

Atomic Norm Minimization 기반 Radio Positioning and Mapping 알고리즘

홍석운, 최완규, 박현우, 김선우
한양대학교 융합전자공학과

Atomic Norm Minimization-Based Radio Positioning and Mapping Algorithm

Sukyun Hong, Wankyu Choe, Hyunwoo Park, Sunwoo Kim

Department of Electronic Engineering, Hanyang University
{hongs0908, choewg, stark95, remero}@hanyang.ac.kr

요약

본 논문은 integrated sensing and communication 시스템에서 고정밀 센싱이 가능한 무선 신호를 활용하여 ANM (atomic norm minimization) 기반 이동체 위치 및 랜드마크 추정 알고리즘을 제안한다. ANM을 적용하여 line-of-sight와 non-line-of-sight 경로를 분리하여 고해상도 파라미터를 추정한다. 추정 파라미터의 기하학적 관계를 이용하여 이동체 및 incidence point 기반 랜드마크 위치를 추정한다. 시뮬레이션 결과, 제안 알고리즘을 적용하여 랜드마크 위치 추정 성능이 향상됨을 확인하였다.

I. 서론

차세대 통신 기술의 도입으로 고정밀 실시간 무선 센싱이 가능해짐에 따라, 통신 신호를 이용하여 이동체의 위치를 추정하고 주변 환경을 mapping하는 radio SLAM (simultaneous localization and mapping) 기술이 주목받고 있다 [1]. Radio SLAM의 핵심 목표는 기하학적 정보를 활용하여 이동체 및 랜드마크 위치를 동시에 추정하는 것이다 [2]. 수신 신호로부터 파라미터를 추정하여 이동체 및 IP (incidence point) 기반 랜드마크 위치 추정을 동시에 수행하는 기법이 제안되었으나, 실제 환경에서는 다중 경로로 인하여 파라미터 추정 성능이 저하된다. 본 논문은 ISAC (integrated sensing and communication) 시스템에서 IP 기반 랜드마크 위치 추정 성능을 향상시키기 위하여 ANM (atomic norm minimization) 기반 알고리즘을 제안한다.

II. ISAC 신호 모델

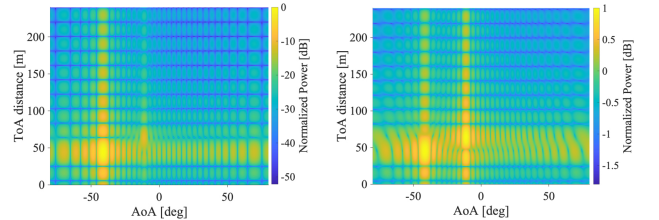
단일 안테나를 가진 다중 UE (user equipment)가 시간에 따라 움직이며 carrier frequency f_c , subcarrier spacing Δf 를 가지는 OFDM (orthogonal frequency dimension multiplexing) 신호를 송신하고, M 개의 ULA (uniform linear antenna)로 구성된 bistatic 레이더가 BS (base station)에서 신호를 수신한다고 가정한다. 안테나 간격은 송신 신호의 반파장이다. i 번째 UE에서 BS로 송신한 신호의 n 번째 time step, m 번째 antenna array, l 번째 subcarrier의 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_{n,m,l}^i = \sum_{v=1}^{V_n^i} \sum_{p=1}^{P_n^{i,v}} \alpha_n^{i,v,p} e^{j\pi(m-1)\sin(\theta_n^{i,v,p})} e^{j2\pi f_l \tau_n^{i,v,p}} s_{n,l}^i + z_{n,m,l}^i \quad (1)$$

이때 V_n^i 는 i 번째 UE, n 번째 time step의 visible landmarks이고, $P_n^{i,v}$ 는 v 번째 landmark에서 반사된 경로이다. $\alpha_n^{i,v,p}$ 은 복소 채널 감쇠, $f_l = f_c + (l-1)\Delta f$ 은 subcarrier 주파수, $s_{n,l}^i$ 은 OFDM 데이터 심볼, $z_{n,m,l}^i$ 은 잡음 신호이다. $\theta_n^{i,v,p}$, $\tau_n^{i,v,p}$ 은 각각 AoA (angle-of-arrival), ToA (time-of-arrival)이다.

III. ANM 기반 고해상도 파라미터 추정

수신 신호에는 LoS (line-of-sight)와 NLoS (non-line-of-sight) 경로가 혼합되어 있어 NLoS 경로의 파라미터를 추정하는 것에 한계가 존재한다. 그림 1 (a)는 UE에서 송신한 신호의 normalized PSD (power spectral density)이다. NLoS 경로의 main lobe가 LoS 경로의 side lobe에 중첩되어 NLoS 경로의 파라미터 추정 성능이 저하되는 것을



(a) ANM 적용 이전 (b) ANM 적용 이후
그림 1. UE의 normalized PSD

확인할 수 있다. LoS와 NLoS 경로를 효과적으로 분리하고 각 경로로부터 고해상도 파라미터를 추정하기 위하여 ANM을 신호에 적용한다.

ANM을 적용하기 위하여 2차원으로 이루어진 atom을 정의하며, 그 집합인 atomic set $\dot{\mathbf{A}}$ 는 다음과 같다 [4].

$$\dot{\mathbf{A}} = \{\mathbf{A}_r = \mathbf{a}(\theta_r) * \mathbf{b}(\tau_r)^T : (\pi \sin(\theta_r), 2\pi f_l \tau_r) \in [0, 1]^2\}, \quad (2)$$

$\mathbf{A}_r$ 은 랭크 R 중 r 번째 atom을 의미하고, $\mathbf{a}(\theta_r)$ 와 $\mathbf{b}(\tau_r)$ 는 AoA와 ToA에 대한 조향 벡터이다.

$$\mathbf{a}(\theta_r) = [1, e^{j\pi \sin(\theta_r)}, e^{j2\pi \sin(\theta_r)}, \dots, e^{j\pi(M-1)\sin(\theta_r)}]^T, \in \mathbb{C}^{M \times 1} \quad (3)$$

$$\mathbf{b}(\tau_r) = [e^{j2\pi f_l \tau_r}, e^{j2\pi f_2 \tau_r}, \dots, e^{j2\pi f_L \tau_r}]^T, \in \mathbb{C}^{L \times 1} \quad (4)$$

Atom의 선형 결합으로 표현되는 신호 $\mathbf{X}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{X} = \sum_{r=1}^R \lambda_r \mathbf{A}_r, \quad (5)$$

λ_r 은 $\mathbf{X}$ 의 랭크 r 번째에 해당하는 가중치이다. $\mathbf{X}$ 의 ANM $\|\mathbf{X}\|_{\dot{\mathbf{A}}}$ 의 정의는 다음과 같다.

$$\text{argmin} \|\mathbf{X}\|_{\dot{\mathbf{A}}} = \inf \left\{ \sum_{r=1}^R |\lambda_r| \mid \sum_{r=1}^R \lambda_r \mathbf{A}_r, \mathbf{A}_r \in \dot{\mathbf{A}} \right\}, \quad (6)$$

여기서 $\inf\{\cdot\}$ 는 집합의 하한을 의미한다. 수식 (6)은 최적화를 이용할 수 없기에 아래와 같이 semidefinite programming의 형태로 표현한다 [5].

$$\min_{u_x, u_y} \left\{ \frac{\epsilon}{2\sqrt{ML}} \text{Tr}\{\text{Toep}(u_x) + \text{Toep}(u_y)\} + \|\mathbf{Y} - \mathbf{X}\|_{\text{F}}^2 \right\} \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \begin{bmatrix} \text{Toep}(u_y) & \mathbf{X}^H \\ \mathbf{X} & \text{Toep}(u_x) \end{bmatrix} \succeq 0,$$

표 1 시뮬레이션 파라미터 설정

Parameter	Value
Carrier frequency f_c	24.125 GHz
Subcarrier spacing Δf	120 kHz
Time steps N	50
# of subcarrier L	128
# of antenna elements M	32
Normalization parameter ϵ	0.01
Signal-to-noise ratio	10 dB

ϵ 은 정규화 파라미터, $\mathbf{Y} = \mathbf{y}_{n,:}^i$ 는 i 번째 UE, n 번째 time slot의 수신 신호 행렬, $\text{Tr}\{\cdot\}$ 은 행렬 대각 성분들의 합, $\text{Toep}(\mathbf{u}_x), \text{Toep}(\mathbf{u}_y)$ 는 각각 첫 번째 열이 $\mathbf{u}_x, \mathbf{u}_y$ 인 Hermitian Toeplitz 행렬이다. $\|\cdot\|_F^2$ 는 행렬의 Frobenius norm, $[\cdot] \geq 0$ 은 해당 행렬이 양의 준 정부호 행렬임을 의미한다. 이후 Toeplitz 행렬의 고유값 분해를 통하여 신호를 재구성한다. 그림 1 (b)는 ANM 적용 이후 신호의 normalized PSD이다. NLoS 경로의 신호 세기 보정을 통하여 파라미터 추정 성능 저하를 극복한다. ANM 적용 이후, LoS 및 NLoS 경로의 파라미터를 고해상도로 추정 가능하다.

IV. UE Positioning and Landmark Mapping

UE 위치 추정을 위하여 LoS 경로의 파라미터를 이용한다. LoS와 NLoS 경로가 혼합되어있는 추정 파라미터 집합 $\{\hat{\tau}_n^{i,t}, \hat{\theta}_n^{i,t}\}_{t \in \{1, \dots, T_n^i\}}$ 에서 ToA가 가장 작은 쌍을 추출하여 UE 위치를 추정한다. 이때 T_n^i 은 추정된 전체 경로이다. BS의 좌표가 $\mathbf{x}_{\text{BS}} = [x_{\text{BS}}, y_{\text{BS}}]^T$ 일 때, i 번째 UE의 n 번째 time step에서 위치는 다음과 같다.

$$\mathbf{x}_{\text{UE},n}^i = \mathbf{x}_{\text{BS}} + c\hat{\tau}_n^{i,t} \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}_n^{i,\text{LoS}}) \\ \sin(\hat{\theta}_n^{i,\text{LoS}}) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

이때 c 는 빛의 속도이다. UE 위치 추정 이후, 나머지 파라미터 집합을 이용하여 IP 위치를 추정한다. NLoS의 도달 경로가 UE, IP, BS 순서인 점을 이용하여 BS를 시작점으로 하는 AoA $\hat{\theta}_n^{i,t}$ 방향의 직선과 BS와 UE의 위치를 초점으로 하는 타원의 교점을 찾아낸다. t 번째 경로의 IP 위치 $\mathbf{x}_{\text{IP},n}^{i,t}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{cases} \|\mathbf{x}_{\text{IP},n}^{i,t} - \mathbf{x}_{\text{UE},n}^i\| + \|\mathbf{x}_{\text{IP},n}^{i,t} - \mathbf{x}_{\text{BS}}\| = c\hat{\tau}_n^{i,t}, \\ (\mathbf{x}_{\text{IP},n}^{i,t} - \mathbf{x}_{\text{BS}})^T \mathbf{u}_n^{i,t} = \|\mathbf{x}_{\text{IP},n}^{i,t} - \mathbf{x}_{\text{BS}}\|, \end{cases} \quad (9)$$

이때 $\mathbf{u}_n^{i,t}$ 는 $\hat{\theta}_n^{i,t}$ 에 의한 단위 방향 벡터이다. $T_n^i - 1$ 개의 남겨진 파라미터로 IP 위치를 추정한다.

V. 시뮬레이션 결과

본 논문의 시뮬레이션은 도심 환경의 회전 교차로를 고려한다. 하나의 BS와 두 개의 UE가 존재하며, BS는 $[0,0]^T\text{m}$ 에 위치한다. 첫 번째 UE는 $[30,30]^T\text{m}$ 에서 $[30,-30]^T\text{m}$ 까지 등속도 이동하고, 두 번째 UE는 $[41,15.59]^T\text{m}$ 에서 출발하여 원형 도로를 따라 이동한다. Ground-truth 채널 데이터는 MATLAB RayTracing을 이용하여 수집하였다. 자세한 시뮬레이션 환경은 표 1에 나타나있다.

그림 2는 추정 IP 위치를 2차원 평면 상에 도시한 결과이다. ANM 적용 이전, NLoS 경로의 파라미터 추정 성능 저하로 인하여 IP 위치 추정

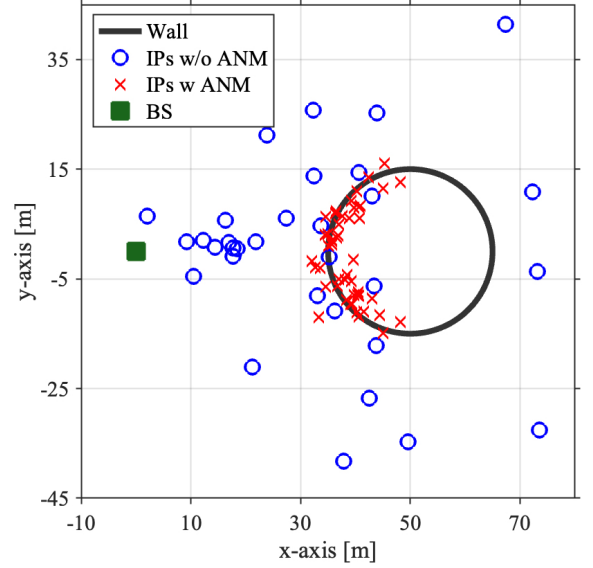


그림 2. 추정 IP 위치에 대한 2차원 시각화

성능에 한계가 존재하는 것을 확인할 수 있다. ANM 적용 이후, 파라미터 추정 성능이 향상됨에 따라 IP 위치 추정 성능이 개선됨을 확인할 수 있다. 50회의 Monte Carlo를 통하여 mean absolute error를 평가한 결과, ANM 적용 이전에는 26.80m, ANM 적용 이후에는 4.73m로 크게 감소하였다.

VI. 결론

본 논문에서는 랜드마크 위치 추정 성능 향상을 위하여 ANM 기반 알고리즘을 제안하였다. 제안 알고리즘은 ANM을 통하여 LoS와 NLoS 경로를 효과적으로 분리하고, 각 경로의 고해상도 파라미터를 추정한다. 추정한 파라미터의 기하학적 관계를 이용하여 이동체 및 IP 기반 랜드마크 위치를 추정한다. 시뮬레이션 결과, 제안 알고리즘은 NLoS 경로의 파라미터 추정 성능을 개선하여 랜드마크 위치 추정 성능 향상을 달성하였다. 이는 향후 ISAC 시스템에서 다중 경로의 분리와 고해상도 파라미터 추정을 통한 실시간 무선 센싱에 효과적으로 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF2023R1A2C3002890).

참고 문헌

- [1] A. Behravan et al., "Positioning and sensing in 6G: Gaps, challenges, and opportunities," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 18, pp. 40-48, Mar. 2023.
- [2] E. Rastorgueva-Foi et al., "Millimeter-wave radio SLAM: End-to-end processing methods and experimental validation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 42, no. 9, pp. 2550-2567, Sep. 2024.
- [3] Y. Ge et al., "Pilot-based end-to-end radio positioning and mapping for ISAC: Beyond point-based landmarks," *arXiv preprint arXiv:2505.07402*, 2025.
- [4] Y. Chi and M. F. Costa, "Harnessing Sparsity Over the Continuum: Atomic norm minimization for superresolution," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 37, pp. 39-57, Feb. 2020.
- [5] Z. Zhang, Y. Wang, and Z. Tian, "Efficient two-dimensional line spectrum estimation based on decoupled atomic norm minimization," *Signal Process.*, vol. 163, pp. 95-106, 2019.