

# ISAC 시스템 센싱 성능 향상을 위한 주파수 필터링 기반 클러터 억제 알고리즘

이나경, 박현우, 김한빛, 김선우  
한양대학교 융합전자공학과

{nagyeong2379, stark95, dante0813, remero}@hanyang.ac.kr

## Frequency Filtering-based Clutter Suppression Algorithm to Improve Sensing Performance for ISAC systems

Nakyung Lee, Hyunwoo Park, Hanvit Kim, and Sunwoo Kim  
Department of Electronic Engineering, Hanyang University

### 요약

본 논문에서는 ISAC (integrated sensing and communication) 시스템을 위하여 클러터가 존재하는 상황에서 이동 타겟의 각도와 속도를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 실제 센싱 환경에서 ISAC 시스템은 클러터에 의하여 센싱 성능이 저하되므로 센싱 성능을 향상하기 위해서는 클러터 억제가 필수적이다. 클러터 환경을 고려한 ISAC 연구는 spatial 영역에서 모든 클러터의 반사 계수 및 방향, 또는 클러터 공분산 행렬 정보가 요구되므로 실제 적용에 적합하지 않다. 본 논문은 Doppler 주파수 영역에서 high-pass 필터를 사용하여 클러터를 억제하고 타겟의 각도 및 속도를 추정하는 알고리즘을 제안한다. MATLAB 시뮬레이션을 통하여 제안 알고리즘의 파워 스펙트럼을 출력하였으며 제안 알고리즘을 통하여 타겟 센싱 정확도가 향상함을 보인다.

### I. 서론

통신 시스템의 주파수가 높아짐에 따라 레이더 시스템의 주파수와 겹쳐 ISAC (integrated sensing and communication) 시스템이 6G를 위한 새로운 연구 주제로 각광받고 있다 [1]. ISAC을 위한 타겟 센싱 연구들은 주로 이동 타겟 신호 수신만 고려하였으나 실제 적용에서는 건물, 나무 등 원하지 않은 물체에 반사된 신호, 즉 클러터에 반사된 수신 신호도 포함된다 [2]. 따라서, ISAC 시스템에서 타겟 센싱 성능을 높이기 위해서는 클러터 억제가 필수적이다. 클러터 환경을 고려한 ISAC 연구가 일부 진행되었지만 [3-5] spatial 영역에서 모든 클러터의 반사 계수 및 방향, 또는 클러터 공분산 행렬 정보가 요구되므로 실제 적용에 적합하지 않다. 본 논문에서는 ISAC 시스템의 이동 타겟 센싱 성능을 향상시키기 위하여 Doppler 주파수 영역으로 클러터를 필터링하여 클러터를 억제하고 타겟 센싱 성능을 분석한다.

### II. 배열 안테나 기반 ISAC 신호 모델

원소  $M$ 개의 ULA (uniform linear antenna)로 구성된 BS (base station)가 carrier frequency  $f_0$ , subcarrier interval  $\Delta f$ 를 가지는 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 신호를 송신하는 상황을 가정하자.  $l$ -th OFDM subcarrier는  $l = 0, 1, \dots, L-1$ 에 대하여  $f_l = f_0 + l\Delta f$ 의 주파수를 가진다. 매 scanning stage에서 BS는 각각  $N$ 개의 symbol로 구성된  $Q$ 개의 time slot 동안 센싱을 진행한다. 각 time slot은 하나의 빔에 대응되며, 여기서 time slot duration  $T_0 = NT_s$ , symbol duration  $T_s = 1/\Delta f$ 이다.  $K$ 개의 타겟을 센싱하는 시나리오에서  $q$ -th time slot,  $n$ -th OFDM symbol의  $l$ -th subcarrier 송신 신호  $\mathbf{x}_{q,n,l}$ 은 식 (1)과 같다.

$$\mathbf{x}_{q,n,l} = \mathbf{w}_q s_{n,l}^q = \sqrt{\rho_q P_{TX}} \mathbf{M} \mathbf{a}(\Theta_q) s_{n,l}^q \quad (1)$$

여기서,  $\mathbf{w}_q$ 는 센싱 스캐닝 각도  $\Theta_q$ 에 대한 센싱 빔포밍 벡터,  $s_{n,l}^q$ 은 단위 전력을 갖도록 정규화된 센싱 신호이고  $\rho_q$ 와  $P_{TX}$ 는 각각 power allocation factor, BS의 송신 전력이다.  $\mathbf{a}(\theta)$ 는 각도  $\theta$ 에 대한 조향벡터이며 식 (2)와 같다.

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{j2\pi f_0 d \sin\theta/c}, \dots, e^{j2\pi f_0 (M-1)d \sin\theta/c}]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1}, \quad (2)$$

$c$ 는 빛의 속도,  $d$ 는 안테나 간 간격이며 송수신 신호 주파수의 반파장으로 설정하였다.  $q$ -th time slot에서 BS가 수신한  $n$ -th OFDM

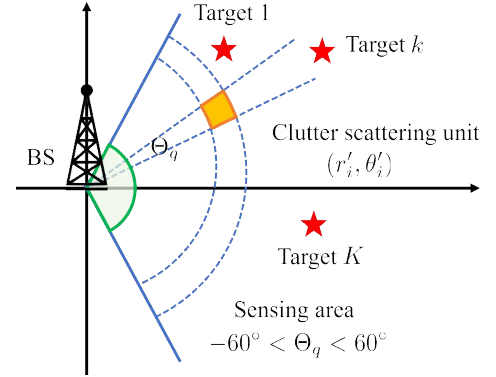


그림 1 고정 클러터 및 이동 타겟 개략도

symbol의  $l$ -th subcarrier echo 신호  $y_{n,l}^q$ 은 식 (3)과 같다.

$$y_{n,l}^q = \mathbf{w}_q^H \mathbf{H}_{n,l} \mathbf{x}_{q,n,l} + n_{n,l}^q \quad (3)$$

여기서,  $n_{n,l}^q$ 은 잡음 벡터이다.  $\mathbf{H}_{n,l}$ 은 센싱 echo 채널 행렬이며, 식 (4)와 같이  $k$ -th 타겟 echo 채널 행렬  $\mathbf{H}_{k,n,l}$ 과  $i$ -th 클러터 echo 채널 행렬  $\mathbf{H}'_{i,n,l}$ 로 구성된다.

$$\mathbf{H}_{n,l} = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{k,n,l} + \sum_{i=1}^I \mathbf{H}'_{i,n,l} \quad (4)$$

그림 1과 같이  $(r_k, \theta_k)$ 에 위치하고  $v_k$  속도로 이동하는  $k$ -th 타겟 echo 채널 행렬과  $(r'_i, \theta'_i)$ 에 위치하는  $i$ -th 클러터 echo 채널 행렬은 각각 식 (5), (6)과 같다.

$$\mathbf{H}_{k,n,l} = \alpha_k e^{j2\pi f_0 2v_k n T_s / c} e^{-j2\pi f_l 2r_k / c} \mathbf{a}(\theta_k) \mathbf{a}^H(\theta_k), \quad (5)$$

$$\mathbf{H}'_{i,n,l} = \beta_i e^{-j2\pi f_l 2r'_i / c} \mathbf{a}(\theta'_i) \mathbf{a}^H(\theta'_i). \quad (6)$$

최종적으로, echo 신호  $y_{n,l}^q$ 을  $(q,n,l)$ -th 원소로 하는 텐서  $\mathbf{Y}_{\text{cube}}[q,n,l] = y_{n,l}^q \in \mathbb{C}^{Q \times N \times L}$ 을 저장한다.

### III. 주파수 필터링 기반 클러터 억제 알고리즘

제안 알고리즘은 클러터가 타겟과 달리 이동성을 가지지 않다는 점을 활용하여 주파수 영역에서 echo 텐서를 필터링해 클러터를 제거한다.

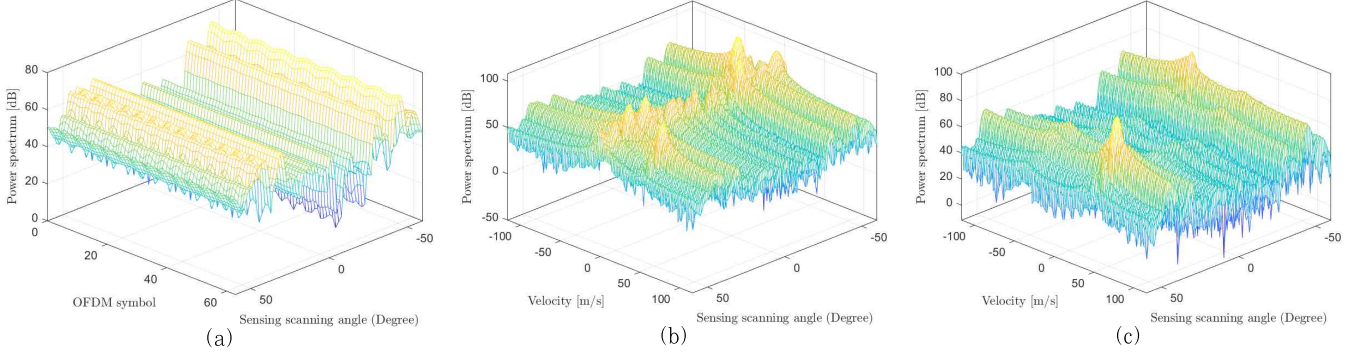


그림 2 파워 스펙트럼 (SNR=20 dB) (a) 원시 echo 신호 (b) 원시 echo 신호에서 FFT를 수행한 angle-Doppler spectrum (c) 클러터 필터링 적용

클러터 echo 채널 행렬은 OFDM symbol 차원에 대하여 불변하지만 타겟 echo 채널 행렬의 OFDM symbol 차원은 이동 타겟의 속도 정보를 포함한다. Echo 텐서  $\mathbf{Y}_{\text{cube}}$ 을 OFDM symbol에 대하여  $N$ -point FFT (fast Fourier transform)을 수행하여 출력된 angle-Doppler spectrum에서 클러터는 velocity=0 부근에 존재한다. Angle-Doppler spectrum은 식 (7)과 같다.

$$\tilde{\mathbf{Y}}_{\text{cube}} = \text{FFT}\{\mathbf{Y}_{\text{cube}}, N, 2\}, \quad (7)$$

여기서,  $\text{FFT}\{\mathbf{Y}_{\text{cube}}, N, 2\}$ 는  $\mathbf{Y}_{\text{cube}}$ 의 두 번째 차원에 대하여  $N$ -point FFT 수행을 나타낸다. 이때, OFDM symbol 차원은 속도 차원으로 변환된다. 이후, angle-Doppler spectrum  $\tilde{\mathbf{Y}}_{\text{cube}}$ 에 대하여 FIR (finite impulse response) high-pass 필터를 설계한다. Velocity>0 범위의 스펙트럼을 타겟이라 판단하여 통과시키고 velocity=0 범위의 스펙트럼은 클러터로 판단하여 필터링한다. 최종적으로 필터링을 수행한 스펙트럼의 피크값 탐색을 통하여 타겟의 각도와 속도를 추정한다.

#### IV. 시뮬레이션 시나리오 및 결과

제안 알고리즘 성능 분석을 위하여 표 1과 같이 시뮬레이션 환경을 설정하였다. 타겟 1의 x, y축 위치는 (70, 70) m, 각도는 45°, 이동속도는 50 m/s이고 타겟 2의 x, y축 위치는 (50, -50) m, 각도는 -45°, 이동속도는 -30 m/s인 상황으로 설정하였다.

그림 2는 수신 신호 및 제안 알고리즘을 적용한 파워 스펙트럼 결과이다. 여기서, SNR (signal-to-noise ratio)은 20 dB로 설정하였다. 그림 2(a)는 클러터와 타겟이 공존하는 원시 echo 신호를 센싱 스캐닝 각도와 OFDM symbol에 대하여 출력된 파워 스펙트럼이다. 그림 2(b)는 복소 신호인 echo 신호에 대하여 FFT를 수행한 angle-Doppler spectrum이며, OFDM symbol 축을 속도 축으로 변환하였다. 여전히 클러터와 타겟이 공존하는 상황이며 velocity=0 부근에서 클러터 스펙트럼이 출력되었다. 그림 2(c)는 angle-Doppler spectrum에서 FIR high-pass 필터링을 수행한 파워 스펙트럼이다. 본 논문에서는 속도 축에

대하여 normalized 차단 주파수 0.3을 가진 50차 FIR high-pass 필터를 설계하였다. 그림 2(c)는 클러터가 제거되어 타겟에 의한 두 개의 피크가 출력된다. 타겟 각도 및 속도 추정 결과, 타겟 1은  $\theta_1 = 45^\circ$ ,  $v_1 = 50$  m/s로 추정되고 타겟 2는  $\theta_2 = -45^\circ$ ,  $v_2 = -30$  m/s로 추정되었다. 클러터 억제 시, 클러터에 의하여 발생하는 스펙트럼의 피크값이 제거되어 타겟의 각도 및 속도 추정 정확도가 높아짐을 확인하였다.

#### V. 결론

본 논문에서는 ISAC 시스템을 위하여 클러터가 존재하는 상황에서 이동 타겟의 각도와 속도를 추정하는 알고리즘을 제안하고 타겟 센싱 성능 분석을 진행하였다. 제안 알고리즘은 echo 신호에 대해 FFT를 수행하여 OFDM symbol 축을 속도 축으로 변환한 후, FIR high-pass 필터를 사용하여 velocity=0 부근에 존재하는 클러터를 필터링하였다. 시뮬레이션 결과, 원시 echo 신호의 파워 스펙트럼은 클러터와 타겟이 공존하여 타겟 탐지가 어렵지만 제안 알고리즘 적용 후에는 클러터 억제를 통하여 타겟의 각도 및 속도 추정 정확도가 향상됨을 확인하였다.

#### ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2023R1A2C3002890).

#### 참고 문헌

- [1] F. Liu et al., "Integrated Sensing and Communications: Toward Dual-Functional Wireless Networks for 6G and Beyond," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 6, pp. 1728-1767, June 2022.
- [2] H. Luo et al., "Integrated Sensing and Communications in Clutter Environment," *IEEE Trans. Wireless Commun. (Early Access)*, Mar. 2024.
- [3] N. Su, Z. Wei and C. Masouros, "Secure Dual-Functional Radar-Communication System via Exploiting Known Interference in the Presence of Clutter," *IEEE Signal Process. Adv. Wireless Commun. (SPAWC)*, Sep. 2021.
- [4] C. Liao, F. Wang and V. K. N. Lau, "Optimized Design for IRS-Assisted Integrated Sensing and Communication Systems in Clutter Environments," *IEEE Trans. Commun.*, Aug. 2023.
- [5] R. Liu, M. Li, Q. Liu and A. L. Swindlehurst, "Joint Waveform and Filter Designs for STAP-SLP-Based MIMO-DFRC Systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 40, no. 6, pp. 1918-1931, June 2022.

표 1. 시뮬레이션 매개변수

매개변수	값
Carrier frequency $f_0$	77 [GHz]
안테나 원소 수 $M$	32
OFDM symbol 수 $N$	64
OFDM subcarrier 수 $L$	128
Subcarrier spacing $\Delta f$	120 [kHz]
센싱 스캐닝 각도	(-60, 60)°
센싱 스캐닝 각도 간격	1°
SNR	20 dB