

재머와 클러터 억압을 위한 공간 필터링 기반 STAP 알고리즘

Spatial Filtering based STAP Algorithm for Clutter plus Jamming Suppression

양 훈 기[★]

Hoon-Gee Yang[★]

Abstract

When radar return contains strong jammers along with ground clutter echo, a STAP(space-time adaptive processing) algorithms tend to suppress jammer components more severely than it does the clutter. This hinders moving target detection in that the target echo is apt to be buried by clutter echo. This paper presents a two-step STAP algorithm in which the pre-suppression of jammer by the spatial filtering is applied, prior to applying the STAP algorithm. We propose how to find the coefficients of the spatial filter and show that the spatial filtering barely alter the spectra of the target and the clutter echo, having only to suppress the jammers. Finally, we simulate a STAP scenario with strong jammers and show the proposed algorithm can improve STAP performance.

요 약

재머와 클러터 간섭이 모두 존재하는 지상 환경에서 STAP 알고리즘을 적용하는 경우 STAP 알고리즘은 클러터에 비해 재머를 상대적으로 더 억제하므로써 이동 표적 성분이 클러터에 묻히는 결과를 초래한다. 본 논문에서는 공간 필터링에 의한 전처리 과정을 거친 후 STAP을 적용하므로써 클러터를 효과적으로 억제하는 두 단계 기법을 제시한다. 공간 필터 계수 찾는 방법을 제시하고 공간 필터링 과정이 표적 및 클러터 성분에 영향을 주지 않으면서 재머 성분만 감쇄시킬 수 있음을 보인다. 마지막으로 재머가 강한 STAP 시나리오를 시뮬레이션하여 제시된 방법이 STAP 성능을 개선할 수 있음을 보인다.

Key words : jammer, STAP, clutter, suppression, spatial, Doppler

1. 서론

GMTI(ground moving target indicator)는 비행체나 위성에 레이더를 탑재해서 지상 이동표적을 탐지하는 기술이다. 상용화된 GMTI 기술로 DPCA(displaced

phase center antenna) 기술이 있으나 GMTI 성능을 획기적으로 개선하기 위해서 STAP 기술이 학술적으로 더 주목을 받아 왔다^[1].

STAP 알고리즘을 수행하기 위해서는 클러터 추정(estimation)이 되어야 하며 이를 위해서는 Reed-Mallet-

* Dept. of Electronic Convergence Engineering, Kwangwoon University

★ Corresponding author

E-mail : hgyang@kw.ac.kr, Tel : +82-2-940-5187

※ Acknowledgment

The work reported in this paper was conducted during the sabbatical year of Kwangwoon University in 2022

Manuscript received Sep. 28 2022; revised Oct. 8, 2022; accepted Oct. 13, 2022.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Brennan(RMB)물에 따라 요구되는 비현실적으로 많은 트레이닝(training) 샘플을 사용해서 계산해야 한다^{[2][3]}. 하지만 각도-도플러 평면상에 클러터가 존재할 수 있는 공간이 제한적이므로 이를 이용해서 간섭에 대한 공분산 행렬의 랭크(rank)를 줄이는 연구, 간섭 모델링에 의해 DoF(degree of freedom)을 줄이는 연구 등 STAP 알고리즘의 구현 가능성을 높이는 연구가 많이 이루어졌다^{[4][5][6]}. 이 연구들은 클러터만을 간섭원으로 고려한 것으로 재머 성분이 존재하는 경우에는 간섭 신호에 대한 공분산 행렬의 정확도를 떨어뜨리게 되어 STAP 성능 열화를 초래한다.

재머 억제 이슈는 STAP 기술과는 별도로 ABF(adaptive beamforming)기술의 주요 주제가 되어 왔다^[7]. 재머는 레이더 성능 열화를 유도하기 위해 광대역 특성을 가지므로 도플러 정보는 무시되고 각도, 즉 공간(spatial) 도메인에서 처리된다^[8]. 재머가 클러터에 포함되는 경우 기본적으로 간섭 신호 공분산 행렬의 랭크를 증가시키고 이를 위해 STAP 각도 방향 DoF가 증가되어야 하며 간섭 신호 공분산 행렬 추정을 위한 트레이닝 샘플 개수 증가가 불가피하다.

또한 본 논문에서 주목하고 있는 재머 세기가 클러터 세기에 비해 훨씬 큰 경우 STAP 알고리즘은 재머 억제는 충분히 하지만 클러터 억제는 상대적으로 부족해서 이동 표적이 클러터에 묻히는 경우 표적 탐지가 어려워진다^[8].

그러므로 STAP 알고리즘 실시간 처리가 가능하면서 재머 억제와 STAP 적용을 동시에 하는 연구가 1990년대부터 주목을 받았다^{[9][10]}. 이들 연구의 주요 핵심은 클러터 억제 영향 없이 재머 성분을 억제하는 방법에 관한 내용이다. 클러터 성분 없이 재머만의 정보를 얻으려면 저(low) PRF(pulse repetition frequency) 시스템의 경우 클러터 없는 레인지 게이트(gate)를 사용하거나 고 PRF 시스템의 경우 클러터 성분 없는 도플러 빈에서 재머 성분을 추출할 수 있으며 또는 주파수부밴드(sideband)만을 이용해서 재머의 공분산 행렬을 추정할 수도 있다^{[11][12][13][14]}.

본 연구에서는 재머 세기가 클러터에 비해 상대적으로 매우 큰 경우 재머에 의한 STAP 성능 열화를 피하기 위해 전처리 과정으로 재머 억제를 위한 공간 필터링 기법을 제안한다. 이를 위해 본문 1절에서는 고유치 해석(eigen analysis)에 의해 클러터와 재머의 STAP 처리에 의한 감쇄 분석을 하고 본문 2절에서는 공간 필터링을 적용해서 전처리한 후 STAP을 적용하는 과정을 기술하

고 3절에서는 시뮬레이션 결과를 제시한 후 결론을 맺는다.

II. 본론

1. STAP 간섭억제 분석

N 개의 배열(array) 소자로 구성된 ULA(uniform linear array)가 탑재된 레이더가 배열 안테나 방향으로 이동하면서 지상에 M 개의 펄스를 송신하는 side-looking STAP을 고려하자. ULA에 수신된 신호가 획득되면 공분산 행렬 R 을 만들 수 있으며 R 은 일반적으로 Hermitian 매트릭스 성질을 갖는다. 그러므로 다음과 같이 고유치 분해(eigen analysis)가 가능하다^[8].

$$R = U\Lambda U^H \quad (1)$$

여기서 U 는 고유벡터(eigen vector)들의 집합으로 $U = [u_{1,1}, u_{2,1}, \dots, u_{N,1}, \dots, u_{N,M}]$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 $u_{i,j}$ 는 각도가 θ_i 인 각도 스티어링(steering) 벡터(크기 $N \times 1$)와 도플러가 f_j 인 도플러 스티어링 벡터(크기 $M \times 1$)의 Kronecker product로 만들어진 $NM \times 1$ 크기의 고유벡터이다. 또한 Λ 는 각 고유벡터에 대응하는 고유값을 대각 성분으로 갖는 대각행렬 $\Lambda = \text{diag}[\lambda_{1,1}, \lambda_{2,1}, \dots, \lambda_{N,M}]$ 이다.

간섭 성분들이 STAP 처리 과정을 통해서 억제되는 정도를 분석하기 위해 레이더 풋프린트(footprint) 내에 반사계수가 γ_q 이고 각 성분과 도플러 성분이 각각 $\theta_{q,i}$, $f_{q,j}$ 인 하나의 클러터 패치만 존재한다고 하자. 이 클러터 패치에 반사되어 수신된 신호가 X_q 라면 $X_q = \gamma_q u_{i,j} + \sigma^2$ (σ^2 은 잡음의 분산)가 성립한다. 여기서 $u_{i,j}$ 는 각성분과 도플러 성분이 각각 $\theta_{q,i}$, $f_{q,j}$ 인 각도 스티어링 벡터와 도플러 스티어링 벡터를 Kronecker product 한 각도-도플러 스티어링 벡터이다. 이때 X_q 의 공분산 행렬 R_q 은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$R_q = E\{X_q X_q^H\} = E\{|\gamma_q|^2\} u_{i,j} u_{i,j}^H + \sigma^2 I \quad (2)$$

여기서 I 는 identity 행렬이다. 이 경우 수신신호의 SINR(signal-to-interference plus noise ratio)을 최대로 만드는 필터 가중치는 다음과 같다^[8].

$$w = R_q^{-1} s = \frac{1}{\eta_q^2 + \sigma^2} u_{i,j} u_{i,j}^H s \quad (3)$$

여기서 η_q^2 은 클러터 전력 $E[|\gamma_q|^2]$ 를 나타낸다. (3)에서 w 는 (각도, 도플러) 조합에 따라 변하며, 즉 s 가 각성분 $\theta_{q,i}$, 도플러 성분 $f_{q,j}$ 인 각도-도플러 스티어링 벡터일 때 $u_{i,j}^H s = 1$ 가 되어 필터 가중치 및 STAP 출력 y 는 각각 다음과 같다.

$$w = \frac{1}{\eta_q^2 + \sigma^2} u_{i,j} \quad (4)$$

$$y = w^H X_q = \frac{\gamma_q + u_{i,j}^H n}{\eta_q^2 + \sigma^2} \quad (5)$$

STAP 출력 디스플레이를 위해 $|y|^2$ 을 계산해 보면 $|y|^2 = \frac{1}{\eta_q^2 + \sigma^2}$ 이 된다. 위에서 예시한 수신 신호 X_q 에 대해 공분산 행렬을 구하고 고유치 해석을 하면 고유값이 $\eta_q^2 + \sigma^2$ 이 된다^[8]. 즉 STAP 알고리즘은 수신신호 공분산 행렬의 고유값이 큰 값을 가질수록 고유값에 대응되는 간섭 성분을 (θ, f) 평면에서 더 크게 억제하는 성질이 있다. 클러터와 재머가 혼재하는 지상 환경에서 재머는 의도적인 간섭 신호로 출력 세기가 크고 단방향(one way) 성분이므로 클러터 성분에 비해 전력 세기가 훨씬 크며 이로 인해 STAP 처리 과정에서 재머 성분만 과도하게 억제되고 클러터 성분은 충분히 억제가 안되어 표적 탐지가 안될 확률이 커진다.

2. 전처리 재머 억압 STAP

가. 전처리 재머 억압

레이더 에코를 수신하는 구간에는 이동표적 성분, 클러터 성분, 재머 성분이 모두 공존하나 펄스를 송신하기 직전이나 에코 수신 구간을 지나 다음 펄스 송신 전까지의 시간 구간에는 재머 성분만 존재한다. 그러므로 재머 억제를 위한 적응(adaptive) 필터 계수 계산을 위한 트레이닝 데이터는 이 시간 구간에 얻어져야 한다. 재머는 광대역 신호이므로 도플러 도메인 처리가 아닌 각도 도메인 처리를 한다. 재머 성분에 대한 공분산 행렬 R_J 가 추정되었다면 가중치 함수로 $w = R_J^{-1} s(\theta)$ 을 이용해서 ABF 출력을 구할 수 있다. 이 경우는 재머 입사 방향에 깊은 null을 형성해서 재머 성분을 상당히 억제 한다. 하지만 전처리 과정으로 ABF를 적용하는 경우 ABF 출력은 한 채널 출력이 되므로 배열 안테나 개수 만큼의 입력이 필요한 STAP 입력으로 사용할 수 없다. 이를 해결하기 위해 다음과 같은 과정의 부배열별 ABF 기법을 쓸

수 있다. 1) 전체 배열 소자 개수 보다 작은 개수, 예를 들어 $N_1 (N_1 \ll N)$ 개의 부배열 안테나의 수신 신호에 대해 ABF를 수행해서 첫번째 부배열 안테나에서 재머를 억제할 수 있는 필터 계수 획득 2) 두번째 안테나 소자부터 $N_1 + 1$ 번째 소자로 구성된 두 번째 부배열 안테나에 대해, 즉 중복을 허용하면서 부배열 안테나 집합에 대해 1) 과정 반복 3) 위 과정을 반복하여 마지막 배열 소자가 포함된 부배열 안테나에 대한 필터 계수를 획득한다. 이 경우 $(N+1) - N_1$ 개의 적응 필터를 획득하게 된다. 이상의 1) 2) 3) 과정은 재머만 존재하는 시간 구간에서 수행하며 이후 펄스를 송신해서 클러터 성분도 포함된 구간에서는 $(N+1) - N_1$ 개 적응 필터를 적용해서 얻어진 $(N+1) - N_1$ 개의 재머가 억제된 수신 신호에 대해 STAP 알고리즘을 수행한다^[9]. 이 방법은 N_1 을 크게 하면 재머 억제가 확실할 수 있지만 STAP 입력 개수가 줄어든 뿐 아니라 $(N+1) - N_1$ 개의 ABF를 수행해야 하므로 계산 복잡도가 크게 증가한다. 특히 ABF를 수행하기 위해 충분한 수의 트레이닝 샘플이 필요하며 이 경우 충분한 재머 성분만 존재하는 시간 구간 확보가 필요하다. 이와 같은 이유로 시스템 복잡도를 증가시키면서 재머 억압을 하기 보다는 전처리 후 재머가 클러터 정도의 세기가 되도록 재머 세기를 감쇄시킬 수 있다면 STAP 처리 과정에서 클러터와 함께 재머 억제가 가능하다. 다음 절에서는 이점에 착안해서 각도 도메인 또는 공간 도메인에서 공간 필터링에 의해 재머 세기만 감쇄시키는 전처리 방법을 제안한다.

나. 공간 필터링에 의한 STAP 전처리

배열 소자 개수가 N 개인 배열 안테나가 주워져 있으며 n 번째 배열 안테나에 수신된 신호가 r_n 라 하자. 이때 수신 신호의 각도 스펙트럼은 DFT(discrete Fourier transform) 이론에 의해 다음과 같이 구할 수 있다^[8].

$$y_k = \sum_{n=0}^{N-1} r_n \exp\left(j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn\right) \quad (6)$$

여기서 k 는 $\frac{2\pi}{\lambda} d \sin\theta_k$ 에 대응되며 N 개의 출력 $\{y_k\}$ 의 절대값이 각도 스펙트럼이 된다. 직관적인 이해를 위해 배열 안테나가 $x = 0$ 에서 시작해서 x 축 상에 있다고 하고 x 의 푸리에(Fourier) 변수인 공간주파수를 k_x 로 정의하자. 이 경우 n 번째 배열 안테나 위치는 x 축 상에서 $d(n-1)$ 가 된다. θ_0 에서 빔이 입사되는 경우 배열

안테나 수신 신호에 대해 DFT 하면 피크값은 k_x 축에서 $k_{x_0} = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta_0$ 에 있게 된다. DFT에 의해 k_x 축상 이산 위치 $n\Delta_{k_x}$ (n : 정수)에서 입사 빔의 공간 스펙트럼을 얻을 수 있으나 각도로 변환하면 불규칙(nonuniform)한 위치에서의 스펙트럼을 획득하게 된다. 배열 안테나에 θ_0 에서 재머가 입사되는 경우 안테나 aperture는 $(N-1)d$ 가 되며 수신 신호를 DFT 하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\delta(k_x - k_{x_0}) * \text{sinc}(k_x L / 2\pi) = \text{sinc}((k_x - k_{x_0})L / 2\pi)$$

여기서 $k_{x_0} = \frac{2\pi}{\lambda} \sin\theta_0$ 이고 $L = (N-1)d$ 이다. 그러므로 $\text{sinc}()$ 함수의 첫 번째 zero-crossing 까지를 재머 피크의 스펙트럼폭이라고 가정하면 피크 폭은 k_x 축에서 $4\pi/L$ 정도이고 각도로 환산하면 근사식 $\sin\theta \approx \theta$ 및 d 의 크기가 반파장이라고 가정할 때 $4/N$ (radian) 정도가 된다. 여러개의 재머가 입사하는 경우 수신 신호의 DFT를 통해 공간 스펙트럼을 구하면 k_x 축에서 폭이 $4\pi/L$ 인 피크가 재머 개수 만큼 나타난다. k_x 축 해상도 Δ_{k_x} 는 DFT 이론에 의해 $2\pi/L$ 이며 재머 입사각을 k_x 축 값으로 환산했을 때 $2\pi/L$ 의 정수배는 아니므로 동일한 세기의 재머가 서로 다른 입사각으로 입사하여도 k_x 축에서는 세기가 차이가 날 수 있다.

재머의 DFT를 $X_J(n\Delta_{k_x})$ 라 할 때 재머의 PSD(power spectral density)은 $|X_J(n\Delta_{k_x})|^2$ 가 된다. $|X_J(n\Delta_{k_x})|^2$ 은 재머가 있는 구간에서 큰값을 가지고 잡음만 존재하는 구간에서는 잡음 PSD에 해당하는 값을 갖는다. 본 논문에서 제안하는 공간 필터링은 재머 세기를 클러터 세기 정도로 감쇄시키는 것이 목적이다. 즉, $|X_J(n\Delta_{k_x})|^2$ 의 함수값이 클수록 더 크게 scale down 시켜주는 매핑 함수 $W(n\Delta_{k_x})$ 를 찾는 과정으로 $W(n\Delta_{k_x})$ 는 수학적으로 표현 안되고 look-up 테이블 형태여도 된다. 본 논문에서는 $W(n\Delta_{k_x})$ 를 위한 후보 함수로 log 함수를 이용하였다. log 함수는 단조 증가 함수로 독립변수 값이 클수록 함수 값도 크지만 독립변수 값이 매우 커져도 함수 값은 그 만큼 증가하지 않는 특성이 있다. 다음절 시뮬레이션 부분에서는 아래 식(8)의 log 함수를 사용했다.

$$W(n\Delta_{k_x}) = \log_{10}(1 + \beta / |X_J(n\Delta_{k_x})|^2) \quad (8)$$

여기서 β 는 파형 증감 정도 조절을 위해 사용한 파라미터이다. $W(n\Delta_{k_x})$ 함수는 재머 성분만 존재하는 시간 구간에 얻어지는 함수이며 레이더가 펄스를 송신한 이후 STAP 처리 과정 부터는 수신신호에 대한 전처리 과정에 적용되는 함수가 된다. 제안한 STAP 시스템 처리 과정을 블록도로 나타내면 그림 1과 같다.

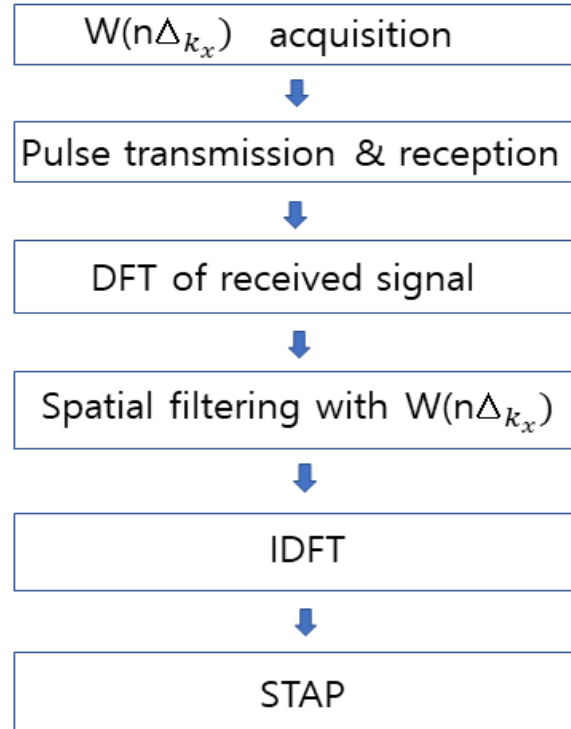


Fig. 1. Block diagram of proposed STAP.

그림 1. 제안 STAP 블록도

수신 신호를 DFT 및 공간 필터링을 한 후에는 IDFT를 해서 재머 성분만 역압된 신호를 얻고 이어서 STAP 처리를 수행한다. 공간 필터링 과정에 의해 클러터 및 표적 성분이 최초 수신된 것과 달라지지만 문제는 안된다. 왜냐하면 표적 성분은 k_x 축에서 한 포인트에 해당하여 크기가 상수배된 효과만 있으며 클러터는 $W(n\Delta_{k_x})$ 함수에 의해 변형 되지만 세기의 큰 변화가 일어나지 않으며 STAP 과정에서 억제될 수 있다. 만약 재머 입사각이 표적 입사각과 일치하는 경우는 공간 필터링에 의해 표적 성분이 억제되나 이 경우는 공간 필터링 과정 없는 일반적인 STAP 과정에서도 해결할 수 없는 문제이다. 또한 재머 입사 방향이 특정 클러터 패치 반사신호 방향과 같은 경우 해당 클러터 패치는 전처리 과정에서 조금 더 억제되는 정도이며 이것이 STAP 결과에 특별한 영향을 주지는 못한다.

3. 시뮬레이션

표 1은 제안 방법 성능 검증을 위해 사용된 시뮬레이션 파라미터 값이다. 배열 안테나는 간격이 반파장인 32개의 소자로 구성되어 있으며 입사신호는 1° 간격으로 균일하게 분포된 클러터 패치로부터 반사되어 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 범위에서 입사되는 것으로 설정하였다. Nyquist 이론에 근거해서 수신신호가 aliasing 없이 STAP에서 처리가 되도록 PRF를 27kHz로 설정하였다. STAP 처리를 위해서 16개의 펄스를 사용하였으며 이것은 도플러 해상도를 결정한다. 재머의 세기는 클러터 세기 보다 30dB 크게 설정하였다.

Table 1. Simulation parameter.

표 1. 시뮬레이션 파라메타

Parameter	Value
Carrier frequency	10 GHz
Number of pulses	16
Number of array antenna elements	32
Radar platform speed	330 m/s
Target speed/ incident angle	45 m/s, 5°
Number of jammers	2(incident angle: $-17^\circ, 20^\circ$)
SNR	15 dB
CNR	55 dB
JNR	85 dB

그림 2(a)은 펄스 송신 전 레이더에 수신된 재머의 스펙트럼을 각도축에서 표시한 것이다. 두 개의 재밍 신호가 표 1에서 설정한 각도에 존재하였다. 그림 2(b)는 배열 안테나에 수신된 신호를 DFT하여 얻어진 k_x 축 PSD다. k_x 와 θ 가 선형적으로 일대일 대응하지 않으므로 두 PSD 크기가 동일하지는 않지만 각도로 환산해 보면 피크 위치는 거의 일치하였다.

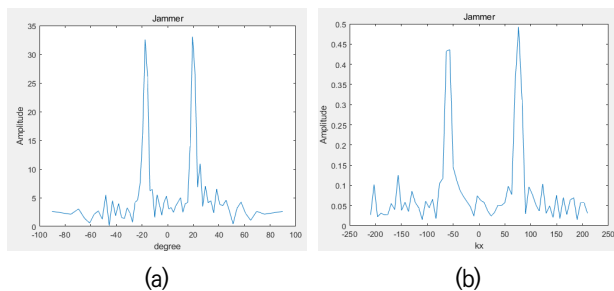


Fig. 2. PSD of input in (a) angle axis (b) k_x axis.
그림 2. (a) 각도 및 (b) k_x 축에서의 입력신호 PSD

그림 3(a)은 log 함수를 이용해서 재머 성분들을 스케일링한 결과로서 식(8)에서 β 값으로 0.5를 사용했다. 그림 2(b)와 비교했을 때 재머 피크값이 잡음 레벨에 비해서 작아진 것을 관찰할 수 있다. β 값이 작아질수록 억압 정도가 커지며 β 를 0.1까지 작게해도 STAP 결과에는 큰 변화는 없었다.

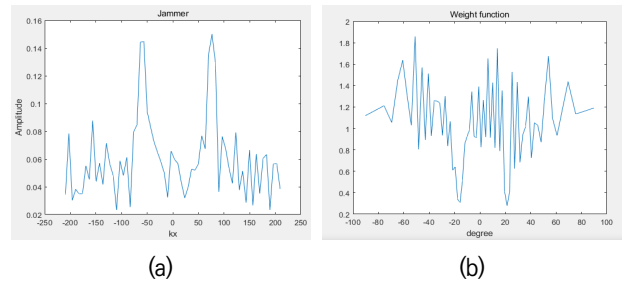


Fig. 3. (a) PSD of preprocessed input, (b) $W(n, \Delta k_x)$.

그림 3. (a) 전처리 입력의 PSD (b) $W(n, \Delta k_x)$ 함수

그림 3(b)는 log 함수를 이용한 가중치 함수값을 θ 축에 나타낸 결과다. 재머 성분이 있는 각도(또는 k_x)에서 진폭에 대한 스케일 다운이 이루어진 것을 확인할 수 있었다.

그림 4(a)은 최초 수신 신호의 공분산 행렬에서 고유값을 얻은 후 크기를 dB 스케일로 변환한 후 큰 순으로 정렬한 결과이다. 그림 4(b)는 재머가 억제된 신호의 공분산 행렬로부터 얻어진 고유값 분포이다. 그림 4(a)에서 고유값이 특별히 큰 2개의 고유값은 재머 성분에 해당함을 알 수 있다. 또한 공분산 행렬 랭크 추정에는 각도 및 도플러축상에서 직교벡터의 개수를 추출한 후 두 값을 곱하면 가능하다. 즉 k_x 축 해상도 Δk_u 가 정해지면 θ 축 해상도 $\Delta \theta$ 가 정해지고 클러터 입사각이 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 이므로 $60/\Delta \theta$ 이 각도 축상의 직교 벡터 개수의 근사값이고 도플러 축의 직교 벡터 수는 펄스 개수와 동일하므로

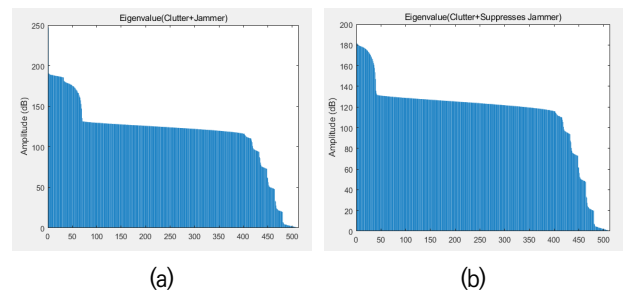


Fig. 4. Distribution of eigenvalues of (a) original input (b) suppressed signal.

그림 4. 고유값 분포 (a) 입력신호 (b) 재머 감쇄 신호

이에 근거해서 계산해 보면 446 개가 되어 그림 4(b)와 거의 일치하였다. 그림 5(a)는 이차원 평면 (θ, f) 에서의 수신 신호 PSD로서 재머 성분만 두드러지고 클러터 및 표적 성분은 거의 나타나지 않았다. 그림 5(b)은 전처리 과정을 통해서 얻어진 신호에 대한 PSD로서 재머 감쇄로 인해 대각선 방향 클러터 성분이 부각되었다. 즉, (θ, f) 평면에서 1차 함수 형태의 클러터 성분이 나타났

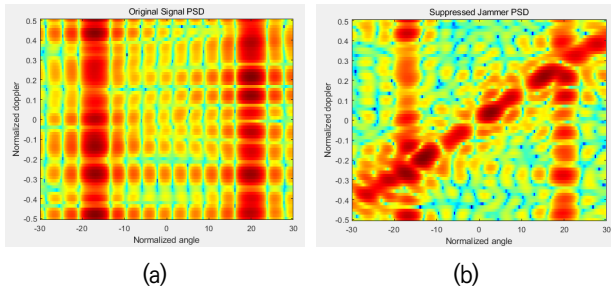


Fig. 5. PSD of input(a), jammer suppressed input(b).
그림 5. 입력신호(a)와 재머억압 신호(b)의 PSD

으며 재머를 20dB 이상 억제해서 재머와 클러터가 유사한 정도의 세기를 보였다. 하지만 이동 표적 성분은 클러터 보다 40dB 낮게 설정해서 나타나지 않았다. 그림 6(a)는 최초 수신 신호에 대해서 STAP 처리를 하여 얻어진 결과다. 재머 성분은 크게 억제되었지만 클러터 성분 억제가 부족해서 이동 표적 흔적이 전혀 나타나지 않았다. 그림 6(b)는 재머 억제 전처리 후 신호에 대한 STAP 처리 결과로 재머 및 클러터 성분이 억제되었고 이동 표적 성분이 탐지되었다. 다양한 경우에 대해서 STAP 알고리즘을 수행해본 결과 재머가 클러터 세기 보다 최소 20dB 이상 클 때 전처리 과정이 필요함을 알 수 있었다. 상당한 하드웨어 및 소프트웨어의 보강에 의해 재머 억제를 수행하는 기존 방식에서 재머가 완전히 억제되었다고 가정을 하고 STAP을 적용한 결과를 그림 7에 제시하였다. 그림 6(b)와 비교해서 재머 성분이 전혀

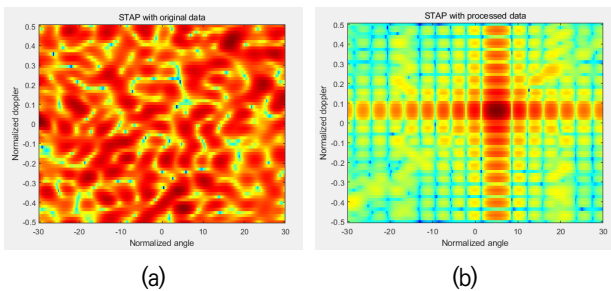


Fig. 6. STAP outcome (a) without preprocessing (b) with preprocessing.

그림 6. STAP 결과 (a) 전처리 없는 경우 (b) 전처리한 경우

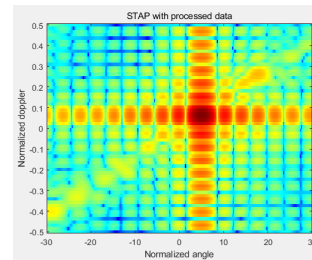


Fig. 7. STAP outcome from ideal no jammer condition.
그림 7 이상적인 재머 없는 경우 STAP 결과

나타나지 않아 표적 성분 탐지에 유리할 수도 있을 것이다. 하지만 표적 성분의 상대적 세기를 고려하면 탐지 성능관점에서 유리한 정도가 미약하며 더우기 재머를 완전히 제거할 수도 없다. 제안 방법은 추가 하드웨어가 불필요하며 소프트웨어적 공간 필터링을 이용해서 재머를 1차 감쇄시키고 STAP에서 추가 억제시켜 재머가 포함된 클러터 환경에서 기존 방법과 유사한 정도의 표적탐지 성능이 가능하였다.

III. 결론

본 논문에서는 클러터 외에 재머 성분이 포함되어 있는 수신 신호에 대해서 공간 필터링을 통해 재머 성분을 일차적으로 감쇄시킨 후 STAP을 적용하는 순차적 STAP 기법을 제시하였다. 재머 감쇄 전처리를 위한 가중치 함수를 얻는 방법을 제시하였고 이동표적과 클러터 성분이 전처리 과정에서 영향이 거의 없음을 보였으며 전처리 과정을 거친 신호를 STAP에 적용시켰을 때 클러터를 적절히 억압하면서 이동 표적 성분을 탐지할 수 있음을 보였다. 또한 여러 시뮬레이션을 통해 재머 세기가 클러터 보다 20dB 이상 큰 일반적인 레이더 환경에서 제시한 공간 필터링이 시스템 복잡도를 가중시키지 않으면서 클러터 억제를 효과적으로 하였다.

References

[1] S. Theodoridis, R. Chellappa, *Academic Press Library in Signal Processing*, Elsevier, pp.948-950, 2014.
[2] Klemm, R., *Space-Time Adaptive Processing: Principles and Applications*, Inst of Engineering & Technology, 1998.
[3] I. S. Reed, J. D. Mallett, L. E. Brennan, "Rapid

convergence rate in adaptive arrays," *IEEE, Trans. Aerosp. Electron. Syst.* vol.10, no.6, pp.853-863, 1974. DOI: 10.1109/TAES.1974.307893

[4] Fuhrmann, D. R., "Application of Toeplitz Covariance Estimation to Adaptive Beamforming and Detection," *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol.39, No.10, pp.2194-2198, 1991.

DOI: 10.1109/78.91176

[5] B. Tang, J. Tang, Y. Peng, "Detection of heterogeneous samples based on loaded generalized inner product method," *Digit. Signal Process*, vol. 22, pp.605-613, 2012.

DOI: 10.1016/j.dsp.2012.03.001

[6] B. Himed, Y. Zhang, A. Hajjari, "STAP with angle-Doppler compensation for bistatic airborne radars," *IEEE National Radar Conference*, pp.311-317, 2002. DOI: 10.1109/NRC.2002.999737

[7] Y. Doisy, L. Deruaz, R. Been, "Interference Suppression of Subarray Adaptive Beamforming in Presence of Sensor Dispersions," *Trans. Signal process.*, vol.4, no.12, pp.4195-4212, 2010.

DOI: 10.1109/TSP.2010.2048106

[8] Guerci, J. R., *Space-Time Adaptive Processing for radar*, Artech House, 2003.

[9] R Klemm, "Adaptive air and spaceborne MTI under jamming conditions," *Proc. of IEEE National Radar Conterence*, pp.167-172, 1993.

DOI: 10.1109/NRC.1993.270472

[10] D. F. Marshall, "A two step adaptive interference nulling algorithm for use with airhorne sensor arrays," *Proc. 7'h SP Workshop on SSAP*, 1993.

DOI: 10.1109/SSAP.1994.572503

[11] P. Rivkin, Y. Zhang, and H. Wang, "Spatial adaptive pre-suppression of wideband jammers in conjunction with STAP: A sideband approach," *Proc. of 1996 CIE International Conference of Radar*, pp.439-443, 1996.

DOI: 10.1109/ICR.1996.574489

[12] P. G. Richardson, "STAP covariance matrix structure and its impact on clutter plus jamming suppression solutions," *Electronics Letters*, vol.37, no.2, pp.118-119, 2001.

DOI: 10.1049/el:20010090

[13] Y. Selikar, D. B. Williams and E. J. Holder, "Beam-augmented STAP for joint clutter and jammer multipath mitigation," *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol.147, no.5, pp.

225-232, 2000. DOI: 10.1049/ip-rsn:20000490

[14]Ting Wang, Yongjun Zhao, Jie Huang, Ke Jin, Kunfan Zhang, "A reduced-rank STAP algorithm for simultaneous clutter plus jamming suppression in airborne MIMO radar," *18th International Radar Symposium (IRS)*, 2017.

DOI: 10.23919/IRS.2017.8008095

BIOGRAPHY

Hoon-Gee Yang (Member)



1982 : BS degree in Electronic Engineering, Yonsei University
 2005 : MS degree in Electrical Engineering, SUNY at Buffalo
 2006 : PhD degree in Electrical Engineering, SUNY at Buffalo
 1993~ : Professor, Kwangwoon University