

5G 채널 매개변수의 Fisher Information Matrix를 활용한 Random Finite Set 기반 Simultaneous Localization and Mapping

김효원, 김선우

한양대학교

{khw870511, remero}@hanyang.ac.kr

Random Finite Set-based Simultaneous Localization and Mapping with Fisher Information Matrix of 5G Channel Parameters

Hyowon Kim, and Sunwoo Kim

Department of Electronic Engineering, Hanyang University

요약

본 논문은 5G 밀리미터파 이동통신에서 다중경로 신호를 고려하는 채널 매개변수의 FIM(Fisher information matrix)를 활용하여 차량과 전파환경에 따른 TOA(time-of-arrival), AOA(angle-of-arrival), 그리고 AOD(angle-of-departure)의 측정값 오차를 계산한다. 채널 전파 환경에 따라 변하는 측정값을 활용하여 RFS(random finite set) 기반 차량 SLAM(simultaneous localization and mapping)을 수행한다. 차량 수신기는 다중경로 신호를 수신하여 채널 추정을 통해 각 경로에 대한 TOA, AOA, 그리고 AOD를 추정하고, 추정오차의 불확실성을 계산한다. 이를 이용하여 차량 상태(위치, 방향, 그리고 기지국과의 시간 동기 차이)와 밀리미터파 신호를 반사 또는 산란하는 물체의 위치를 추정하는 차량 SLAM을 진행한다. 채널 전파환경은 반사 또는 산란체로 구성되어 있으며, 수신 신호와 채널 전파환경의 불확실한 관계를 고려하기 위해 반사 또는 산란체의 위치, 그리고 다중경로신호로 얻을 수 있는 측정값은 RFS를 이용하여 모델링한다. MATLAB 시뮬레이션을 통해 채널 매개변수의 FIM을 활용한 RFS 기반 SLAM 필터의 정확도를 확인한다.

I. 서론

5G, 그리고 차세대 이동통신에서는 28GHz 이상의 고주파, 광대역 신호를 이용할 것으로 전망하고 있다[1]. 이를 통해 정확한 TOA(time-of-arrival), AOA(angle-of-arrival), AOD(angle-of-departure)를 추정 가능할 것이다. 채널 매개변수를 이용하는 SLAM(simultaneous localization and mapping) 연구가 활발히 진행되고 있고[2], 채널 매개변수 추정 성능은 밀리미터파 신호와 전파환경, 차량 위치와 매우 밀접한 관계가 있다[3]. 따라서, 채널 매개변수의 추정성능을 고려하는 SLAM 연구가 필요하다.

본 논문에서는 채널 매개변수의 FIM(Fisher information matrix)를 활용, 차량과 전파환경에 따른 TOA, AOA, 그리고 AOD의 추정 오차를 계산한다[3]. 채널 전파환경에 따른 RFS(random finite set)[4] 기반 차량 SLAM 필터의 정확도를 확인한다.

II. 매개변수의 FIM와 RFS 기반 SLAM 필터

밀리미터파를 이용한 네트워크는 그림 1과 같이 한 개의 기지국(base station, BS)이 스몰셀을 구성한다. 시간 k 에서 기지국 위치는 \mathbf{x}_{BS} 이고, 파일럿 신호를 송신한다. 그림 1과 같이 송신한 파일럿 신호는 5G 밀리미터파 채널 전파환경에 존재하는 반사체(가상기지국(virtual anchor, VA)으로 특정 가능)와 산란체(scattering point, SP)에 의해 반사되는 총 L_k 개의 신호를 수신한다. 수신신호는 다음과 같이 모델링 한다.

$$\mathbf{y}_k(t) = \mathbf{w}_k^H \sum_{l=1}^{L_k} h_{k,l} \mathbf{a}_R(\theta_{k,l}) \mathbf{a}_T(\phi_{k,l}) \mathbf{p}_k s(t) e^{-j2\pi(t-1)\Delta_f \tau_{k,l}} + \mathbf{w}_k^H \mathbf{n}_k(t), \quad (1)$$

여기서 $s_k(t)$ 는 에너지 E_s 를 갖는 파일럿 신호의 OFDM 심볼, $h_{k,l}$ 은 경로이득, Δ_f 는 부운반파 간격(sub-carrier spacing), $\mathbf{n}_k(t)$ 는 PSD가 N_0 인 가우시안 노이즈이다. 또한, \mathbf{w}_k 는 차량에서의 결합 벡터이고, \mathbf{p}_k 는 기지국에서의 프리코딩 벡터이고, 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{w}_k = \frac{1}{\sqrt{N_{UE}}} [e^{j\psi_1}, \dots, e^{j\psi_{N_{UE}}}]^T, \quad \psi_i \sim U(0, 2\pi), \quad (2)$$

$$\mathbf{p}_k = \frac{1}{\sqrt{N_{BS}}} [e^{j\varphi_1}, \dots, e^{j\varphi_{N_{BS}}}]^T, \quad \varphi_i \sim U(0, 2\pi), \quad (3)$$

여기서 N_{BS} 와 N_{UE} 는 기지국과 차량의 안테나 개수, $\mathbf{a}_T(\phi_{k,l})$ 와 $\mathbf{a}_R(\theta_{k,l})$ 는 기지국과 차량 안테나의 조향 벡터, $\tau_{k,l}$ 는 TOA, $\theta_{k,l}$ 와 $\phi_{k,l}$ 는 AOA와 AOD의 방위각과 양각이다. 전파 채널의 매개변수를 λ 로 나타내고, 전파채널의 FIM은 다음과 같이 계산한다.

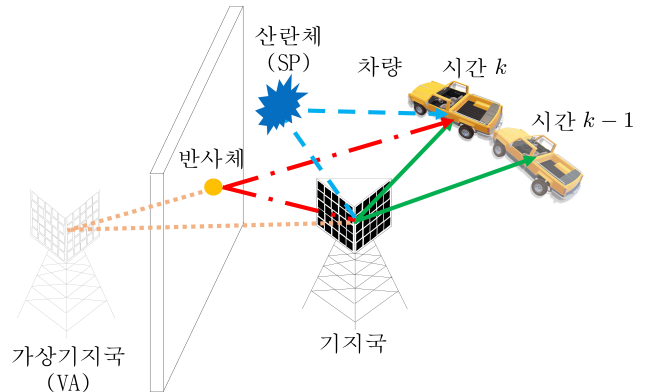


그림 1. 5G 밀리미터파 채널 전파환경(기지국, 가상기지국, 산란체)과 다중경로 수신신호 관계. 반사체를 특징하는 가상기지국과 산란체의 위치는 시간에 따라 변하지 않음.

$$\mathbf{J} = \frac{2E_s}{N_0} \sum_{k=1}^{K_0} \sum_{t=1}^{T_0} \text{Re} \left(\frac{\partial}{\partial \lambda} \tilde{\mathbf{y}}_k(t) \right) \left(\frac{\partial}{\partial \lambda} \tilde{\mathbf{y}}_k(t) \right)^H, \quad (4)$$

여기서 $\tilde{\mathbf{y}}_k(t)$ 는 수식 (1)에서 노이즈가 없는 수신신호, K_0 는 OFDM 심볼의 개수, T_0 는 부반송파 개수이다.

차량의 상태 벡터는 $\mathbf{s}_k = [\mathbf{x}_{k,v}, \alpha_k, B_k]^T$ ($\mathbf{x}_{k,v}$: 차량위치, α_k : 차량방향, B_k : 기지국과 시간동기 차이), 가상기지국의 위치는 \mathbf{x}_{VA} , 산란체의 위치는 \mathbf{x}_{SP} , 그리고 물체의 종류는 $m = \{BS, VA, SP\}$ 로 표기한다. RFS를 이용하여 물체 $X = \{(\mathbf{x}^1, m^1), \dots, (\mathbf{x}^N, m^N)\}$ 와 측정값 $Z_k = \{z_k^1, \dots, z_k^J\}$ 을 모델링 한다. 여기서 J 는 채널추정을 통해 얻을 수 있는 측정값의 개수이고, 다음과 같이 모델링 한다.

$$\mathbf{z}_k^j = \mathbf{h}(\mathbf{s}_k, \mathbf{x}, m) + \mathbf{r}_k^j \quad (5)$$

여기서, $\mathbf{h}(\cdot)$ 은 측정함수[2], $\mathbf{r}_k^j \sim N(\mathbf{0}, \mathbf{R}_k^j)$ 이고, 공분산 \mathbf{R}_k^j 은 수식 (4)에서 크기가 $5J \times 5J$ 인 \mathbf{J}^{-1} 의 대각성분으로 인해 결정된다. RFS-SLAM 사후확률밀도는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$f(\mathbf{s}_k | X | Z_k) \propto f(\mathbf{s}_k | Z_{k-1}) f(X | Z_{k-1}) g(Z_k | \mathbf{s}_k, X), \quad (6)$$

이는 RFS 이론[4]을 통해 개발되고 있는 SLAM필터를 사용하여 계산이 가능하다. 논문의 분량 제한으로 해당 수식은 생략한다.

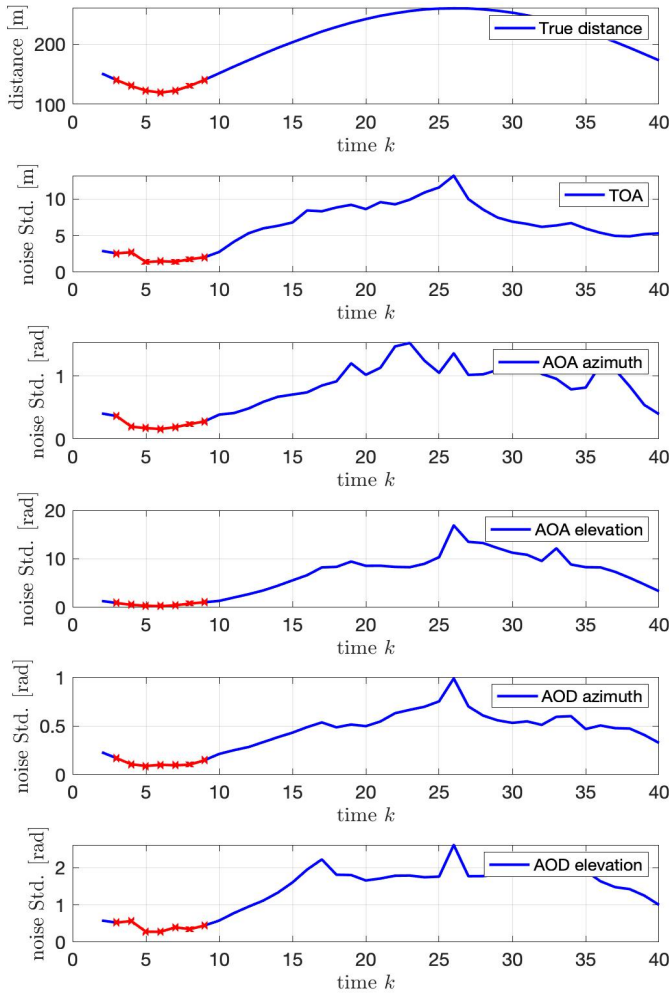


그림 2. 신호 비거리에 따라 변하는 채널 매개변수 추정 오차의 표준편차 변화 확인.

III. 시뮬레이션 및 성능평가

그림 1과 같은 스몰셀 내 기지국 1개, 반사체 4개, 그리고 산란체 4개가 위치한다. 각 반사체는 가상기지국을 특징한다. 기지국과 차량의 안테나는 UPAs(uniform planar antennas)이고, $N_{BS}=64$ 와 $N_{UE}=4$ 이다. 신호의 반송 주파수는 $f_c=28$ GHz이고, OFDM 심볼의 개수는 $K_0=64$, 부반송파 개수는 $T_0=16$, 대역폭은 $B=200$ MHz이다. 전송 전력은 $P_{BS}=5$ dBm이고, 오차의 PSD는 $N_0=174$ dBm/Hz이다. 제안하는 FIM 기반 측정값 모델의 노이즈 공분산 \mathbf{R}_k^i 는 공분산 \mathbf{R}_k^j 은 수식 (4)에서 크기가 $5J \times 5J$ 인 \mathbf{J}^{-1} 의 대각성분으로 인해 결정되고, 비교를 위한 측정값 모델의 노이즈의 기존 공분산은 $\mathbf{R}_k = \text{diag}([0.1^2, 0.01^2, 0.01^2, 0.01^2, 0.01^2])$ 이다. 이동하는 차량은 200m 내의 반사체와 50m 내의 산란체로부터 발생하는 다중경로 신호를 수신한다. 이때, 신호의 검출 확률은 $P_D=0.9$ 이고, 채널 추정 오차 또는 수 초 동안만 보이는 움직이는 물체는 오경보로 정의하며, 발생하는 개수는 평균이 1인 Poisson분포를 따른다.

그림 2는 작은 물체에 의해 산란된 신호에 대한 채널 매개변수의 추정 오차 표준편차를 나타낸다. 추정의 표준편차는 신호의 비거리에 비례하여 증감한다. 가시거리 내 산란체에 해당하는 오차 표준편차는 기존 보다 10배 이상 큰 것을 확인할 수 있었고, 반사체의 경우 기존 보다 최소 3배 이상 큰 것을 확인하였다. 이를 통해 FIM기반 현실적인 측정값을 사용하는 경우 SLAM 성능이 저하될 것임을 예상할 수 있다.

그림 3은 SLAM의 차량 측위 오차를 나타내고, 그림 4는 가상기지국(VA)과 산란체(SP)의 맵핑 오차를 나타낸다. 방위각보다 양각 추정 오차의 표준편차가 작기 때문에, 가상기지국과 산란체의 높이에 대한 추정 성능이 평면에 대한 성능보다 낮았다. 더욱이, 기존 인위적인 측정 데이터보다는 SLAM 성능이 저하되지만, 현실적인 SLAM 성능을 확인하였다.

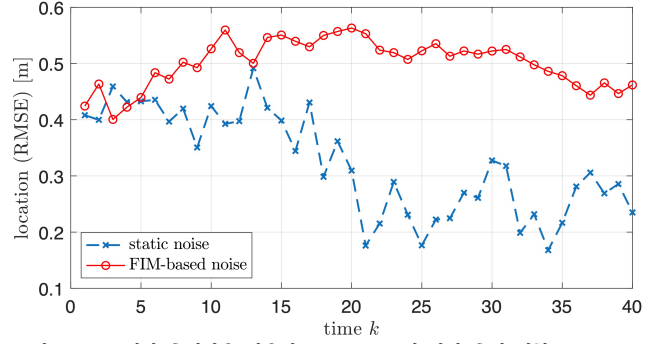
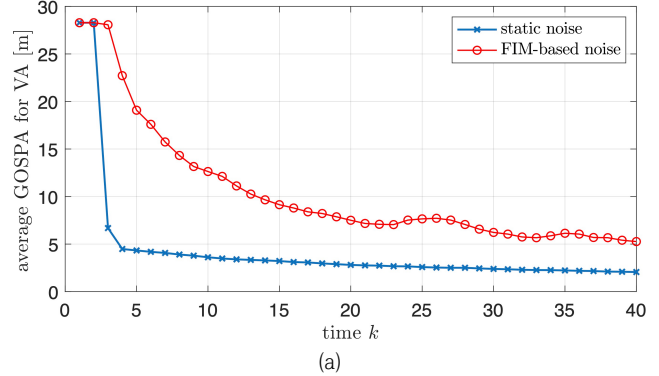
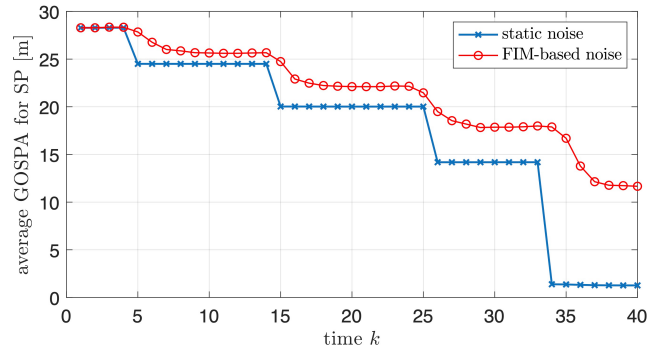


그림 3. FIM 기반 측정값을 사용한 RFS-SLAM의 차량 측위 정확도.



(a)



(b)

그림 4. FIM 기반 측정값을 사용한 RFS-SLAM의 (a) VA와 (b) SP 맵핑 정확도.

IV. 결론

본 논문에서는 5G 밀리미터파 이동통신 환경에서 다중경로 신호를 이용하여 채널 매개변수의 FIM을 계산하였고, 밀리미터파의 비거리에 따른 측정값 오차의 표준편차를 확인하였다. 또한, 채널 전파 환경과 차량의 상태에 따라 변하는 반사체와 산란체의 측정값 오차의 표준차를 이용하여 현실적인 차량 SLAM성능을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구 센터지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2021-2017-0-01637).

참고 문헌

- [1] A. Bourdoux, *et al.*, "6G white paper on localization and sensing," *arXiv:2006.01779*, 2020.
- [2] H. Kim, *et al.*, "5G mmWave cooperative positioning and mapping using multi-model PHD," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 6, pp. 3782–3795, Jun. 2020.
- [3] Z. Abu-Shaban, *et al.*, "Error bounds for uplink and downlink 3D localization in 5G mmWave systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 8, pp. 4939–4954, Aug. 2018.
- [4] R. Mahler, "Multitarget Bayes filtering via first-order multi target moments," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 39, no. 4, pp. 1152–1178, Oct. 2003.