으로 변화한다. 또한, 구면파 전파 환경에서는 소자별로 상이한 도플러 천이가 형성되어 채널의 시간적 변화 역시 비균일하게 나타난다. 결과적으로 근거리장 이동 환경에서는 각도,

거리, 속도 성분이 결합된 시변 채널 구조가 형성되며, 이러한 특성은 XL-MIMO 환경에서의 채널 모델링 및 채널 추정 문제를 분석하는 데 있어 핵심적인 고려 요소로 작용한다.

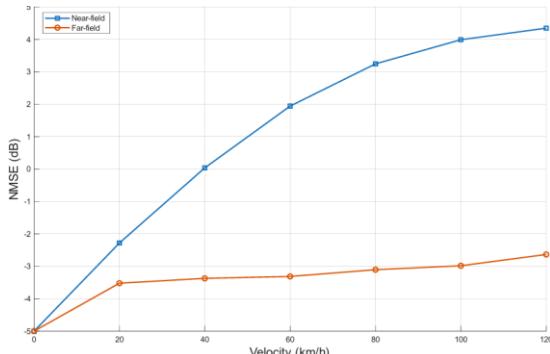
### III. 시뮬레이션 환경 및 채널 추정 성능 분석

본 장에서는 V2I 환경에서 차량 이동성에 따른 채널 추정 성능이 근거리장 및 원거리장 채널 모델에서 어떻게 다르게 나타나는지를 비교 및 분석한다. RSU(Roadside Unit)는 256 개 안테나로 구성된 ULA 를 사용하며, 차량은 RSU 전면 방향에서 일정한 속도로 이동하는 시나리오를 가정한다. 동일한 이동 조건하에서 근거리장 및 원거리장 채널 모델을 각각 적용하여 채널을 생성하고, 동일한 파일럿 구조와 채널 추정 방식을 사용함으로써 채널 모델 가정에 따른 성능 차이를 평가하였다.

채널은 구면파 특성을 갖는 LoS 성분과 다중경로 성분으로 구성된 근거리장 Rician 페이딩 모델을 기본으로 하며, 다중경로 성분은 20 개의 산란 경로의 합으로 모델링하였다. XL-MIMO 환경의 특성을 반영하기 위해 각 경로가 안테나 배열의 일부 영역에만 도달하는 공간적 비정상성(Spatial Non-stationarity)을 고려하였다. 이동성은 사용자의 속도 벡터에 따른 위치 변화로 반영하였으며, 채널 추정 시점과 데이터 전송 시점 간의 시간 지연을 통해 시변 채널 특성을 모사하였다. 또한 통계적 신뢰성을 확보하기 위해 각 시뮬레이션 조건에 대해 300 회의 독립적인 시행을 통해 평균 성능을 도출하였다. 주요 시뮬레이션 파라미터는 [표 1]에 정리되어 있다.

| 항목          | 파라미터 값  |
|-------------|---------|
| 반송파 주파수     | 77 GHz  |
| 시스템 대역폭     | 100 MHz |
| 안테나 배열 형태   | ULA     |
| 안테나 개수      | 256     |
| 페이딩 모델      | Rician  |
| 전파 경로 수     | 20      |
| 몬테카를로 반복 횟수 | 300     |

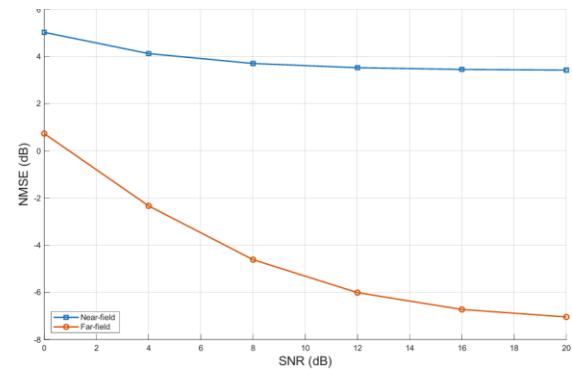
[표 1] 시뮬레이션 환경 파라미터



[그림 1] SNR에 따른 채널 NMSE ( $v=100\text{km/h}$ )

[그림 1]은 차량 속도를 고정한 상태에서 SNR에 따른 채널 NMSE(Normalized Mean Square Error) 변화를 나타낸다. 원거리장 채널 가정에서는 SNR 증가에 따라 NMSE가 감소하는 경향을 보이는 반면, 근거리장 채널 가정에서는 동일한 SNR 증가에 대해 NMSE 감소 폭이 상대적으로 제한적으로 나타난다.

[그림 2]는 SNR을 고정한 상태에서 차량 속도에 따른 NMSE 변화를 나타낸다. 원거리장 채널 가정에서는 속도 증가에 따라 NMSE가 완만하게 증가하는 반면, 근거리장 채널 가정에서는 속도 증가에 따라 NMSE가 보다 빠르게 증가하는 경향이 관찰된다. 이는 근거리장 환경에서 소자별 거리 변화와 도플러 효과가 동시에 작용하여 채널의 시간 변동성이 더욱 민감하게 나타나기 때문으로 해석할 수 있다. 이러한 결과는 이동성이 존재하는 환경에서 근거리장 채널 가정 하의 채널 추정이 이동에 대해 보다 민감하게 반응함을 보여준다.



[그림 2] 차량 속도에 따른 채널 NMSE (SNR=5dB)

### IV. 결론

본 논문은 XL-MIMO 환경에서의 근거리장 전파 특성을 정리하고, 원거리장 가정과 대비되는 근거리장 채널의 공간적 구조적 특징을 분석하였다. 근거리장 환경에서는 배열 내 안테나 소자와 사용자 간 거리 차이에 의해 채널 응답이 비선형적인 위상 구조를 가지며, 이동성이 존재할 경우 이러한 거리 분포와 도플러 천이가 소자별로 비균일하게 변화함을 논의하였다.

이러한 특성을 바탕으로 V2I 환경에서 근거리장 및 원거리장 채널 모델을 각각 적용한 시뮬레이션을 수행한 결과, 근거리장 채널 가정에서는 이동 속도 증가에 따라 채널 추정 성능 열화가 원거리장 대비 더 빠르게 나타나는 경향을 확인하였다. 이는 근거리장 환경에서 소자별 거리 변화와 도플러 효과가 동시에 작용하여 채널의 시간 변동성이 증가하기 때문으로 해석된다. 이러한 결과는 이동성이 존재하는 XL-MIMO 환경에서 근거리장 전파 특성을 반영한 채널 모델링과 채널 추정 성능 분석의 필요성을 시사한다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 학·석사연계 ICT 핵심인재양성사업 (IITP-2026-RS-2024-00437024)의 연구결과로 수행되었음.

### 참 고 문 헌

[1] M. Cui and L. Dai, "Channel estimation for extremely large-scale MIMO: Far-field or near-field?" IEEE Trans. Commun., vol. 70, no. 4, pp. 2663–2677, Apr. 2022.

[2] H. Lu, Y. Zeng, C. You, Y. Han, J. Zhang, Z. Wang, Z. Dong, S. Jin, C.-X. Wang, T. Jiang, X. You, and R. Zhang, "A tutorial on near field XL-MIMO communications towards 6G," IEEE Commun. Surveys Tuts., vol. 26, no. 4, pp. 2213–2257, 4th Quart. 2024.

[3] H. Ju, S. Jeong, S. Kim, B. Lee, and B. Shim, "Transformer-assisted parametric CSI feedback for mmWave massive MIMO systems," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 23, no. 12, pp. 18774–18787, Dec. 2024.

[4] H. Jiang, Z. Wang, Y. Liu, H. Shin, A. Nallanathan, and Y. Liu, "Near-field sensing enabled predictive beamforming: Fundamentals, framework, and opportunities," arXiv preprint arXiv:2506.09225, 2025.

[5] Z. Wang, X. Mu, and Y. Liu, "Near-field velocity sensing and pre dictive beamforming," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 74, no. 1, pp. 1806–1810, Jan. 2024.