

XL-MIMO 시스템을 위한 사용자 위치 기반 채널 추적 기법

김윤동, 정진곤*, 최지훈
한국항공대학교, *중앙대학교

kyd990129@kau.kr, *jgjoung@cau.ac.kr, jihoon@kau.ac.kr

Channel Tracking Based on User Location for XL-MIMO Systems

Yundong Kim, Jingon Joung*, and Jihoon Choi

Korea Aerospace University, *Chung-Ang University

요약

본 논문에서는 초 대규모 다중 안테나 환경에서 사용자의 이동으로 인해 변화하는 채널을 추적하기 위해 사용자 위치 기반 채널 추적 기법을 새롭게 제안한다. 제안한 기법에서는 L1-norm 최적화에 기반한 압축센싱 복원 기법의 변형을 통해 초기 사용자 위치를 추정한 후, 해당 위치를 기준으로 사용자의 이동 범위를 고려한 부분 센싱 행렬을 생성하여 시간에 따른 사용자의 위치 변화와 채널 상태 정보를 추적한다. 사용자 이동성을 고려한 모의실험을 통해 제안한 기법의 사용자 위치 및 채널 추적 정확도를 평가하고, 제안한 기법이 일정한 시간 간격으로 채널 추정을 수행하는 방식과 성능이 유사함을 보인다.

I. 서론

최근 6 세대 이동 통신의 성능 향상을 위해 기지국에 수백 개 이상의 안테나를 사용하는 XL-MIMO (Extremely Large-Scale Multiple-Input Multiple-Output) 기술이 연구되고 있다. 기지국의 안테나 수가 초 대규모로 증가함에 따라 레일리 거리가 수백 미터로 길어져서 대부분의 사용자가 근역장 (near-field)에 위치하게 된다. 근역장에 위치한 사용자와 기지국 사이의 채널 추정을 위해서는 구면파를 고려한 극좌표 영역 변환을 통한 채널 모델링 및 채널 추정이 필요하다.

XL-MIMO 채널에서는 늘어난 안테나 수로 인해 채널 추정을 위한 과일릿 부하가 급격히 증가한다. 이를 해결하기 위해 [1], [2]에서는 채널의 희소성을 이용한 압축센싱 복원 기법인 OMP(Orthogonal Matching Pursuit)를 사용한 채널 추정 기법을 제안하였다. 그러나 해당 기법의 경우 채널의 전체 경로 수에 대한 사전 정보가 필요하다. 또한, 채널 추정시 사용자의 거리와 위상을 격자로 분할하여 변환 행렬을 정의하므로, 격자 간격을 줄여서 추정 정확도를 높이는 경우 행렬 크기 증가로 인해 복잡도가 높아진다. 특히 시간적으로 단말 위치가 변하는 경우 OMP 기반 채널 추정 연산을 반복적으로 수행해야 하므로 복잡도가 급격히 증가한다.

균일 선형 배열 안테나(ULA; Uniform Linear Array) 기반의 XL-MIMO 에 의해 형성된 근역장 환경에서 사용자가 이동하는 경우 기지국과 사용자 사이의 위치 변수인 거리와 각도가 빠르게 변하며, 이에 따라 채널 또한 빠르게 변화한다. 이러한 채널 변화에 대응하기 위해 본 논문에서는 압축센싱 이론에 기반한 SPGL1(Spectral Projection Gradient L1-norm) 기법을 활용한 사용자 위치 및 채널 추적 기법을 제안한다. SPGL1 은 복소 신호에 적용 가능하며, L1-norm 형태로 정의한 최적화 문제의 최소 해를 찾아서 원 신호를 복원하는 방식으로 압축센싱 복원 기법 중 성능이 가장 우수하다 [3]. 또한, 수신 신호의 전체 경로 수를 모르는 경우에도 채널 추정이 가능한 장점이 있다. 제안하는 기법은 이전 시점에 추정된 사용자의 위치 근처에서 새로운 사용자 위치를 찾

도록 변환 행렬을 정의하여 행렬 크기를 줄이고, SPGL1 을 이용한 복원을 통해 사용자 위치와 채널 상태 정보 추적 정확도를 높인다. 모의실험을 통해 제안된 채널 추적 기법이 사용자 이동에 따라 매번 채널 추정을 새롭게 수행하는 방식과 성능이 유사함을 보인다.

II. 제안된 XL-MIMO 채널 추적 기법

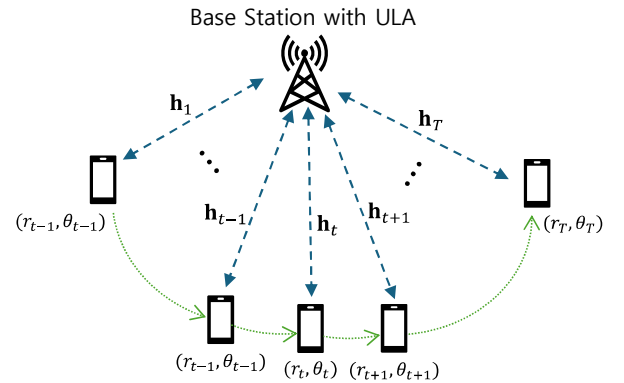


그림 1. 사용자 이동을 고려한 XL-MIMO 시스템 모델

그림 1은 기지국이 N 개의 안테나를 가지는 ULA이며, 단일 안테나의 사용자가 기지국 주변을 이동하는 XL-MIMO 시스템을 나타낸다. 이때 사용자가 근역장 내에서 이동한다고 가정하고, 높은 주파수로 인해 LoS (Line-of-Sight) 경로만 고려하고 NLoS (Non-Line-of-Sight) 경로는 무시한다. t 번째 시간 슬롯에서 기지국과 사용자 간 채널은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{h}_t = \alpha_t \mathbf{b}(\theta_t, r_t) \quad (1)$$

이때 α_t , θ_t , r_t 는 채널 이득, 기지국과 사용자 사이의 방위각, 거리를 각각 나타낸다. 또한 $\mathbf{b}(\theta_t, r_t)$ 는 다음과 같이 구면파를 가정한 근역장 조향 벡터를 나타낸다.

$$\mathbf{b}(\theta_t, r_t) = \left[e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(r_t^{(1)}-r_t)}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(r_t^{(N)}-r_t)} \right]^H \quad (2)$$

여기서 $r_i^{(n)}$ 은 n 번째 안테나와 사용자 사이의 거리를 의미하고 안테나 원소간 거리가 d 일 때 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$r_i^{(n)} = \sqrt{r_i^2 + 0.25(2n - N - 1)^2 d^2 - r_i(2n - N - 1)d\theta_i} \quad (3)$$

식(1)과 (2)를 사용하여 t 번째 시간 슬롯에서 기지국의 수신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{P}\mathbf{h}_t + \mathbf{n}_t = \mathbf{P}\mathbf{W}\mathbf{a}_t + \mathbf{n}_t \quad (4)$$

이때 \mathbf{P} 는 직교 파일릿 심볼 행렬, \mathbf{a}_t 는 희소 벡터, \mathbf{n}_t 는 잡음 벡터이고, \mathbf{W} 는 격자상의 모든 점에서의 조향 벡터로 구성된 변환 행렬로 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{W} = [\mathbf{b}(\theta_1, r_1^1), \dots, \mathbf{b}(\theta_1, r_1^{\theta_1}), \dots, \mathbf{b}(\theta_N, r_N^1), \dots, \mathbf{b}(\theta_N, r_N^{\theta_N})] \quad (5)$$

시간 $t = 1$ 일 때 초기 사용자 위치 정보 (θ_1, r_1) 과 초기 채널 \mathbf{h}_1 은 (5)에서 정의한 변환 행렬 \mathbf{W} 와 \mathbf{y}_1 에 SPGL1을 적용해서 추정한다. 시간 t 에서의 위치 정보 (θ_t, r_t) 를 알고 있는 경우, 시간 $(t + 1)$ 에서의 사용자 위치를 (θ_t, r_t) 주변으로 한정해서 \mathbf{W} 의 부분 행렬 \mathbf{W}_{sub} 를 정의한다. 이때 사용자 위치의 범위는 사용자의 이동 속도와 시간 간격을 고려해서 정한다. \mathbf{W}_{sub} 와 \mathbf{y}_{t+1} 에 SPGL1을 적용해서 시간 $(t + 1)$ 에서 사용자 위치 (θ_{t+1}, r_{t+1}) 과 채널 벡터 \mathbf{h}_{t+1} 를 구한다. 제안된 기법에서 희소 벡터 \mathbf{a}_t 의 원소 중 가장 큰 2개의 열 벡터에 해당하는 격자의 좌표값을 가중 평균하여 위치를 추정한다. 제안한 채널 추적 기법은 다음 그림과 같이 표현할 수 있다. 제안한 기법의 경우 채널 추적시 변환 행렬을 \mathbf{W}_{sub} 로 한정함으로써 채널 추적 성능을 유지하면서 연산 복잡도를 줄인다.

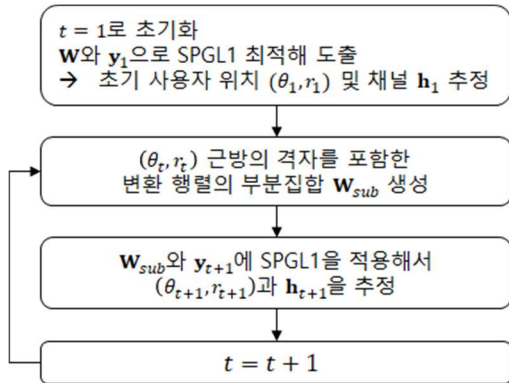


그림 2. 제안된 채널 추적 기법 블록도

III. 모의실험 결과

그림 3은 송신 안테나 수 $N = 512$ 일 때 실제 사용자의 시간에 따른 이동 경로, 제안된 기법으로 추정된 사용자 위치, 사용자 위치 추정에 적용한 극좌표 격자 형태를 나타낸다. 사용자는 지정된 원형 경로를 따라 일정한 속도로 이동하는 것으로 가정하였다. 전체적으로 $2 \leq t \leq 9$ 일 때는 사용자 위치를 비교적 정확하게 추정하고, 기지국 안테나의 중심방향(boresight)에서 벗어난 $t = 1$ 과 $t = 10$ 에서는 위치 추정 오차가 다소 증가함을 볼 수 있다.

그림 4는 그림 3과 같이 사용자가 이동할 때 제안된 기법과 기존 기법의 시간에 따른 채널 추적 성능 변화를 비교해서 보여준다. OMP는 [1]에서 제안한 방식으로 매 시간 새롭게 채널을 추정하는 방식이고, SPGL1은 [3]의 SPGL1 압축센싱 복원 최적화 모듈을 사용해서 매 시간 새롭게 채널을 추정하는 방식이다. $t = 1$ 을 제외하면 제안된 사용자 위치 기반 채널 추적 기법이 기존 방식에

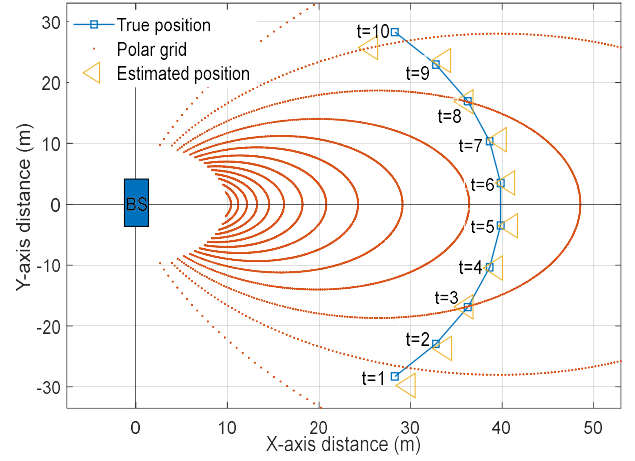


그림 3. 제안된 기법을 적용한 사용자 위치 추정 결과

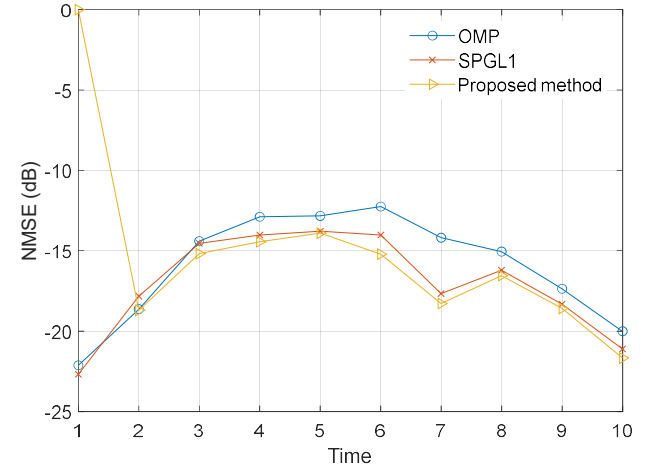


그림 4. 제안된 기법과 기존 기법의 채널 추적 성능 비교

비해 우수한 성능을 보인다. 예를 들어 NMSE (Normalized Mean Square Error) 기준으로 제안된 기법이 OMP 대비 평균 3 dB, SPGL1 대비 평균 1 dB 정도 우수한 성능을 얻는다.

IV. 결론

본 논문에서는 ULA를 사용하는 XL-MIMO 시스템에서 사용자 이동성을 고려한 채널 추적 기법을 새롭게 제안하고, 모의실험을 통해 제안된 기법이 기존 채널 추정 방식에 비해 우수함을 보였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-학·석사연계 ICT 핵심인재양성(IITP-2024-RS-2024-00437857)과 시공간 선 부호 기반 차세대 무선 접속 기술 개발(2021-0-00874) 및 한국연구재단의 지원(2022R1F1A1073999)으로 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] X. Wei and L. Dai, "Channel Estimation for Extremely Large-Scale Massive MIMO: Far-Field, Near-Field or Hybrid-Field," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 26, no. 1, pp. 177-171, Jan. 2022.
- [2] Z. Hu, C. Chen, Y. Jin, L. Zhou and Q. Wei, "Hybrid-Field Channel Estimation for Extremely Large-Scale Massive MIMO System," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 1, pp. 303-307, Jan. 2023.
- [3] E. van de berg and M. P. Friedlander, "SPGL1: A Solver for Large-Scale Sparse Reconstruction," Dec. 2019. <https://github.com/mpf/spgl1>