

이동성을 고려한 밀리미터파 파티클 필터 기반 빔 추적

강정완*, 김선우°

Millimeter Wave Beam Tracking via Particle Filter under the Mobility

Jeong-wan Kang*, Sun-woo Kim°

요약

본 논문은 밀리미터파 통신 시스템에서 이동성을 고려한 파티클 필터 기반 빔 추적을 제안한다. 5세대 이동 통신은 밀리미터파 대역에서 이동성에 따른 각도 변화를 실시간으로 추정하는 빔 추적 기술이 필수적이다. 채널 상태는 단말의 위치, 속도 및 가속도를 포함하는 이동성 모델에 의해 변하며, 단말은 이산 시간 Singer-type 모델을 따른다. 채널 측정 모델은 채널 이득 및 이동성 정보에 비선형 함수이므로 파티클 필터를 이용해 빔 추적 및 채널 추정을 수행한다. 시뮬레이션을 통해 안테나 개수, 파티클 개수, 이동성에 따른 파티클 필터 기반 빔 추적 성능을 비교 분석하고, 최근 관련 연구인 확장 칼만 필터를 이용한 빔 추적과 비교하여 더 좋은 추적 성능을 보임을 확인 할 수 있다.

Key Words : beam tracking, particle filter, mobility, mmWave, MIMO, 5G

ABSTRACT

In this paper, we proposed particle filter beam tracking under the mobility in mmWave(millimeter-wave) communication system. In the 5G mobile communication, it is essential to use real-time beam tracking technology to estimate the angular change according to mobility in the mmWave band. Channel state is evolved by the mobility model which contains location, velocity and acceleration. The moving mobile follows discrete time Singer-type mobility model. Channel measurement is a nonlinear function of the channel gain and mobility information, so particle filter is proposed for mmWave mobility scenario. for beam and channel tracking in mmWave communications. In the simulation, we analysis particle filtering approach tracking performance with the number of antennas, number of particles, and mobility, and show outperforming results of particle filter approach over recently proposed EKF(extended Kalman filter) tracking approach.

1. 서론

5세대(5G) 이동 통신은 고효율 스펙트럼, 향상된 커버리지, 대규모 연결 등과 같은 높은 데이터 트래픽 기술 사항이 요구된다^{1,2}. 이런 5G의 기술 요구 사항

을 해결하기 위한 주요 후보 중 하나는 밀리미터파 통신이다^{3,4}. 밀리미터파 주파수 범위는 30~300GHz이며 28GHz, 30GHz, 60GHz 및 E 대역이 중점적으로 사용된다. 밀리미터파 통신은 높은 주파수와 넓은 주파수대역으로 높은 데이터 트래픽을 확보할 수 있

* 본 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 재원에 의해 설립된 신호정보 특화연구센터 사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

• First Author : Hanyang University Department of Electronic Engineering, rkdwjddhks77@hanyang.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Hanyang University Department of Electronic Engineering, remero@hanyang.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201905-086-A-RN, Received May 21, 2019; Revised July 1, 2019; Accepted July 4, 2019

나, 고주파수에 의한 심각한 경로 손실이 문제점으로 지적된다^{5,6}. 이를 해결하기 위한 방법으로 대형 배열 안테나를 이용한 빔포밍 기술이 주목 받고 있다.

밀리미터파 통신과 전통적인 통신 시스템의 주요 차이점은 대형 배열 안테나를 사용하며 채널 추정 및 빔 정렬에 필요한 빔포밍 기술을 제공한다는 점이다. 대형 배열 안테나는 높은 빔포밍 이득을 얻을 수 있지만, 배열 안테나의 수가 증가하면 빔 폭이 좁아지고 빔 쌍을 정렬하기가 어렵다. 특히, 밀리미터파 통신은 셀룰러 시스템, 차량 대 인프라(V2I) 및 차량 대 차량(V2V) 통신과 같은 이동 사나리오가 적용되며, 이 경우 이동성으로 인한 빔 비정렬이 매우 심각한 문제이다^{7,8}. 이를 해결하기 위해 실시간 빔 추적을 통한 빔 재 정렬이 제안되었으며, 빔 정렬 오버 헤드를 줄이기 위해 새로운 빔 추적 체계가 필요하다.

최근 위치 정보를 이용해 빔 정렬 오버헤드를 줄이는 다양한 연구가 제안되었다. 위치 정보는 밀리미터파 통신에서 빔 정렬을 위한 빔 선택 제약 조건으로 제공 될 수 있으며, 초기 액세스 및 빔 추적의 오버 헤드를 줄일 수 있다. LoS(line of sight) 경로 및 NLoS(non line of sight) 경로에서 위치 정보를 이용해 기지국-단말 간 초기 액세스의 셋업 시간을 줄이는 위치 보조 빔 선택 프로토콜이 제안되었다^{9,10}. 그 이외에 MIMO(multiple input multiple output) 시스템에서 추정된 단말의 위치 및 정위각 정보를 이용해 빔 재 정렬 오버 헤드를 줄이는 방법이 제안되었다.

오버헤드를 줄이기 위한 방법으로 필터 기반 빔 추적 알고리즘이 제안되었으며 이전 필터링 기법의 밀리미터파 채널 상태 모델은 경로 이득, 입사각, 발사각으로 구성된다. 이동 단말은 이동성 모델을 가지고 있으며, 이전의 연구는 상태 모델의 확률 분포를 통해 이동성을 기술한다. 상태 진화 모델은 선형이지만 채널 측정 모델은 일반적으로 비선형이기 때문에 추적을 위해 비선형 칼만 필터인 EKF(extended Kalman filter), UKF(unscented Kalman filter)가 제안되었다^[11-13].

본 논문에서는 밀리미터파 통신 시스템에서 이동성에 따른 파티클 필터 기반 빔 추적 알고리즘을 제안한다. 시간에 따라 변하는 밀리미터파 채널은 위치, 속도 및 가속도와 같은 단말의 운동 상태에 따라 변한다. 보다 현실적인 단말의 이동성을 구현하기 위해 이산 시간 Singer-type 모델을 적용한다¹⁴. 수신 신호는 상태 벡터의 비선형 시스템으로 표현되며 측정 모델로 사용한다. 이동성으로 인해 시스템의 비선형성이 증가해 EKF 및 UKF의 추적 성능이 저하되며, 이를

대신해 파티클 필터 기반 빔 추적을 수행한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2절에서는 이동성을 고려한 밀리미터파 통신 시스템을 설명한다. 3절에서 파티클 필터 기반 빔 추적 알고리즘을 제안한다. 4절에서는 배열 안테나 개수, 파티클 개수 및 이동성에 따른 추적 성능 평가를 수행하고 확장 칼만 필터 빔 추적 기법과 비교 분석하며 5절에서 결론에 대해 기술한다.

II. 본 론

2.1 System Model

2.1.1 Dynamic Mobility Model

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 기지국(BS)과 이동성을 가지는 이동 단말(mobile) 간의 양방향 빔포밍을 통한 상황링크 통신을 고려한다. 이동 단말은 이산 시간 Singer-type 이동성 모델을 따르며, 시간 슬롯 k 에서 단말의 이동성 벡터 \mathbf{x}_k 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{x}_k = [x_k, \dot{x}_k, \ddot{x}_k, y_k, \dot{y}_k, \ddot{y}_k]^T \quad (1)$$

위 식에서 x_k 및 y_k 는 단말의 위치, \dot{x}_k 및 \dot{y}_k 는 단말의 속도, \ddot{x}_k 및 \ddot{y}_k 는 단말의 가속도를 의미한다. 이동성 모델은 2차 미분 방정식을 따르며, 다음과 같은 선형 시간 진화 모델로 표현된다.

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B}_u\mathbf{u}_k + \mathbf{B}_v\mathbf{v}_k \quad (2)$$

이 때, 상관 행렬 \mathbf{A} , \mathbf{B}_u , \mathbf{B}_v 은 아래와 같다.

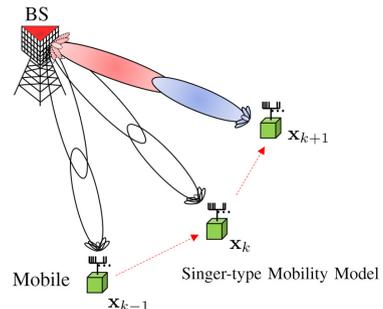


Fig. 1. Uplink communication between BS(base station) and mobile under mobility

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{A}} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \tilde{\mathbf{A}} \end{pmatrix}, \mathbf{B}_i = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{B}}_i & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} & \tilde{\mathbf{B}}_i \end{pmatrix}, i \in \{u, v\} \quad (3)$$

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \Delta t^2/2 \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & \beta \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{B}}_u = \begin{bmatrix} \Delta t^2/2 \\ \Delta t \\ 0 \end{bmatrix}, \tilde{\mathbf{B}}_v = \begin{bmatrix} \Delta t^2/2 \\ \Delta t \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

위 식에서 가속 상관계수 β 는 인접한 두 시간 사이의 가속 상관도, Δt 는 시간 간격, $\mathbf{u}_k = [u_{x,k}, u_{y,k}]^T$ 는 명령 프로세스, $\mathbf{v}_k = [v_{x,k}, v_{y,k}]^T$ 는 평균 0, 분산 σ_v^2 인 가우시안 노이즈이다. 명령 프로세스 \mathbf{u}_k 는 마르코프 연쇄 모델을 따르며, $u_{x,k}, u_{y,k}$ 은 x 방향의 가속도 레벨 집합 \mathbf{M}_x 과 y 방향의 가속도 레벨 집합 \mathbf{M}_y 으로 구성된다. 이 때, 명령 프로세스 \mathbf{u}_k 는 xy 평면 가속도 레벨 집합 $\mathbf{M} = \mathbf{M}_x \times \mathbf{M}_y = \{\mathbf{m}_1, \dots, \mathbf{m}_D\}$ 에서 전이 확률 $\pi_{i,j} = P(\mathbf{u}_k = \mathbf{m}_j | \mathbf{u}_{k-1} = \mathbf{m}_i)$, $i, j = 1, \dots, D$ 을 따라 1 차 마르코프 체인으로 모델링된다.

2.1.2 Time Varying mmWave Channel Model

본 논문은 기지국, 단말 모두 선형 배열 안테나를 탑재한 MIMO 채널을 고려한다. 이 때, Fig. 2와 같이 기지국은 안테나 개수 N_r 이동 단말은 안테나 개수 N_t 를 가지며, 배열 안테나는 서로 평행하다. 시간 k 일 때, 단말은 송신 빔포밍 벡터 \mathbf{f}_k ($\|\mathbf{f}_k\|^2 = 1$)를 사용해 참조 신호 q ($P = |q|^2$)를 송신하고, 기지국은 수신 빔포밍 벡터 \mathbf{w}_k ($\|\mathbf{w}_k\|^2 = 1$)를 통해 수신하며, 이 때 수신 신호 r_k 는 아래와 같다.

$$r_k = \mathbf{w}_k^H(\hat{\phi}_k) \mathbf{H}_k \mathbf{f}_k(\hat{\theta}_k) q + \mathbf{w}_k^H(\hat{\phi}_k) \mathbf{n}_k \quad (5)$$

위 식에서 \mathbf{H}_k 는 기지국-이동 단말 간의 채널 행렬, \mathbf{n}_k 는 백색 잡음이며, 평균 0, 분산 σ_n^2 인 가우시안 분포를 따른다. 이 때 빔포밍 벡터 $\mathbf{w}(\hat{\phi}_k)$, $\mathbf{f}(\hat{\theta}_k)$ 는 각각 송신 조사각 $\hat{\phi}_k$, 수신 조사각 $\hat{\theta}_k$ 에 따라 결정된다.

$$\mathbf{w}(\hat{\phi}_k) = \frac{1}{\sqrt{N_r}} [1, e^{j\pi \sin \hat{\phi}_k}, \dots, e^{j\pi(N_r-1) \sin \hat{\phi}_k}]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{f}(\hat{\theta}_k) = \frac{1}{\sqrt{N_t}} [1, e^{j\pi \sin \hat{\theta}_k}, \dots, e^{j\pi(N_t-1) \sin \hat{\theta}_k}]^T \quad (7)$$

기지국-이동 단말 간 채널 행렬 \mathbf{H}_k 은 시간에 따라 변하며, 다중 경로를 고려한다.

$$\mathbf{H}_k = \sqrt{N_r N_t} \sum_{l=1}^L \frac{\alpha_k^l}{\sqrt{\rho_k^l}} \mathbf{a}_r(\phi_k^l) \mathbf{a}_t^H(\theta_k^l) \quad (8)$$

α_k^l 은 l 번째 경로 이득, ρ_k^l 은 l 번째 경로 손실, ϕ_k^l 은 l 번째 경로 입사각, θ_k^l 은 l 번째 경로 발사각이며, $l = 1, \dots, L$ 이다. 이, 때 어레이 벡터 $\mathbf{a}_r(\phi_k^l)$, $\mathbf{a}_t(\theta_k^l)$ 는 아래와 같다.

$$\mathbf{a}_r(\phi_k) = \frac{1}{\sqrt{N_r}} [1, e^{j\pi \sin \phi_k}, \dots, e^{j\pi(N_r-1) \sin \phi_k}]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{a}_t(\theta_k) = \frac{1}{\sqrt{N_t}} [1, e^{j\pi \sin \theta_k}, \dots, e^{j\pi(N_t-1) \sin \theta_k}]^T \quad (10)$$

밀리미터파 통신에서 각 채널 경로는 공간적으로 분할되어 있으며, 다중 경로는 1개의 LoS(line of sight)와 $L-1$ 개의 NLoS(non line of sight)로 이루어져 있다. 이 때, NLoS에서 수신 신호는 반사 및 산란으로 인해 20dB 이상의 감쇄를 보이며, LoS 대비 매우 작은 값으로 들어온다. 송수신단의 배열 안테나를 이용한 빔포밍으로 인해 LoS는 주엽(main lobe)을 통해 송수신되며, NLoS는 부엽(side lobe)으로 빠진다. 산란 및 주엽, 부엽 간 빔포밍 이득차로 인한 경로 이득차는 NLoS 구성 요소를 잡음으로 가정하며, LoS 경로만을 밀리미터파 통신에서 높은 전송 속도에 대한 신뢰성을 제공 할 수 있다고 가정한다.

LoS($l = 1$) 채널 경로만을 고려한 수신 신호는 아래와 같다.

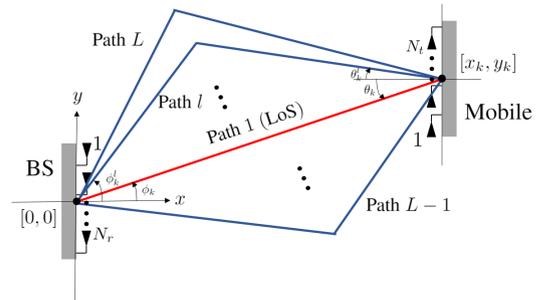


Fig. 2. Two dimensional illustration of the LoS (red link) and NLoS (blue link) path

$$r_k = \sqrt{N_r N_t} \frac{\alpha_k}{\sqrt{\rho_k}} \mathbf{w}_k^H(\hat{\phi}_k) \mathbf{a}_r(\phi_k) \mathbf{a}_t^H(\theta_k) \mathbf{f}_k(\hat{\theta}_k) q + n_k \quad (11)$$

위 식에서, α_k 는 경로 이득, $\rho_k = (x_k^2 + y_k^2)^\eta$ 은 통신 거리 기반 경로 감쇄, ϕ_k 은 입사각, θ_k 은 발사각, n_k 은 평균 0, 분산 σ_n^2 인 가우시안 노이즈이다. 채널 경로 이득 α_k 은 1차 가우스-마르코프 모델을 따른다.

$$\alpha_k^i = \mu \alpha_{k-1}^i + \xi_k \quad (12)$$

위 식에서 μ 는 채널 이득 상관 계수, ξ_k 는 평균 0, 분산 $1 - \mu^2$ 인 가우시안 노이즈, $i \in \{R, I\}$ 이다. 이 때, 초기 채널 이득 α_0^i 는 평균 0, 분산 1/2인 가우시안 분포를 따른다. Fig. 2에 보인 바와 같이, 배열 안테나는 서로 평행하며, 이 때 입사각 ϕ_k 와 발사각 θ_k 는 서로 같으며, 기지국의 위치가 원점이라고 가정할 때, 각도 ϕ_k, θ_k 는 이동 단말의 위치 정보로 구해진다.

$$\phi_k = \theta_k = \tan^{-1} \left(\frac{y_k}{x_k} \right) \quad (13)$$

2.2 Beam Tracking Algorithm via Particle Filter

밀리미터파 통신은 고주파 대역으로 인한 심각한 감쇄를 보상하기 위해 배열 안테나를 이용한 빔포밍 기술이 필수적이다. 빔포밍은 높은 지향성을 가지며 어레이 안테나의 수가 증가함에 따라 빔 폭은 더 좁아지고 지향성은 더 강해진다. 일반적으로 광대역 MIMO 시스템은 고 지향성 빔포밍을 사용하는 다중 배열 안테나를 가지며 밀리미터파 통신에 사용된다. 이 시스템은 높은 통신 용량과 이득을 가지고 있지만 잘못된 빔 조정은 통신 환경에 치명적이다. 일반적으로 빔 훈련을 통해 빔을 정렬하지만, V2I 통신의 경우 차량의 위치가 단시간에 변하고 빔이 통신 블록마다 재배열되므로 데이터 오버 헤드 문제가 발생한다.

이 문제를 해결하기 위해, 우리는 추정 모델에 의해 수신 신호를 사용하는 파티클 필터 기반 빔 추적 알고리즘을 제안한다. 본 논문의 추정 모델은 상태 벡터의 비선형 함수이며, 비선형 시스템에 적합한 몬테카를로 기법을 사용한다. 파티클 필터는 베이저안 프레임워크 내에서 상태 벡터의 순차적인 추정을 고려하여 상태 벡터 \mathbf{s}_k 를 조건부 확률 밀도 함수로부터 구하는 비선

형 베이저안 필터이다. 따라서 본 논문에서는 파티클 필터를 이용해 비선형 시스템에서 채널 정보를 추정하고 빔 추적을 수행한다.

2.2.1 Channel State Model

밀리미터파 채널에서 채널 추정을 파라미터는 경로 이득 α_k , 입사각 ϕ_k , 발사각 θ_k 이다. 각도 ϕ_k, θ_k 는 이동 단말의 위치 정보로부터 구해지며 채널 상태 벡터 \mathbf{s}_k 는 각도 및 위치 정보로 구성된다.

$$\mathbf{s}_k = [\alpha_k^R, \alpha_k^I, x_k, y_k]^T \quad (14)$$

경로 이득 $\alpha_k = \alpha_k^R + j\alpha_k^I$ 는 파라미터가 복소수일 때 생기는 구현 문제를 피하기 위해 실수부와 허수부로 나누어 사용한다. 상태 진화 모델은 아래 식을 따른다.

$$\mathbf{s}_k = \mathbf{F}\mathbf{s}_{k-1} + \mathbf{G}\mathbf{u}_k + \mathbf{v}_k \quad (15)$$

위 식에서, \mathbf{F}, \mathbf{G} 는 계수 행렬, \mathbf{v}_k 는 평균 0, 분산 $\Sigma_v = \text{diag}([1 - \mu^2, 1 - \mu^2, (\Delta T^2/2)^2 \sigma_v^2, (\Delta T^2/2)^2 \sigma_v^2])$ 인 가우시안 노이즈이다. 계수 행렬 \mathbf{F}, \mathbf{G} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \Delta T^2/2 \\ \Delta T^2/2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

2.2.2 Sequential Monte Carlo Estimation

파티클 필터는 예측 단계, 업데이트 단계로 구성된다. 예측 단계에서, 파티클 상태벡터는 식 (15)의 진화 모델을 따라 다음과 같이 샘플링된다.

$$\mathbf{s}_{k,s} \sim p(\mathbf{s}_{k,s} | \mathbf{s}_{k-1,s}, z_{1:k}) \quad (17)$$

위 식에서 $z_{1:k} = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$ 은 추정 모델 z_k 의 집합, $\mathbf{s}_{k,s}$ 는 s 번 째 입사이며, 초기 파티클 상태벡터 $\mathbf{s}_{0,s}$ 는 평균 \mathbf{s}_0 , 분산 Σ_0 인 가우시안 분포를 따른다. 식 (11)의 수신 신호 r_k 는 입사각 ϕ_k , 발사각 θ_k , 경로 이득 α_k 에 의해 결정되며, 본 논문에서는 수신 신호 r_k 를 추정 모델 z_k 로 고려하며, 상태 벡터 \mathbf{s}_k 의 비선형 함수 $h(\cdot)$ 에 노이즈가 더해진다.

$$z_k = r_k = h(\mathbf{s}_k) + n_k \quad (18)$$

업데이트 단계에서, 각 입자 가중치 $\omega_{k,s}$ 는 이전 입자 가중치 $\omega_{k-1,s}$ 와 우도 함수 $p(r_k|\mathbf{s}_{k,s})$ 의 곱으로 표현된다.

$$\omega_{k,s} = \omega_{k-1,s} p(r_k|\mathbf{s}_{k,s}) \quad (19)$$

이 때, 우도 함수 $p(r_k|\mathbf{s}_{k,s})$ 는 평균 $h(\mathbf{s}_{k,s})$, 분산 σ_n^2 인 가우시안 분포를 따른다.

$$p(r_k|\mathbf{s}_{k,s}) = \frac{1}{\pi\sigma_n^2} e^{-\frac{(r_k - h(\mathbf{s}_{k,s}))^2}{\sigma_n^2}} \quad (20)$$

사후 상태 벡터 $\hat{\mathbf{s}}_k$ 는 진화 모델을 따라 예측된 파티클 입자 $\mathbf{s}_{k,s}$ 와 가중치 $\omega_{k,s}$ 의 곱으로 표현된다.

$$\hat{\mathbf{s}}_k = \sum_{s=1}^S \hat{\omega}_{k,s} \mathbf{s}_{k,s} \quad (21)$$

위 식에서 $\hat{\omega}_{k,s} = \omega_{k,s} / \sum_{s=1}^S \omega_{k,s}$ 은 정규화된 입자 가중치 $\omega_{k,s}$ 이다.

만약 $N_{eff,k} < N_{th}$ 일 경우, 리샘플링을 통해 낮은 가중치를 갖는 입자를 제거하고 높은 가중치를 갖는 입자를 복제하여 MCMC(Markov chain Monte Carlo) 과정을 거쳐 입자를 재추출한다. 이 때, 유효 샘플 크기 $N_{eff,k}$ 는 다음과 같다.

$$N_{eff,k} = 1 / \sum_{s=1}^S (\omega_{k,s})^2 \quad (22)$$

III. 실험

본 논문에서는 초기 채널 정보는 완벽하게 주어졌다고 가정하며, 초기 상태 벡터는 $\hat{\mathbf{s}}_0 = [\alpha_0^R, \alpha_0^I, x_0, y_0]^T$ 이다. 이동성 모델의 시간 간격 Δt 는 100ms, 가속 상관 계수 β 는 0.6, $\sigma_v = 0.1m/s^2$ 이다. 이 때, 명령 프로세스 $\mathbf{u}_k \in \{[0,0], [-r,0], [r,0], [0,-r], [0,r]\}$ 이며 전이 확률은 $\pi_{i,j} = 0.6$ 이다. 밀리미터파 채널은 소규모 페이딩에 영향이 거의 없기 때문에 경로 이득 상관 계수 μ 는 0.995로 설정한다. SNR(signal to noise ratio)

는 $SNR = \|\mathbf{w}_k^H(\hat{\phi}_k) \mathbf{H}_k \mathbf{f}_k(\hat{\theta}_k)\|^2 P/\sigma_n^2$ 로 표현되며 10 dB로 설정한다. 파티클 수에 따른 임계 샘플 크기는 $N_{th} = 2S/3$ 이다.

Table. 1은 확장 칼만 필터와 파티클 필터 빔 추적 알고리즘의 연산 수 ($\times, +$)와 계산 복잡도(CC)를 보여준다. 연산 수 ($\times, +$)와 계산 복잡도(CC)는 상태 벡터 차원 D , 파티클 수 S , 함수 O 로 표현된다. 파티클 필터 빔 추적 알고리즘이 확장 칼만 필터 알고리즘 대비 더 높은 계산 복잡도를 가짐을 확인할 수 있다.

우리는 배열 안테나 개수에 따른 파티클 필터 빔 추적 성능을 확장 칼만 필터와 비교 분석한다. 단말의 이동성은 $r = 10m/s^2$ 으로 고정하고, 송수신 안테나 N_r, N_t 는 서로 N 으로 같으며 $N = 8, 16, 32$ 에 따른 빔 추적 성능이 Fig. 3에 나와 있다. 파티클 필터 추적 알고리즘이 확장 칼만 필터 대비 시스템의 비선형성에 적합하여 추적 성능이 더 높음을 Fig. 3을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 3을 보면 배열 안테나 개수가 증가함에 따라 빔 추적 오차가 작아짐을 확인할 수 있는데 이는 빔 폭이 좁아지고 빔 이득이 증가하기 때문이다. 빔 폭이 좁아지면 각도에 따른 측정 모델 변화량이 커지고, 실제 각도에 유사한 값을 갖는 파티클 입자의 우도 함수가 매우 큰 값을 갖는다. 업데이트 단계에서 각 파티클 입자 가중치는 우도 함수에 비례하며, 이는 높은 신뢰도가 높은 입자 수의 증가로 빔 추적 성능을 향상시킨다.

Fig. 4는 파티클 입자 수에 따른 파티클 필터 빔 추적 성능을 확장 칼만 필터에 비교 분석한다.

단말의 이동성 $r = 10m/s^2$, 안테나 개수 $N = 32$ 이며, 파티클 입자 수 $S = 200, 500, 1000, 2000$ 이다. 파티클 입자 수가 증가함에 따라 추적 성능이 향상되며, 확장 칼만 필터 대비 파티클 필터 성능이 높음을 Fig. 4를 통해 확인할 수 있다. 하지만, 파티클 입자 수가 증가하면 파티클 필터 빔 추적 알고리즘의 계산 복잡도가 증가하며 계산 복잡도와 추적 성능 간의 최적값을 갖는 파티클 입자 수를 결정하는 게 중요하다.

우리는 단말의 이동성에 따른 빔 추적 성능을 비교

Table 1. Required number of operation($\times, +$) and computational complexity(CC)

	\times	$+$	CC
EKF	$11D$	$5D$	$O(D)$
PF	$3DS$	$3DS$	$O(DS)$

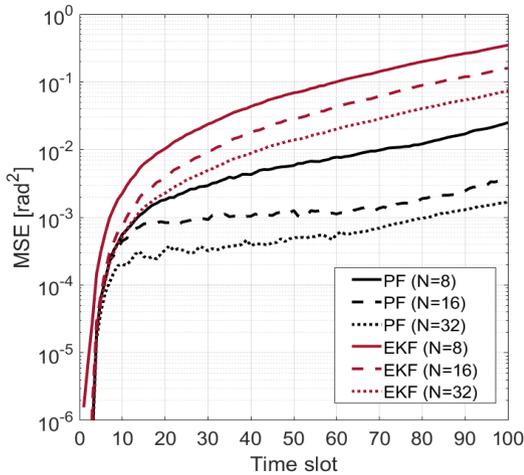


Fig. 3. Beam tracking MSE versus time slot for $N=8,16,32$ ($r=10m/s^2$, $S=1000$)

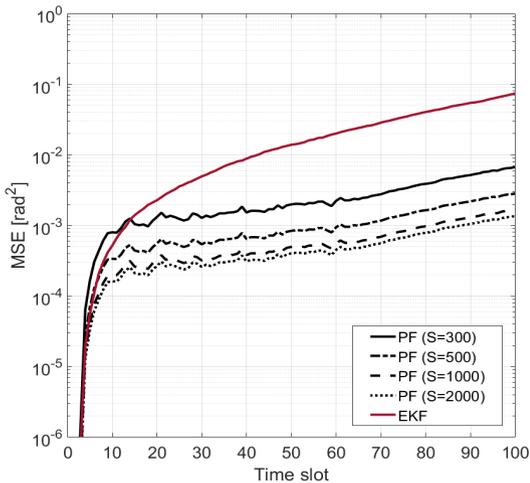


Fig. 4. Beam tracking MSE versus time slot for $S=300,500,1000,2000$ ($r=10m/s^2$, $N=32$)

분석한다. 단말의 이동성은 r 에 의해 결정되며 안테나 개수가 16개일 때, $r=5,10,20,40[m/s^2]$ 에 따른 빔 추적 성능이 Fig. 5에 나와 있다. Fig. 5를 보면, r 이 커짐에 따라 추적 오차가 증가함을 볼 수 있다. r 이 커짐에 따라 단말의 이동성이 증가하고 예측 단계에서 파티클 입자가 더 넓은 범위로 퍼져 샘플링된다. 일부 입자는 주엽을 벗어나며 매우 작은 빔 이득값으로 무의미한 관측값을 생성하고 신뢰도가 높은 입자수의 감소로 빔 추적 능력을 저하시켜 추적 오차가 발산한다.

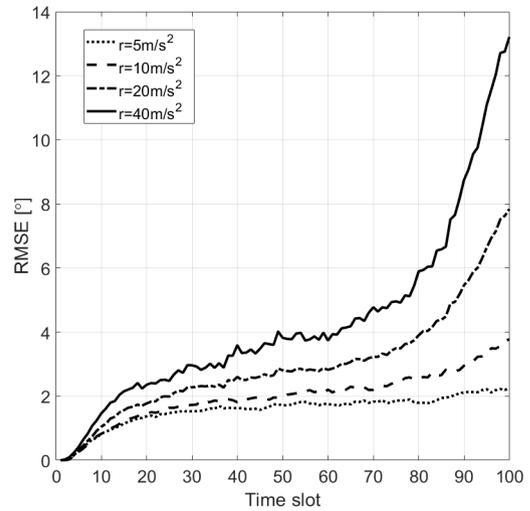


Fig. 5. Beam tracking RMSE versus time slot for $r=5,10,20,40[m/s^2]$ ($N=16, S=1000$)

IV. 결론

본 논문에서 우리는 밀리미터파 통신 이동성 시나리오에서 파티클 필터를 이용한 빔 추적을 제안하였다. 파티클 필터는 단말의 이동성을 따라 위치 정보를 추정하고 실제 방향과 근사하게 빔 추적을 수행함을 확인했다. 더불어 제안 방법은 확장 칼만 필터 빔 추적 기법 대비 빔 포밍 각도에서의 정렬 오차를 효과적으로 줄여 채널 재 획득을 필요로 하지 않고 기지국-단말 통신 링크를 더 길게 유지할 수 있음을 보여준다.

References

- [1] A. Yadav, O. A. Dobre, and N. Ansari, "Energy and traffic aware full-duplex communications for 5G systems," *IEEE Access*, vol. 5, no. 1, pp. 11278-11290, May 2017.
- [2] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. Soong, and J. C. Zhang, "What will 5G be?" *IEEE JSAC*, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, Jun. 2014.
- [3] T. S. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. N. Wong, J. K. Schulz, M. Samimi, and F. Gutierrez Jr., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular:

- It will work!” *IEEE Access*, vol. 1, no. 1, pp. 335-349, May 2013.
- [4] Z. Pi and F. Khan, “An introduction to millimeter-wave mobile broad-band systems,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 6, pp. 101-107, Jun. 2011.
- [5] M. Marcus and B. Pattan, “Millimeter wave propagation: Spectrum management implications,” *IEEE Microwave Mag.*, vol. 6, no. 2, pp. 54-62, Jun. 2005.
- [6] T. S. Rappaport, G. R. MacCartney, S. Sun, H. Yan, and S. Deng, “Small-scale, local area, and transitional millimeter wave propagation for 5G communications,” *IEEE Trans. Ant. and Propag.*, vol. 65, no. 12, pp. 6474-6490, Aug. 2017.
- [7] H. Kim, K. Kang, H. Seo, M. Jeong, J. Choi, J. Kang and S. Kim, “5G and Unmanned Vehicle Technology Development and Future Vision,” *KICS (Information&Communications Magazine)*, vol. 34, no. 7, pp. 54-60, Jun. 2017.
- [8] L. Kong, M. K. Khan, F. Wu, G. Chen, and P. Zeng, “Millimeter-wave wireless communications for iot-cloud supported autonomous vehicles: Overview, design, and challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 1, pp. 62-68, 2017.
- [9] G. E. Garcia, G. Seco-Granados, E. Karipidis, and H. Wymeersch, “Transmitter beam selection in millimeter-wave MIMO with in band position aiding,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 9, pp. 6082-6092, Jul. 2018.
- [10] N. Garcia, H. Wymeersch, E. G. Ström, and D. Slock, “Location-aided mm-wave channel estimation for vehicular communication,” in *Proc. SPAWC*, pp. 1-5, Edinburgh, UK, Aug. 2016.
- [11] C. Zhang, D. Guo, and P. Fan, “Tracking angles of departure and arrival in a mobile millimeter wave channel,” in *Proc. IEEE ICC*, pp. 1-6, Kuala Lumpur, Malaysia, Jul. 2016.
- [12] V. Va, H. Vikalo, and R. W. Heath, “Beam tracking for mobile millimeter wave communication systems,” in *GlobalSIP*, pp. 743-747, Washington, DC, USA, Dec. 2016.
- [13] X. Gao, L. Dai, Y. Zhang, T. Xie, X. Dai, and Z. Wang, “Fast channel tracking for terahertz beamspace massive MIMO systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 7, pp. 5689-5696, Jul. 2017.
- [14] J. Kang, I. Orikumhi, Y. Park, and S. Kim, “A Millimeter wave beam tracking in vehicular scenario via particle filter,” in *Proc. 2018 IC-NIDC*, pp. 1-5, Nov. 2018.

강 정 완 (Jeong-wan Kang)

2017년 : 한양대학교 융합전자공학 학사

2017년~현재 : 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석박통합과정

<관심분야> 밀리미터파 통신시스템, 대규모 MIMO 시스템, 5G/B5G 통신시스템, 무선신호처리

[ORCID:0000-0002-1708-1690]

김 선 우 (Sun-woo Kim)

1992년 : 한양대학교 전자, 전자통신, 전파공학 학사

2002년 : University of California, Santa Barbara, ECE, 석사

2005년 : University of California, Santa Barbara, ECE, 박사

2005년~현재 : 한양대학교 융합전자공학부 교수

2017년~현재 : 대학 ICT 연구센터, 5G/무인이동체 융합기술 연구센터, 센터장

<관심분야> 무선측위시스템, 무선신호처리, 5G/B5G 통신시스템

[ORCID:0000-0002-7055-6587]