

전방 관측 환경에서 STAP 알고리즘 성능 분석

이나경^a, 박현우^a, 박대성^b, 변부근^b, 정경영^a, 김선우^a

^a한양대학교 융합전자공학과, ^b한화시스템

^a{nagyeong2379, stark95, kyjung3, remero}@hanyang.ac.kr

^b{ds03.park, paflow}@hanwha.com

Analysis on STAP Algorithm Performance in a Forward Observation Environment

Nakyung Lee^a, Hyunwoo Park^a, Daesung Park^b, Bukeun Byeon^b, Kyung-Young Jung^a and Sunwoo Kim^a

^aDepartment of Electronic Engineering, Hanyang University

^bAvonics Radar System Team, Hanwha Systems

요약

본 논문에서는 전방 관측 환경에서 표적 탐지 성능을 개선하는 STAP (space-time adaptive processing) 알고리즘을 구현한다. 전방 관측 시 range-Doppler dependency가 높아 SMI (sample matrix inversion) STAP 성능이 저하된다. Subspace STAP은 training data를 사용하지 않아 SMI STAP 대비 range-Doppler dependency에 강인하다. MATLAB 시뮬레이션을 통하여 SMI STAP과 subspace STAP을 전방 관측 환경에 적용하고 표적 탐지 성능을 분석한다. 시뮬레이션 결과, 전방 관측 환경에서 subspace STAP은 SMI STAP 대비 표적 탐지 성능이 우수함을 확인하였다.

I. 서론

GMTI(ground moving target indication)는 항공기나 위성에 레이더를 탑재하여 지상에서 이동하는 표적을 탐지하는 기술이다 [1]. 공대지 환경에서 GMTI 기술을 위해서는 언덕이나 나무와 같은 고정된 클러터 제거가 필수적이다. STAP(space-time adaptive processing)은 클러터 영향을 제거하여 이동 표적 탐지 성능을 향상하는 레이더 신호 처리 기술이다 [2]. 기존 SMI (sample matrix inversion) STAP은 range-Doppler dependency에 민감하여 전방 관측 시 성능 저하가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 range-Doppler dependency에 강인한 subspace STAP이 연구되었다 [3]. 본 논문에서는 MATLAB 시뮬레이션을 통하여 SMI STAP과 subspace STAP을 전방 관측 상황에 적용하고 각 STAP 알고리즘의 표적 탐지 성능을 분석한다.

II. 배열 안테나 기반 레이더 수신신호 모델

레이더 기반 신호 처리에서 표적과 클러터에 반사된 수신신호는 그림 1과 같이 안테나 원소 수 M 개, pulse 수 N 개, range 수 L 개의 3차원 data cube에 저장된다. 표적이 존재하는 l 번째 range의 시공간 스냅샷 \mathbf{x}_l 은 그림 1의 초록색 행렬이 벡터화된 구조로 저장되며, 식 (1)과 같다.

$$\mathbf{x}_l = \sum_i \alpha_i \mathbf{v}(\theta_i, f_i) + \alpha_{\text{tar}} \mathbf{v}(\theta_{\text{tar}}, f_{\text{tar}}) + \mathbf{n}_l \in C^{MN \times 1}, \quad (1)$$

여기서 i 는 클러터 index이고 α 는 채널 이득이다. 잡음의 세기를 σ_n^2 으로 정의 시, 잡음벡터 \mathbf{n}_l 은 $\mathbf{n}_l \sim CN(\mathbf{0}_{MN \times 1}, \sigma_n^2 \mathbf{I}_{MN})$ 을 따른다. $\mathbf{v}(\theta, f)$ 는 탐지 물체의 DoA(direction of arrival)와 Doppler frequency에 따라 결정되는 시공간 조향벡터이며 식 (2)와 같다.

$$\mathbf{v}(\theta, f) = \mathbf{b}(f) \otimes \mathbf{a}(\theta) \in C^{MN \times 1}, \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{a}(\theta)$ 는 탐지 물체의 DoA θ 에 따른 spatial 조향벡터이고 $\mathbf{b}(f)$ 는 Doppler frequency f 에 따른 temporal 조향벡터이다. Pulse interval을 T 라 하면 spatial 조향벡터와 temporal 조향벡터는 각각 다음과 같다.

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

$$\mathbf{b}(f) = [1, e^{j2\pi f T}, \dots, e^{j2\pi(N-1)f T}]^T \in C^{N \times 1}. \quad (4)$$

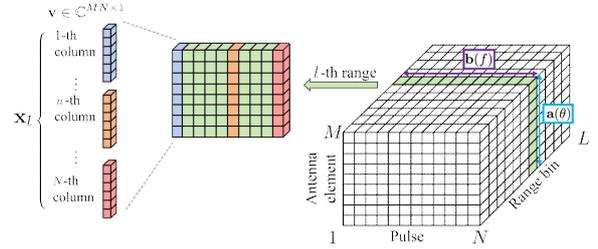


그림 1 레이더 data cube

III. STAP 알고리즘

l 번째 range의 STAP 필터 출력값 y_l 이 임계값보다 클 때, 해당 l 번째 range에 표적이 존재한다고 가정한다. 출력값 y_l 은 식 (5)와 같다.

$$y_l = |\mathbf{w}_l^H \mathbf{x}_l|, \quad (5)$$

여기서 \mathbf{w}_l 은 SINR(signal-to-interference-plus-noise ratio)을 최대화하는 가중치이며 식 (6)과 같다.

$$\mathbf{w}_l = \mathbf{R}_l^{-1} \mathbf{v}(\theta, f), \quad (6)$$

여기서 \mathbf{R}_l 은 클러터 공분산 행렬 $\mathbf{R}_{l,c}$ 와 잡음 공분산 행렬 $\mathbf{R}_{l,n}$ 이 더해진 $\mathbf{R}_l = \mathbf{R}_{l,c} + \mathbf{R}_{l,n}$ 구조로 구성된 간섭 공분산 행렬이며, $\mathbf{v}(\theta, f)$ 는 시공간 조향벡터이다. l 번째 range의 클러터 수신신호를 \mathbf{c}_l , 잡음의 세기를 σ_n^2 라고 할 때, $\mathbf{R}_{l,c}$ 와 $\mathbf{R}_{l,n}$ 은 각각 다음과 같다.

$$\mathbf{R}_{l,c} = E[\mathbf{c}_l \mathbf{c}_l^H], \quad (7)$$

$$\mathbf{R}_{l,n} = \sigma_n^2 \mathbf{I}_{MN}. \quad (8)$$

본 논문에서는 클러터 공분산 행렬을 추정하는 방법에 따라서 SMI STAP과 subspace STAP을 전방 환경에서 구현하였다.

A. SMI STAP

SMI STAP은 l 번째 range의 클러터 공분산 행렬 $\mathbf{R}_{l,c}$ 를 클러터만 존재하는 range의 data를 사용하여 식 (9)와 같이 추정한다.

$$\hat{\mathbf{R}}_{l,c} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P \mathbf{x}_p \mathbf{x}_p^H, \quad (9)$$

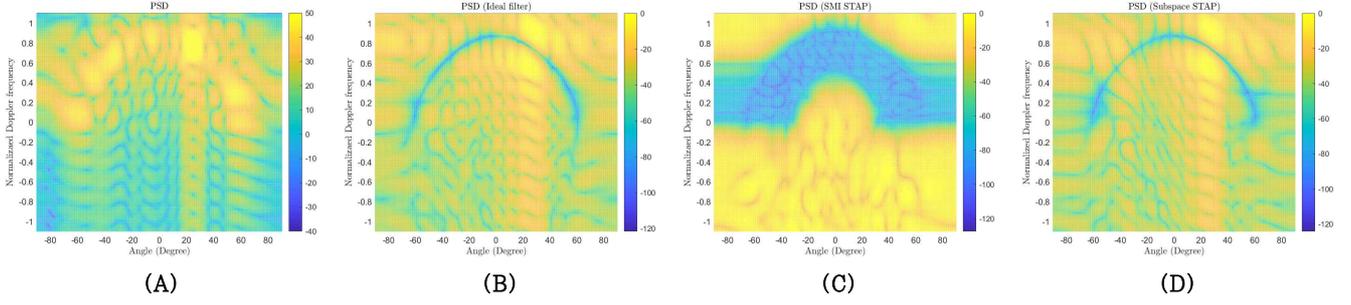


그림 2 전방 관측 환경에서 STAP 구현 결과 (A) 파워 스펙트럼 (B) Ideal filter (C) SMI STAP (D) Subspace STAP

여기서 P 는 training data range 개수이며 training data $\{\mathbf{x}_p\}_{p=1}^P$ 은 표적에 반사된 신호가 없는 data이다. 전방 관측 환경에서는 range-Doppler dependency가 측방 관측 환경 대비 높아 training data range와 표적이 존재하는 range의 Doppler frequency 특성이 다르다. 따라서 전방 관측 시 SMI STAP 성능이 저하된다.

B. Subspace STAP

Subspace STAP은 전방 관측 시 range-Doppler dependency를 완화하기 위하여 클러터 공분산의 subspace로 간접 공분산 행렬을 추정한다. STAP을 적용하기 이전에 항공기의 속도와 고도를 이용하여 클러터 공분산 행렬 $\mathbf{R}'_{l,c}$ 를 도출한 후 식 (10)과 같이 특이값 분해한다.

$$\mathbf{R}'_{l,c} = \mathbf{U}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^H. \quad (10)$$

이후 $\mathbf{\Lambda}$ 의 근사치 정도를 η 로 정의 시, η 에 따라서 목표로 하는 클러터 감쇠 $\beta = -10\log_{10}(1-\eta)$ 를 설정한다. η 는 다음과 같다.

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^K \lambda_k}{\sum_{k=1}^{MN} \lambda_k}, \quad (11)$$

여기서 λ_p 는 $\mathbf{\Lambda}$ 의 특이값이며 $\mathbf{\Lambda}$ 는 K 개의 유의미한 값이 도출되고 나머지 $MN-K+1$ 개의 0에 가까운 값이 도출된다. $\mathbf{\Lambda}$ 의 첫 번째 K 열과 나머지 $MN-K+1$ 의 0 열로 행렬 \mathbf{S}_c 를 구성한다. 최종적으로 subspace STAP의 클러터 공분산 행렬은 다음과 같이 추정한다.

$$\hat{\mathbf{R}}_{l,c} = \mathbf{U}\mathbf{S}_c\mathbf{V}^H. \quad (12)$$

Subspace STAP은 클러터 공분산 행렬 추정 시, SMI STAP과는 달리 training data에 의존하지 않아 전방 관측 환경에서 range-Doppler dependency를 완화하여 전방 관측 환경에서 성능이 향상된다.

IV. 시뮬레이션 시나리오 및 결과

STAP 알고리즘 성능 분석을 위하여 반파장 간격의 ULA (uniform linear array) 안테나를 사용하고 표 1과 같이 시뮬레이션 환경을 설정하였다.

표 1. 시뮬레이션 매개변수

매개변수	값
레이더 주파수	10 [GHz]
안테나 원소 개수 M	16
Pulse 수 N	32
Range 수 L	100
PRF (pulse repetition frequency)	40 [kHz]
표적 위치	(-1,000, 1,500) [m]
표적 속도	15 [m/s]
항공기 높이	1,000 [m]
항공기 속도	100 [m/s]
SNR (signal-to-noise ratio)	33 [dB]

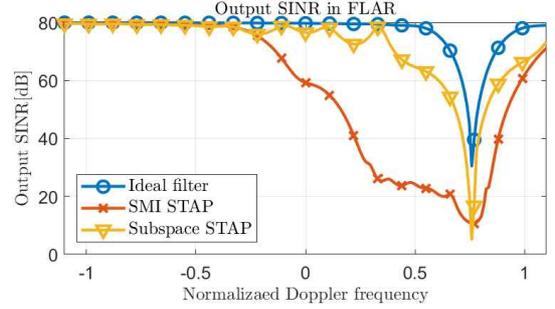


그림 3 전방 관측 환경에서 output SINR 비교 결과

그림 2는 전방 관측 환경에서 STAP 알고리즘을 구현한 시뮬레이션 결과 그래프이다. 시뮬레이션 결과, SMI STAP은 클러터 제거 폭이 넓어 클러터 제거 과정에서 표적 신호가 함께 제거되었다. 이와 달리 subspace STAP은 range-Doppler dependency 영향을 받지 않아 ideal filter와 유사하게 클러터 제거 폭이 매우 좁음을 확인하였다.

그림 3은 전방 관측 환경에서 STAP 알고리즘의 output SINR을 비교한 그래프이다. Normalized Doppler frequency에 따른 SINR을 그렸을 때, 레이더가 탐지 가능한 물체의 최소 속도 MDV(minimum detectable velocity)는 SINR의 너비가 좁을수록 우수하다. 시뮬레이션 결과, subspace STAP은 SMI STAP 대비 output SINR 및 MDV 성능이 크게 향상되었다.

V. 결론

본 논문에서는 전방 관측 환경에서 SMI STAP 및 subspace STAP의 표적 탐지 성능을 분석하였다. SMI STAP은 training data로 클러터 공분산 행렬을 추정하므로 range-Doppler dependency가 크지만 subspace STAP은 SMI STAP과는 달리 range-Doppler dependency 영향을 받지 않는다. 시뮬레이션 결과, 전방 관측 시 SMI STAP은 output SINR 및 MDV 성능이 ideal filter 대비 크게 저하되었지만 subspace STAP은 SMI STAP 대비 성능 향상 정도가 커 ideal filter에 가깝게 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 한화시스템(주)의 제원을 지원받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] L. E. Brennan, J. D. Mallet and I. S. Reed, "Adaptive arrays in airborne MTI radar", *IEEE Trans. Antennas. Propag.*, vol. 24, no. 5, pp. 607-615, Sep. 1976.
- [2] W. L. Melvin, "A STAP overview," *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, vol. 19, no. 1, pp. 19-35, Jan. 2004.
- [3] B. Friedlander, "A subspace method for space time adaptive processing," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 53, no. 1, pp. 74-82, Jan. 2005.