

Joint Localization and Velocity Estimation for Pulse Radar in the Nearfield Environments

Nakyung Lee, Hyunwoo Park, Daesung Park, Bukeun Byeon, Sunwoo Kim[†]



Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Joint Localization and Velocity Estimation for Pulse Radar in the Near-field Environments

Nakyung Lee¹, Hyunwoo Park¹, Daesung Park², Bukeun Byeon², Sunwoo Kim^{1†}

¹Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

²Avionics Radar System Team, Hanwha Systems, Yongin, Gyeonggi-do 17121, Korea

ABSTRACT

In this paper, we propose an algorithm that jointly estimates the location and velocity of a near-field moving target in a pulse radar system. The proposed algorithm estimates the location and velocity corresponding to the outcome of orthogonal matching pursuit (OMP) in a 4-dimensional (4D) location-velocity space. To address the high computational complexity of 4D parameter joint estimation, we propose an algorithm that iteratively estimates the target's 2D location and velocity sequentially. Through simulations, we analyze the estimation performance and verify the computational efficiency of the proposed algorithm.

Keywords: radar, near-field, localization, velocity estimation

1. 서론

레이다 시스템은 물체의 위치, 거리, 속도 등을 감지하며 군사, 항공 우주, 운송 등 다양한 분야에서 중요한 역할을 수행한다 (Skolnik 1980). 레이다 시스템에서는 이동 표적의 위치, 속도, 도플러 주파수 등을 추정하는 표적 상태 추정 기술들이 제안되었다 (Xu et al. 2008, He et al. 2010, Hassanien et al. 2012). 하지만, 기존 표적 상태 추정 기술들은 주로 신호의 평면파 가정이 가능한 far-field 환경을 고려하여 구면파 신호가 발생하는 near-field 환경에서 성능 저하가 발생한다 (Grosicki et al. 2005, Cui & Dai 2022). 특히, 최근 활발히 개발된 스텔스 기술을 갖춘 소형 unmanned aerial vehicle (UAV)은 (Lin 2014, Oh et al. 2019, Shin et al. 2020) radar cross section (RCS)이 작아 탐지가 어려우므로 쉽게 near-field 범위 내로 접근이 가능하다 (Ritchie et al.

2015, Hao et al. 2023). 따라서, near-field 환경에서도 표적 상태를 정확하게 추정할 수 있는 표적 상태 추정 연구의 필요성이 높아지고 있다.

지난 몇 년간 레이다 시스템에서 near-field 표적의 위치를 추정하기 위한 연구가 진행되었다. Belfiori et al. (2012)은 표적의 range 및 각도의 공동 추정을 위하여 multiple signal classification을 제안하였으나, 2-dimensional (2D) 스펙트럼 탐색을 필요로 하여 계산 복잡도가 높다는 단점이 존재한다. Knudde et al. (2017)은 낮은 signal-to-noise ratio (SNR)에도 높은 정확도로 이동 표적의 위치를 추정하기 위하여 Kalman filter를 사용하였으나 실내 환경에 국한되어 연구되었다. Zhang et al. (2023)은 높은 계산 복잡도와 그리드 불일치 문제를 해결하기 위하여 improved compressive sensing 기반 다중 표적 위치 추정 알고리즘을 제안하였다. 하지만, 이러한 연구들은 표적의 이동성으로 발생하는 도플러 효과를 고려하지 않아 위치 추정 오차가 발생할 수 있다.

도플러 효과로 인한 위치 추정 오차 문제를 해결하기 위하여 near-field 환경에서 표적의 위치 및 속도를 공동 추정하는 방법들이 연구되고 있다. Chen et al. (2004)은 여러 near-field 표적의 range, 도래각 및 주파수를 공동으로 추정하기 위하여 4차 cumulant 기반 알고리즘을 제안하였지만, 이는 passive 센싱 시나리오에만 적용할 수 있다. de Carnières et al. (2019)은 이산 위치-속도 영역에서 희박한 표적 신호를 기반으로 이동 표적을 탐

Received Aug 15 2023 Revised Aug 20, 2023 Accepted Aug 26, 2023

[†]Corresponding Author

E-mail: remero@hanyang.ac.kr

Tel: +82-2-2220-4822

Nakyung Lee <https://orcid.org/0009-0007-8637-6074>

Hyunwoo Park <https://orcid.org/0000-0002-9095-4283>

Daesung Park <https://orcid.org/0000-0001-9853-6927>

Bukeun Byeon <https://orcid.org/0009-0008-1817-2325>

Sunwoo Kim <https://orcid.org/0000-0002-7055-6587>

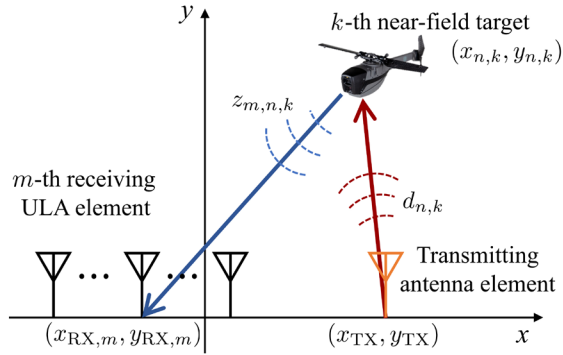


Fig. 1. Location of the target and transmitting/receiving antenna in the near-field environment.

지하는 기법을 제안하였다. 하지만, 이러한 연구들은 전력 효율성이 낮은 frequency modulated continuous wave (FMCW) 레이더 시스템에만 적용이 가능하다. FMCW 레이더 대비 전력 효율성이 높은 펄스 레이더 시스템에서 표적과 레이더가 근접한 near-field 환경을 고려하는 표적의 위치 및 속도 추정 연구는 전무하다.

본 논문에서는 펄스 레이더를 사용하여 near-field 이동 표적의 위치 및 속도를 공동 추정하는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 표적의 4D 위치-속도 공간에서 파워 스펙트럼의 최대값에 해당하는 위치 및 속도를 추정하는 것을 목표로 한다. 4D 매개변수 공동 추정으로 인한 높은 계산 복잡도 문제를 해결하기 위하여 2D 위치 및 속도를 순차적으로 반복 추정하는 2D 탐색 기법을 제안한다. 2D 탐색의 반복 횟수에 따른 파워 스펙트럼 출력을 통하여 표적의 상태를 추정하고 추정한 위치 및 속도를 실제와 비교하여 제안 알고리즘의 성능을 분석한다. 또한, SNR에 따라서 표적 상태 추정 root mean square error (RMSE)를 분석하고 파워 스펙트럼 분해능에 따른 계산 시간을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 시스템 모델을 제시하고, 3장에서는 위치 및 속도 공동 추정 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 제안한 알고리즘의 성능 평가를 위하여 시뮬레이션을 제시하고 결과를 분석한다. 마지막으로 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델

본 논문에서는 Fig. 1과 같이 펄스 레이더 시스템에서 2D 평면에서 이동하는 K 개의 표적 상태를 추정하는 상황을 고려한다. k 번째 표적 상태 $\mathbf{x}_k = (x_k, y_k, \dot{x}_k, \dot{y}_k)$ 이며, 여기서 x_k, y_k 는 표적의 위치, $\dot{x}_k, \dot{y}_k$ 는 표적의 속도이다. 레이더는 1개의 송신 안테나와 M 개의 원소로 이루어진 uniform linear array (ULA) 안테나를 사용하며 송신 안테나는 (x_{TX}, y_{TX}) , 수신 안테나의 m 번째 원소는 $(x_{RX, m}, y_{RX, m})$ 에 위치한다. 펄스 레이더는 pulse repetition interval (PRI) 값이 T 인 펄스 신호를 송수신하며 Fig. 2와 같은 3차원 수신신호 데이터 큐브를 이용하여 표적 상태를 추정한다. 여기서 데이터 큐브는 M 개의 배열 안테나 원소에 coherent

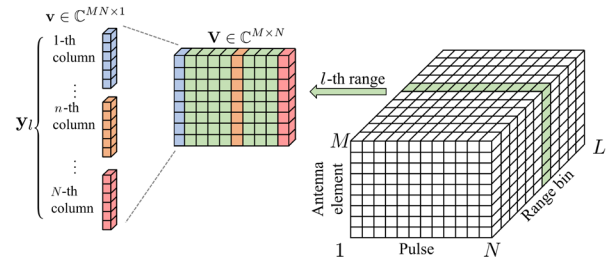


Fig. 2. Radar data cube for space-time signal processing.

processing interval 동안 수신되는 N 개의 펄스 응답을 L 개의 range bin에 따라서 저장한 형태이다. 시공간 신호 처리를 위하여 각 range bin의 $M \times N$ 행렬은 $MN \times 1$ 차원으로 벡터화되며 이를 시공간 스냅샷이라 한다. l 번째 range bin의 시공간 스냅샷 $\mathbf{y}_l$ 은 Eq. (1)과 같다.

$$\mathbf{y}_l = \sum_{k=1}^K \alpha_k \mathbf{v}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{n}_l \in \mathbb{C}^{MN \times 1}, \quad (1)$$

여기서 α_k 는 경로 손실과 RCS에 비례하는 k 번째 표적의 채널 이득, $\mathbf{v}(\mathbf{x}_k)$ 는 k 번째 표적의 시공간 조향 벡터, $\mathbf{n}_l \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}_{MN \times 1}, \sigma_n^2 \mathbf{I}_{MN})$ 은 l 번째 range의 잡음이다. k 번째 표적의 시공간 조향 벡터 $\mathbf{v}(\mathbf{x}_k)$ 는 매니폴드 행렬 $\mathbf{V}(\mathbf{x}_k) \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 를 벡터화한 형태이며, Eqs. (2, 3)과 같다.

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}_k) = \text{vec}(\mathbf{V}(\mathbf{x}_k)) = [v_{1,1} \ v_{2,1} \ \cdots \ v_{M,N}]^T, \quad (2)$$

$$\mathbf{V}(\mathbf{x}_k) = \begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & \cdots & v_{1,N} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & \cdots & v_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{M,1} & v_{M,2} & \cdots & v_{M,N} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

송신 안테나 원소를 (x_{TX}, y_{TX}) , 수신 안테나 m 번째 원소의 위치를 $(x_{RX, m}, y_{RX, m})$ 라 할 때, near-field 환경에서의 안테나 응답 $v_{m,n}$ 은 Eq. (4)와 같다.

$$v_{m,n} = \frac{1}{d_{n,k} z_{m,n,k}} \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} (d_{n,k} + z_{m,n,k})\right), \quad (4)$$

여기서 λ 는 송신신호의 파장이고, $d_{n,k}$ 는 k 번째 표적과 송신 안테나 간 거리이며, $z_{m,n,k}$ 는 k 번째 표적과 m 번째 수신 안테나 원소 간 거리이다. $d_{n,k}$ 와 $z_{m,n,k}$ 는 각각 Eqs. (5, 6)과 같다.

$$d_{n,k} = \sqrt{(x_{n,k} - x_{TX})^2 + (y_{n,k} - y_{TX})^2}, \quad (5)$$

$$z_{m,n,k} = \sqrt{(x_{n,k} - x_{RX, m})^2 + (y_{n,k} - y_{RX, m})^2}. \quad (6)$$

여기서 k 번째 표적의 n 번째 펄스에 대한 위치 $(x_{n,k}, y_{n,k})$ 는 Eqs. (7, 8)과 같다.

$$x_{n,k} = x_k + \dot{x}_k(n-1)T, \quad (7)$$

$$y_{n,k} = y_k + \dot{y}_k(n-1)T. \quad (8)$$

3. 위치 및 속도 공동 추정 알고리즘

제안하는 알고리즘은 orthogonal matching pursuit (OMP)

Table 1. 4D-OMP algorithm.

Algorithm 1: 4D-OMP for multi-target state estimation	
Input: $\mathbf{A}, \mathbf{y}_l$	
Output: $\mathbf{t}_K$	
Initialization: $\mathbf{y}_l^0 = \mathbf{y}_l, \mathbf{\Lambda}_0 = \emptyset$;	
for $k=1, 2, \dots, K$ do	
step 1. $\beta_k = \arg \max_{p,q,r,s} \mathbf{v}^H((x_p, y_q, \dot{x}_r, \dot{y}_s)) \mathbf{y}_l^{k-1} $;	
step 2. $\mathbf{\Lambda}_k = \mathbf{\Lambda}_k \cup \{\beta_k\}$;	
step 3. $\mathbf{t}_k(i \in \mathbf{\Lambda}_k) = \arg \min_t \ \mathbf{A}_{\mathbf{\Lambda}_k} \mathbf{t} - \mathbf{y}_l\ $, $\mathbf{t}_k(i \notin \mathbf{\Lambda}_k) = 0$;	
step 4. $\mathbf{y}_l^k = \mathbf{y}_l - \mathbf{A} \mathbf{t}_k$	
end	

을 사용하여 표적의 위치 및 속도를 추정하는 것을 목표로 한다. OMP는 입력 데이터와 사전 정보가 있을 때, 희소 벡터를 추정하는 알고리즘이다 (Cai & Wang 2011). 표적 상태 추정에 적용하면 입력 데이터는 수신신호 $\mathbf{y}_l \in \mathbb{C}^{MN \times 1}$ 가 되고 사전 정보는 모든 스펙트럼 범위에서의 시공간 조향 행렬 $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{MN \times PQRS}$ 가 된다. 여기서 P, Q, R, S 는 각각 $x, y, \dot{x}, \dot{y}$ 축 그리드 수이다. 추정하고자 하는 희소 벡터는 표적의 시공간 상태 벡터 $\mathbf{t} \in \mathbb{C}^{PQRS \times 1}$ 이며 $\mathbf{y}_l$ 과의 관계는 Eq. (9)와 같다.

$$\mathbf{y}_l = \mathbf{A} \mathbf{t} + \mathbf{n}_l. \quad (9)$$

4D 위치 및 속도 공간에서 OMP 알고리즘 순서는 Table 1과 같다. 먼저, step 1에서 k 번째 표적의 4D 위치-속도 공간 파워 스펙트럼의 최대값에 해당하는 상태 β_k 를 추정한다. 이후, 앞서 구한 β_k 를 기반으로 step 2에서 k 번째 표적의 추정 상태 β_k 를 추정 상태 집합 $\mathbf{\Lambda}_k$ 에 업데이트한다. 업데이트한 $\mathbf{\Lambda}_k$ 를 기반으로 step 3에서 k 번째 표적의 추정 상태에 따른 신호 $\mathbf{A}_{\mathbf{\Lambda}_k} \mathbf{t}$ 와 수신신호 $\mathbf{y}_l$ 간의 차이가 최소화되는 표적의 시공간 상태 벡터 $\mathbf{t}_k$ 를 추정한다. 마지막으로, 수신신호 $\mathbf{y}_l$ 에서 step 3까지 추정된 k 번째 표적 신호를 제외한 잔여 신호 $\mathbf{y}_l^k$ 을 도출한다. 이러한 과정을 K 번 반복한다. 4D OMP는 step 1에서 많은 계산 시간을 요구하기에 이동 표적의 상태를 추정하는 본 논문의 시나리오에는 적합하지 않다. 높은 계산 복잡도를 해결하기 위하여 step 1을 대신하여 2D 위치 및 속도를 순차적으로 추정하는 2D 탐색 기법을 제안한다. 순차적 2D 탐색 기법은 다음의 두가지 과정을 반복한다. 먼저, 초기 추정 속도 $(\dot{x}_p, \dot{y}_s)$ 를 고정하여 위치 파워 스펙트럼의 최대값에 해당하는 x, y 값을 표적의 위치로 추정한다. 이 후, 앞서 구한 추정 위치를 고정하고 속도에 대한 파워 스펙트럼의 최대값에 해당하는 x, y 값을 표적의 속도로 추정한다.

$$\hat{p}, \hat{q} = \arg \max_{p,q} |\mathbf{v}^H((x_p, y_q, \dot{x}_p, \dot{y}_s)) \mathbf{y}_l^{k-1}|, \quad (10)$$

$$\hat{r}, \hat{s} = \arg \max_{r,s} |\mathbf{v}^H((x_{\hat{p}}, y_{\hat{q}}, \dot{x}_r, \dot{y}_s)) \mathbf{y}_l^{k-1}|. \quad (11)$$

순차적 2D 탐색 방법은 Eqs. (10, 11)을 순차적으로 반복하여 $\hat{p}, \hat{q}, \hat{r}, \hat{s}$ 를 업데이트, 이후 Eq. (12)를 따른다.

$$\beta_k = [\hat{p}, \hat{q}, \hat{r}, \hat{s}]^T. \quad (12)$$

표적의 초기 추정 속도는 실제 속도를 모르는 상황이므로 $(\dot{x}_p, \dot{y}_s) = (0, 0)$ 으로 설정한다. 따라서 초기 반복 시 2D 위치 추정 시 오차 발생 확률이 높다. 하지만 순차적 반복 탐색은 앞서 추정

한 위치 및 속도를 이용하여 다음의 위치 및 속도를 추정하여 반복이 진행될수록 추정 오차는 감소한다. 따라서 제안하는 알고리즘은 반복을 수행하지 않는 2D 탐색 기법에 비하여 추정 정확도를 향상시키는 동시에 4D 탐색에 비하여 계산 시간을 획기적으로 줄일 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 시뮬레이션 환경을 설명하고 제안하는 알고리즘의 표적 상태 추정 결과 및 성능을 4D 탐색 기법과 비교하여 분석한다.

4.1 시뮬레이션 환경 설정

시뮬레이션 시나리오에서 펄스 레이더의 송신 안테나는 $(x_{TX}, y_{TX}) = (2, 0)$ [m]에 위치하고 수신 ULA 안테나의 중심은 원점에 존재하며 각 원소는 x 축 위에 반파장 $(\lambda/2)$ 간격으로 위치한다. 레이더의 반송파 주파수 f_c 는 10 [GHz], 파장 λ 는 약 0.03 [m], PRI $T = 0.1$ [ms]이다. 레이더 데이터 큐브를 구성하는 안테나 원소 수 M 은 128, 펄스 수 N 은 16, range bin 수 L 은 100이다. 이때의 Rayleigh distance에 따른 near-field 거리는 약 242 [m]이다. 즉, 레이더로부터 242 [m] 거리 내에 있는 표적들은 구면파 신호가 발생하는 near-field 범위 내에 존재한다. K 개의 표적은 x, y 축 각각 $[-50, 50]$ [m], $[1, 100]$ [m], 속도는 $[-10, 10]$ [m/s] 범위 내에 존재한다.

4.2 시뮬레이션 결과 분석

제안 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 반복 횟수에 따른 2D 탐색 결과 추정 위치 및 속도를 실제와 비교한다. 위치 및 속도의 스펙트럼 범위는 표적의 가능한 상태 범위와 동일하게 설정하였다. Fig. 3은 $(x_i, y_i, \dot{x}_i, \dot{y}_i) = (40, 60, -5, 8)$ 표적 1과 $(x_s, y_s, \dot{x}_s, \dot{y}_s) = (-25, 65, 7, -5)$ 표적 2에 대하여 출력한 2D 탐색 결과이다. 여기서 위치 및 속도 범위는 각각 0.5 [m], 0.5 [m/s] 간격으로 설정하였다. 첫번째 2D 탐색 (Iter.=1) 결과, 추정 위치 및 속도 모두 실제 상태와 큰 차이를 보인다. 특히, Fig. 3a에서 2D 탐색 (Iter.=1)은 속도를 고려하지 않고 위치를 추정한 결과를 나타내어 위치 추정 오차가 크다. 2D 탐색 초기 반복 시 고정된 초기 추정 속도 $(\dot{x}_p, \dot{y}_s) = (0, 0)$ 는 표적 1, 2 속도와는 모두 다른 값이므로 Fig. 3a에서 $k=1, 2$ 표적에 대한 파워 스펙트럼이 모두 나타난다. 이와 달리, 2D 탐색 (Iter.=2) 결과, 추정 위치 및 속도는 2D 탐색 (Iter.=1) 결과에 비하여 실제 상태와의 차이가 감소하며 (Iter.=3)에서 더욱 줄어든다. 또한, 이전 반복에서 구한 $k=1$ 표적의 추정 속도를 이용하여 위치를 추정하므로 $k=2$ 표적에 비하여 $k=1$ 표적에 대한 파워 스펙트럼이 매우 강하게 나타난다. 따라서 순차적 탐색을 반복할 수록 표적 상태 추정 정확도가 증가함을 확인하였다. Figs. 3g-l은 $k=1$ 표적의 성분을 제거한 후 $k=2$ 표적에 대한 2D 탐색 추정 결과이다. 마찬가지로 순차적 탐색을 반복할 수록 정확도가 증가함을 확인 가능하다.

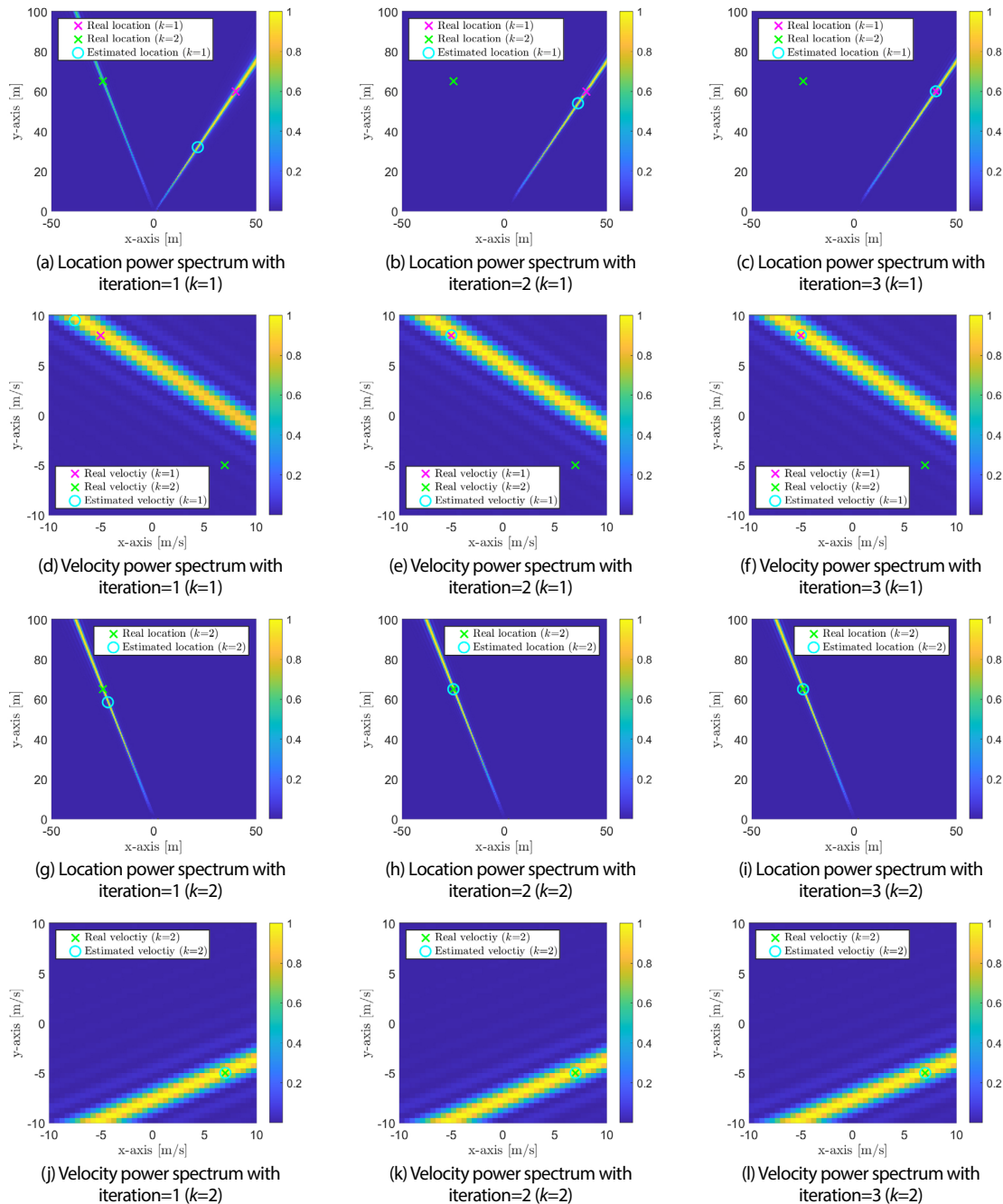


Fig. 3. 2D search results for 2 targets, top: $k=1$, bottom: $k=2$.

신호 잡음 세기에 따른 제안 알고리즘 RMSE 성능 분석을 위하여 SNR 환경에 따라서 1,000 회의 서로 다른 표적 상태 추정 시뮬레이션을 진행하였다. Fig. 4a는 SNR에 따른 표적 위치 추정 RMSE, Fig. 4b는 SNR에 따른 표적 속도 추정 RMSE이다. 시뮬레이션 결과, 2D 탐색의 반복을 진행할수록 표적의 위치 및 속도 추정 RMSE가 감소하여 4D 탐색의 RMSE와 가까워지는 결과를 보인다.

Fig. 5는 위치 및 속도 파워 스펙트럼의 그리드 간격에 따른 계산 시간을 보여준다. 시뮬레이션에 사용한 장비는 Intel i5-10400

CPU이다. 모든 알고리즘은 그리드 간격이 줄어들수록 탐색 그리드 수가 증가하여 계산 시간이 증가하는 경향을 보인다. 제안하는 2D 탐색 기법은 순차적 탐색을 반복하더라도 4D 탐색에 비하여 계산 시간이 현저히 짧다. 4D 탐색 기법은 표적 상태 추정 정확도가 높지만 계산 시간이 매우 길어 near-field 이동 표적에 대한 실시간 상태 추정이 어려울 것으로 보인다. 따라서, 제안하는 2D 탐색의 순차적 반복 추정을 통하여 표적의 상태를 시간효율적으로 추정할 수 있다.

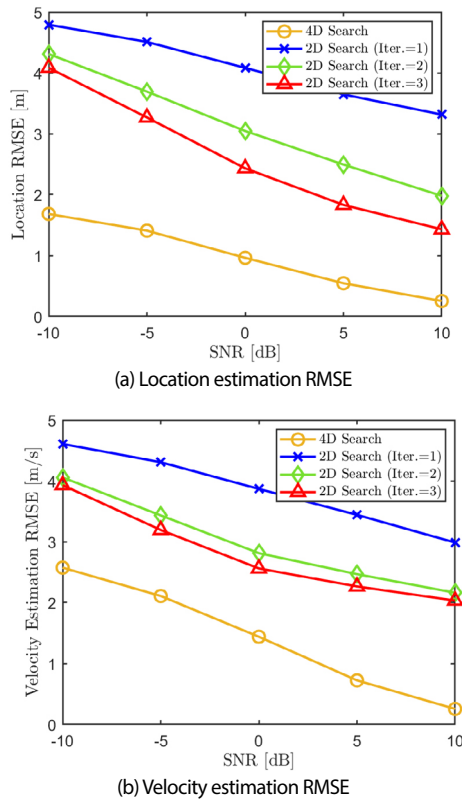


Fig. 4. Location and velocity estimation RMSE for SNR.

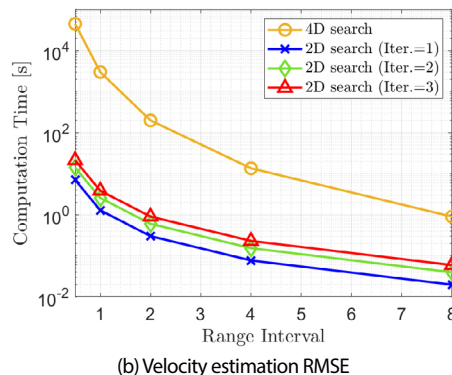


Fig. 5. Computation time for the range interval of power spectrum.

5. 결론

본 논문에서는 near-field 환경에서 펄스 레이더를 사용하여 이동 표적의 위치 및 속도를 공동으로 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 4차원 매개변수 공동 추정으로 인한 높은 계산 복잡도 문제를 해결하기 위하여 제안하는 2D 탐색 알고리즘은 표적의 위치 및 속도를 순차적으로 반복 추정한다. 시뮬레이션 결과 제안하는 알고리즘의 순차적 탐색 반복 수를 증가함에 따라 표적 상태 추정 정확도가 증가하며, 4D 탐색 기법에 비하여 계산 복잡도 측면에서 우수한 성능을 자랑한다. 이를 통하여 제안 알고리즘은 near-field 이동 표적의 실시간 상태 추정에 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 2023년도 한화시스템(주)으로부터 재원을 지원받아 수행된 연구임.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Conceptualization, N. Lee and H. Park; methodology, N. Lee, H. Park and S. Kim; software, N. Lee and H. Park.; validation, N. Lee, H. Park, D. Park, B. Byeon and S. Kim; formal analysis, N. Lee, H. Park and S. Kim; investigation, N. Lee and H. Park; resources, D. Park and B. Byeon; data curation, N. Lee, H. Park and S. Kim; writing—original draft preparation, N. Lee; writing—review and editing, N. Lee, H. Park and S. Kim; visualization, N. Lee, H. Park and S. Kim; supervision, S. Kim; project administration, S. Kim; funding acquisition, S. Kim.

CONFLICTS OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

REFERENCES

- Belfiori, F., van Rossum, W., & Hoogeboom, P. 2012, 2D-MUSIC technique applied to a coherent FMCW MIMO radar, IET International Conference on Radar Systems (Radar 2012), Glasgow, UK, 22-25 Oct. 2012, pp.1-6. <https://doi.org/10.1049/cp.2012.1564>
- Cai, T. T. & Wang, L. 2011, Orthogonal matching pursuit for sparse signal recovery with noise, IEEE Transactions on Information theory, 57, 4680-4688. <https://doi.org/10.1109/TIT.2011.2146090>
- Chen, J. F., Zhu, X. L., & Zhang, X. D. 2004, A new algorithm for joint range-DOA-frequency estimation of near-field sources, EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2004, 105173. <https://doi.org/10.1155/S1110865704310152>
- Cui, M. & Dai, L. 2022, Channel estimation for extremely large-scale MIMO: Far-field or near-field?, IEEE Transactions on Communications, 70, 2663-2677. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3146400>
- de Carnières, G. M. D. G., Feuillen, T., Jacques, L., & Vandendorpe, L. 2019, Sparsity-driven moving target detection in distributed multistatic FMCW radars, 2019 IEEE 8th International Workshop on Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive

- Processing (CAMSAP), Le Gosier, Guadeloupe, 15-18 Dec. 2019, pp.151-155. <https://doi.org/10.1109/CAMSAP45676.2019.9022656>.
- Grosicki, E., Abed-Meraim, K., & Hua, Y. 2005, A weighted linear prediction method for near-field source localization, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 53, 3651-3660. <https://doi.org/10.1109/TSP.2005.855100>
- Hao, W., Chen, G., Li, Y., & Hou, Y. 2023, Analysis of RCS characteristics in dynamic flight of stealth UAV, 2023 IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI), 26-28 May 2023, Changchun, China, pp.1208-1212. <https://doi.org/10.1109/ICETCI57876.2023.10176877>
- Hassanien, A., Vorobyov, S. A., & Gershman, A. B. 2012, Moving target parameters estimation in noncoherent MIMO radar systems, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 60, 2354-2361. <https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2187290>
- He, Q., Blum, R. S., & Haimovich, A. M. 2010, Noncoherent MIMO radar for location and velocity estimation: More antennas means better performance, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 58, 3661-3680. <https://doi.org/10.1109/TSP.2010.2044613>
- Knudde, N., Vandersmissen, B., Parashar, K., Couckuyt, I., Jalalvand, A., et al. 2017, Indoor tracking of multiple persons with a 77 GHz MIMO FMCW radar, 2017 European Radar Conference (EURAD), Nuremberg, Germany, 11-13 Oct. 2017, pp.61-64. <https://doi.org/10.23919/EURAD.2017.8249147>
- Lin, G. M. 2014, Research on shape stealth technology of military aircraft, *Journal of Aerospace Science and Technology*, 2, 26-33.
- Oh, J., Choe, D., Yun, C., Kim, J., & Hopmeier, M. 2019, Towards the development and realization of an undetectable stealth UAV, 2019 Third IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), 25-27 Feb. 2019, Naples, Italy, pp.459-464. <https://doi.org/10.1109/IRC.2019.00097>
- Ritchie, M., Fioranelli, F., Griffiths, H., & Torvik, B. 2015, Micro-drone RCS analysis, 2015 IEEE Radar Conference, 27-30 Oct. 2015, Johannesburg, South Africa, pp.452-456. <https://doi.org/10.1109/RadarConf.2015.7411926>
- Shin, D., Kim, H., Gong, J., Jeong, U. & Jo, Y., et al. 2020, Stealth UAV through Coandă effect, 2020 Fourth IEEE International Conference on Robotic Computing (IRC), 9-11 Nov. 2020, Taichung, Taiwan, pp.202-209. <https://doi.org/10.1109/IRC.2020.00040>
- Skolnik, M. I. 1980, Introduction to radar systems (New York: McGraw-Hill).
- Xu, L., Li, J. & Stoica, P. 2008, Target detection and parameter estimation for MIMO radar systems, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 44, 927-939. <https://doi.org/10.1109/TAES.2008.4655353>
- Zhang, Z., Jiang, J., Liu, X., & Suo, H. 2023, Super-resolution localization of moving target based on improved compressive sensing algorithm, 2023 6th International Symposium on Autonomous Systems (ISAS), 23-25 June 2023, Nanjing, China, pp.1-6. <https://doi.org/10.1109/ISAS59543.2023.10164403>



Nakyung Lee received her B.S. degree in Sookmyung Women's University, Seoul, South Korea, in 2023, from the Department of Electronics Engineering. She is currently pursuing the combined M.S. and Ph.D. degree in the Department of Electronic Engineering, Hanyang University, Seoul, South Korea. Her research interests include radar signal processing, ground moving target indication, and localization.



Hyunwoo Park received the B.S. degree in electronic engineering from Hanyang University, Seoul, South Korea, in 2020. He is currently pursuing the combined M.S. and Ph.D. degrees in the Department of Electronics and Computer Engineering, Hanyang University. His current research interests include machine learning-based wireless communication and signal processing.



Daesung Park received the B.S. and M.S. in the Department of Radio Science Engineering from Hanyang University, Seoul, South Korea in 1997 and 1999 each. He received the Ph.D. in the Department of Electronic Engineering from Hanyang University, Seoul, South Korea in 2022. He is a chief engineer at Hanwha Systems, South Korea since 2003. His research interests are radar system and AESA radar technology.



Bukeun Byeon is a senior engineer Avionics Radar System Team, Hanwha Systems in South Korea. He received the B.S. and M.S. in the Department of Electronic and Electrical Engineering from Hongik University, Seoul, South Korea. His research interests are radar signal processing and advancing

aerospace technology.



Sunwoo Kim received his B.S. degree from Hanyang University, Seoul, Korea in 1999, and his Ph.D. degree, in 2005, from the Department of Electrical and Computer Engineering, University of California, Santa Barbara. Since 2005, he has been working in the Department of Electronic Engineering at Hanyang University, Seoul, Korea, where he is currently a professor. He is also the director of the 5G/Unmanned Vehicle Research Center, funded by the Ministry of Science and ICT of Korea. He was a visiting scholar to the Laboratory for Information and Decision Systems, Massachusetts Institute of Technology from 2018 to 2019. He is an Associate Editor of IEEE Transactions on Vehicular Technology and a senior member of the IEEE. His research interests include wireless communication/positioning/localization, statistical signal processing.

