

Cell under Test 데이터만을 이용한 사전정보 기반의 클러터 억제 알고리즘

Knowledge-Based Clutter Suppression Algorithm Using Cell under Test Data Only

전현무 · 양동혁* · 정용식 · 정원주** · 김종만*** · 양훈기

Hyeonmu Jeon · Dong-Hyeuk Yang* · Yong-Seek Chung · Won-zoo Chung** ·
Jong-mann Kim*** · Hoon-Gee Yang

요 약

실제 레이더가 운용되는 환경에서 발생하는 클러터는 비균질성(heterogeneous)의 특성을 갖는 동시에 바이스테틱 레이더나 모노스테틱 non-sidelooking 레이더 구조인 경우는 클러터의 비정상성(nonstationary) 특성도 갖는다. 이러한 특성에 의해서 클러터 신호를 추정하는데 필요한 IID(Independent Identically Distributed) secondary 데이터 개수에 제약이 따르므로 클러터 억제 성능이 저하된다. 본 논문에서는 바이스테틱 레이더 환경에서 Cell under test에 대한 사전정보만을 이용하여 클러터 신호를 추정함으로써 secondary 데이터 없이 클러터를 억제하는 알고리즘을 제시한다. 바이스테틱 클러터의 angle-Doppler 스펙트럼 상에서 구조 분석을 통해 사전정보로 부터 클러터를 추정하는 것이 가능함을 보이고, 고유치 해석에 의해 클러터 억제 과정을 제시한다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 제시하는 클러터 억제 알고리즘의 성능을 보인다.

Abstract

Radar clutter in real environment is in general heterogeneous and especially nonstationary if radar geometry is of non-sidelooking monostatic structure or bistatic structure. These clutter properties lead to the insufficient number of secondary data of IID(Independent identically distributed) property, conclusively deteriorate clutter suppression performance. In this paper, we propose a clutter suppression algorithm that estimates the clutter signal belonging to cull under test via calculation using only prior information, rather than using the secondary data. Through analyzing the angle-Doppler spectrum of the clutter signal, we show the estimation of the clutter signal using prior information only is possible and present the derivation of a clutter suppression algorithm through eigen-value analysis. Finally, we show the performance of the proposed algorithm by simulation.

Key words: Bistatic Radar, Clutter Suppression, Knowledge Aided, Prior Information, Space Time Adaptive Processing

I. 서 론

최근 표적의 탐지 성능을 향상시키기 위하여 공간(spatial)과 시간(temporal)으로 2차원 이득을 얻을 수 있는 레이

「이 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.」

광운대학교 전자공학과(Department of Electronics Convergence Engineering, Kwangwoon University)

*광운대학교 방위사업학과(Department of Defense Acquisition Program, Kwangwoon University)

**고려대학교 전자통신공학과(Department of Radio Communications Engineering, Korea University)

***국방과학연구소(Agency of Defence Development)

· Manuscript received September 19, 2017 ; Revised October, 16, 2017 ; Accepted October, 16, 2017. (ID No. 20170919-096)

· Corresponding Author: Hyeonmu Jeon (e-mail: hmjeon.bt@gmail.com)

다 시스템이 각광을 받고 있다. 이러한 레이더 시스템은 표적에 대한 탐지성능뿐만 아니라, 공간과 시간신호를 이용하여 클러터를 효과적으로 제거할 수 있으며, 이러한 신호처리 방식을 시-공간 적응처리(Space-Time Adaptive Processing: STAP)라고 한다^[1]. 시-공간 적응처리 기술의 핵심은 cell-under-test(CUT)에 해당하는 클러터를 추정하는데 있다^[2]. RMB 룰은 Homogeneous 클러터 환경에서 최적필터(optimal filter)보다 3 dB 이내의 손실(loss)을 얻기 위해서 IID 가정하에 ‘2×소자 수×펄스 수’ 만큼의 secondary 데이터가 요구됨을 보였다^[3]. 하지만 이론적으로 요구되는 이 secondary 데이터량은 지나치게 방대하고 특히 Non-homogeneous 클러터 환경에서는 IID한 샘플 수가 부족하여 secondary 데이터에 의한 클러터 추정에 한계가 있다^[2]. 이를 해결하기 위해 secondary 데이터를 줄이기 위한 연구가 다양하게 진행되었다^{[2],[4]~[6]}. 하지만 이들 방법은 실제 환경에서 발생하는 비정상적이고 비균질한 특성을 지닌 클러터에 대해서 제한적인 성능을 보임에 따라 사전정보를 이용한 클러터 억제 기술이 새롭게 제안되었다^{[7],[8]}. 참고문헌 [9], [10]은 Bayesian 접근방법을 이용하여 사전정보와 secondary 데이터를 적절히 가중합(weighted-sum)하여 클러터의 공분산 행렬을 추정하는 방식으로 SINR과 MSE 기준으로 최적의 가중치를 제안하였다. 참고문헌 [11]은 스칼라(Scalar)인 가중치를 벡터(vector)로 확장하여 클러터의 subspace 각각에 가중치를 적용하여 효과적으로 클러터의 공분산 행렬을 추정하는 방법을 제시하였다.

위의 여러 가지 연구들은 사전정보를 이용하지만, 여전히 secondary 데이터가 요구되므로 복잡한 구조의 클러터 환경에서는 한계점이 존재한다. 이것을 해결하기 위해 참고문헌 [12]는 CUT의 데이터로 크기와 위상 추정(Amplitude and Phase Estimation: APES) 필터를 적용하여 클러터의 공분산 행렬을 추정하는 방식을 제안하였다. 하지만 클러터의 ICM(Intrinsic Clutter Motion)에 의해서 클러터 스펙트럼이 퍼지는(spreading) 환경에서는 APES 필터의 성능이 제한된다.

본 논문에서는 바이스테틱 레이더 환경에서 CUT에 대하여 사전정보만을 이용하여 ICM이 포함된 클러터를 추정함으로써 secondary 데이터 없이 클러터를 억제하는 알

고리즘을 제시한다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 제시하는 클러터 억제 알고리즘에 의해서 클러터가 적절히 제거되는 것을 보인다.

II. 신호 모델링

레이더의 송신단에서 방사된 송신신호는 그림 1과 같이 표적과 더불어 동일 거리에 존재하는 클러터 성분들에 산란되어 레이더의 수신부로 수신된다.

레이더와 l 번째 클러터 패치가 이루는 도플러 주파수 f_l 는 레이더 송신단과 수신단의 속도벡터 \mathbf{v}_{tx} 와 \mathbf{v}_{rx} , 그리고 l 번째 클러터 패치와 송신단 수신단이 이루는 단위 벡터 $\mathbf{c}_{tx,l}$ 와 $\mathbf{c}_{rx,l}$ 각각의 이동에 의해서 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$f_l = (\mathbf{v}_{tx} \cdot \mathbf{c}_{tx,l} + \mathbf{v}_{rx} \cdot \mathbf{c}_{rx,l}) / \lambda \quad (1)$$

위의 식 (1)에서 λ 는 파장(wavelength)을 의미한다. M 개의 펄스를 사용하고 N 개의 소자로 구성된 선형 배열 안테나로 수신되는 신호 \mathbf{x} 는 다음식과 같다^[13].

$$\mathbf{x} = \alpha_T \mathbf{b}(f_T) \otimes \mathbf{a}(\theta_T) + \sum_{l=1}^{N_c} \alpha_l \mathbf{b}(f_l) \otimes \mathbf{a}(\theta_l) + \mathbf{w} \quad (2)$$

여기서 \mathbf{w} 는 백색 잡음으로 $CN(0, \sigma^2)$ 을 따르고, 아래 첨자 T 는 표적을 의미하며, 표적과 동일 거리에 있는 클러터 패치는 N_c 개라고 가정하였다. \otimes 는 Kronecker 연산이고, $\mathbf{b}(f_l)$ 와 $\mathbf{a}(\theta_l)$ 는 도플러(Doppler) 지향(Steering) 벡

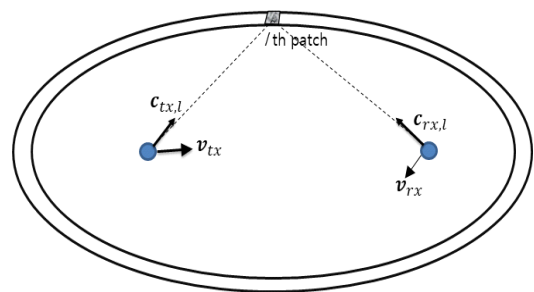


그림 1. 바이스테틱 레이더 환경

Fig. 1. Bistatic radar geometry.

터와 공간(spatial) 지향 벡터로서 다음식과 같다.

$$b(f_l) = e^{-j2\pi(\mathbf{v}_{tx} \cdot \mathbf{c}_{tx,l} + \mathbf{v}_{rx} \cdot \mathbf{c}_{rx,l})(m-1)T_{PRI}/\lambda}, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (3)$$

$$a(\theta_l) = e^{-j2\pi(\mathbf{p}_{rx,n} \cdot \mathbf{c}_{rx,l})/\lambda}, \quad n = 1, \dots, N \quad (4)$$

여기서 θ_l 와 $\mathbf{p}_{rx,n}$ 은 l 번째 클러터 패치에 의해서 송신단에 수신되는 신호의 입사각과 송신단의 위치벡터를 각각 의미한다.

실제 클러터는 비정상성과 비균질한 특성을 갖기 때문에 클러터의 진폭 α_l 은 Log-normal 분포를 따르고, 클러터의 ICM에 의해서 생기는 도플러 특성을 Gaussian 스펙트럼으로 모델링 하였으며^[14], 표적신호의 진폭 α_T 는 Swerling 1 모델을 가정하였다^[15].

따라서 식 (2)의 첫 번째 항은 표적신호이고, 두 번째 항은 표적과 동일 거리에 존재하는 클러터를 나타낸다.

레이다의 송수신 위치 정보와 이동에 대한 운용정보를 사전정보로 활용하면 CUT의 클러터 \mathbf{x}_c 는 다음과 같이 이론적으로 모델링하여 계산할 수 있다.

$$\mathbf{x}_c = \sum_{l=1}^{N_c} b(f_l) \otimes a(\theta_l) \quad (5)$$

이때 클러터 진폭의 통계적 특성은 알 수 없으므로 $\alpha_n = 1$ 이라고 가정하였다.

III. 클러터 억제 알고리즘

수신 신호 \mathbf{x} 에 포함된 클러터는 레이다와 Iso-range에 존재하는 클러터와의 거리, 레이다 송수신기의 위치, 그리고 레이다 송수신기의 속도벡터에 의해서 결정되며, angle-Doppler 평면에서 보면 연속된 릿지(ridge) 형태를 갖는다. 그림 2는 표적 신호가 포함된 특정 CUT로 부터 수신된 신호의 angle-Doppler 평면에서의 스펙트럼을 나타낸다.

여기에 사용된 시뮬레이션 환경 파라미터 값들은 IV. 절 표 1에 나타내었고 그림 2의 오른쪽에 있는 그라데이션 바(Gradation bar)는 신호의 파워를 표현한 것으로 단위는 [dB]이다.

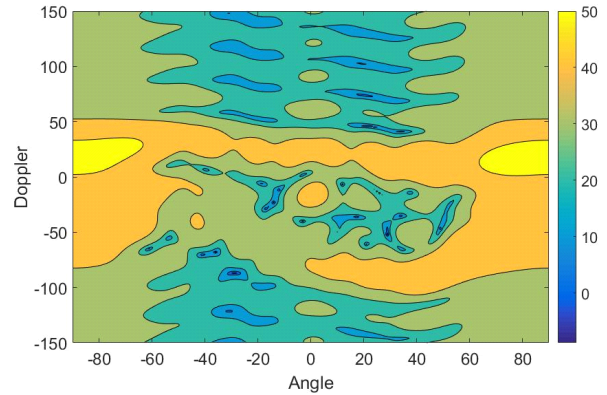


그림 2. CUT의 angle-Doppler 스펙트럼
Fig. 2. Angle-Doppler spectrum of the CUT.

클러터의 스펙트럼은 클러터 패치의 RCS 값에 따라서 클러터 릿지를 이루는 각각의 angle-Doppler 지점들의 진폭값이 변하며, 또한 클러터의 ICM에 의해서 클러터 릿지의 퍼짐(Spread) 현상이 발생한다. 그림 3은 표 1에 주어진 사전정보로부터 식 (5)를 이용해서 계산한 CUT의 클러터 \mathbf{x}_c 의 angle-Doppler 스펙트럼이다. 그림 2와 비교해 보면 클러터 릿지의 형태는 유사하지만, 퍼짐 정도나 각 클러터 패치마다 다른 RCS는 적절히 보여주지 못함을 확인할 수 있다. 따라서 클러터 릿지를 이루는 angle-Doppler 지점들의 진폭과 클러터 릿지의 퍼짐 정도를 적절히 추정하여 클러터를 억제하는 과정이 필요하다. 이를 위해 제안 방법에서는 우선 클러터 릿지 후보군 생성 및 실제

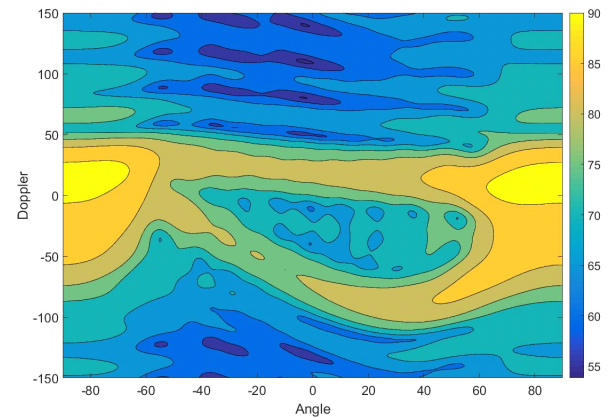


그림 3. 사전정보로 얻은 angle-Doppler 스펙트럼
Fig. 3. Angle-Doppler spectrum from knowledge information.

수신신호와와의 상관관계를 이용해서 클러스터를 생성하고, 이어서 고유치 해석 과정을 통해서 클러스터 성분을 제거하는 두 단계 과정을 진행한다.

3-1 클러스터 신호 추정

그림 2와 그림 3을 비교해 보면 사전 정보로부터 얻어진 클러스터 릿지는 수신 신호의 클러스터 릿지와 동일 위치에 있으나, ICM이 포함되어 있지 않아서 대체로 퍼짐 정도가 적다. 그러므로 사전 정보로부터 얻어진 클러스터 릿지로부터 도플러 주파수만 증감된 클러스터 릿지를 생성한다면 실제 클러스터 환경을 반영한 후보군이 될 수 있다. 즉, 식 (5)를 이용해서 계산한 클러스터 \mathbf{x}_c 의 도플러 주파수 f_l 을 $f_l \pm n\Delta f$ 로 적절히 대체함으로써 다음과 같이 후보군 클러스터 릿지를 생성할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{x}}_i = \sum_{l=1}^{N_c} \mathbf{b}(f_l + i\Delta f) \otimes \mathbf{a}(\theta_l), \text{ for } \forall i \quad (6)$$

위 식에서 Δf 는 쉬프트(shift)시키고자 하는 도플러 주파수 간격이고, i 는 음수를 포함한 정수값을 갖는다. 또한 이때 i 의 범위는 다음 식 (7)의 조건으로부터 결정된다.

$$\underset{i}{\text{find}} \frac{(\hat{\mathbf{x}}_{\Delta f, i} \cdot \mathbf{x})}{\|\hat{\mathbf{x}}_{\Delta f, i}\| \|\mathbf{x}\|} > \gamma, \text{ for } \forall i \quad (7)$$

여기서 γ 는 설계 변수로써 \mathbf{x} 와 $\hat{\mathbf{x}}_{\Delta f, i}$ 가 갖는 상관도(correlation)의 경계값(threshold)이고 $\|\cdot\|$ 는 norm 연산을 의미한다. 식 (7)의 조건은 후보 클러스터가 실제 수신 신호에 포함된 클러스터와 유사한 정도를 판별하는 것으로 i 가 커지면 후보 클러스터 도플러가 실제 클러스터 도플러 범위를 벗어나게 되어 후보군에서 제외시켜야 한다. 식 (6)은 백로브(backlobe)로 입사되는 신호를 고려하지 않고 후보 클러스터 릿지를 생성시키는 경우로서, 만약 백로브를 고려해야 한다면 angle-Doppler 평면에서 특정 angle 당 두 개의 도플러가 존재하게 되어 식 (6)보다는 복잡한 도플러 증감 과정이 필요하다.

3-2 클러스터 억제 알고리즘

사전정보를 이용하여 얻은 클러스터 $\hat{\mathbf{x}}_{\Delta f, i}$ 의 공분산 행

렬 R_i 는 고유값 분해에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} R_i &= \hat{\mathbf{x}}_{\Delta f, i}^H \hat{\mathbf{x}}_{\Delta f, i} \\ &= (\mathbf{v}_{i,1} \cdots \mathbf{v}_{i,NM}) \begin{pmatrix} \lambda_{i,1} & & \\ & \lambda_{i,2} & \\ & & \ddots \\ & & & \lambda_{i,NM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_{i,1}^H \\ \mathbf{v}_{i,2}^H \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{i,NM}^H \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (8)$$

위의 식에서 H 는 hermitian 연산이고, $\mathbf{v}_{i,1} \mathbf{v}_{i,2} \cdots \mathbf{v}_{i,NM}$ 는 고유벡터(Eigen-vector)이며, $\lambda_{i,1} \lambda_{i,2} \cdots \lambda_{i,NM}$ 는 고유치(eigen-value)이다. $\hat{\mathbf{x}}_{\Delta f, i}$ 는 noise free이므로 $\text{Rank}(\mathbf{R}_i) = K_i \leq NM$ 이고, $\mathbf{v}_{i,1} \mathbf{v}_{i,2} \cdots \mathbf{v}_{i,K_i}, \forall i$ 의 성분들을 수신 신호 \mathbf{x} 에서 다음식과 같이 제거한다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_0 &= \mathbf{x} \\ \hat{\mathbf{x}}_i &= \hat{\mathbf{x}}_{i-1} - (\hat{\mathbf{x}}_{i-1}^H \mathbf{v}_{i,1}) \mathbf{v}_{i,1} \\ &\quad - \cdots - (\hat{\mathbf{x}}_{i-1}^H \mathbf{v}_{i,K_i}) \mathbf{v}_{i,K_i}, \forall i \end{aligned} \quad (9)$$

위의 식 (9)로부터 사전정보 신호로부터 추정된 클러스터 성분들 $\mathbf{v}_{i,1} \mathbf{v}_{i,2} \cdots \mathbf{v}_{i,K_i}, \forall i$ 을 수신 신호 \mathbf{x} 에 내적하여 제거하는 과정을 통해 클러스터의 진폭에 대한 정보를 추정하는 것을 확인할 수 있다.

IV. 시뮬레이션

본 절에서 바이스테틱 레이더의 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같다.

그림 4는 식 (6)에서 i 범위 결정을 위한 \mathbf{x} 와 $\hat{\mathbf{x}}_{\Delta f, i}$ 의 상관도를 나타낸 것이다.

표 1. 레이더 시스템 파라미터

Table 1. Parameters of radar system.

Parameter	Value	Parameter	Value
Tx position	[0, 12.5] km	Iso-range	65 km
Rx position	[0, -12.5] km	ICM	2 m/s
\mathbf{v}_{tx}	[35, 35] m/s	$[f_T, \theta_T]$	[-15 Hz, 0°]
\mathbf{v}_{rx}	[0, -50] m/s	SCR	-17 dB
# of pulses	12	# of elements(Rx)	12

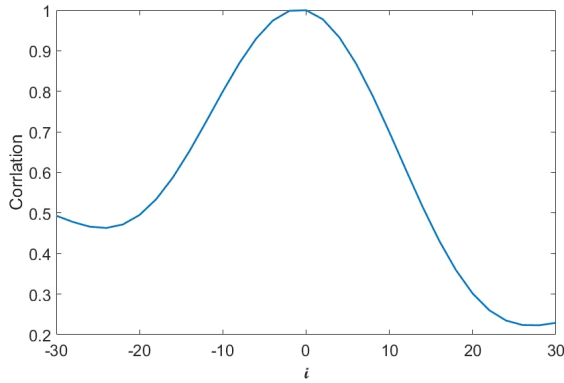


그림 4. i 에 따른 \mathbf{x} 와 $\hat{\mathbf{x}}_{\Delta f, i}$ 의 상관도
Fig. 4. Correlation between \mathbf{x} and $\hat{\mathbf{x}}_{\Delta f, i}$ via i .

i 가 증가할수록 $\hat{\mathbf{x}}_{\Delta f, i}$ 의 릿지가 커지기 때문에 수신 신호 \mathbf{x} 와의 상관도가 감소한다. 이와 반대로 i 가 감소할수록 마찬가지로 상관도가 감소하지만, 다시 상관도가 반등하는 구간을 그림 4에서 확인할 수 있다. 이것은 생성된 클러터 릿지 일부가 angle-Doppler 평면에서 $f_T = -15$ Hz에 존재하는 표적 신호와 유사하게 된 것으로 표적이 제거되지 않기 위해서는 표적 신호와의 상관도보다 크도록 γ 를 설정해야 함을 확인할 수 있다. 따라서 $\hat{\mathbf{x}}_{\Delta f, i}$ 와 표적과의 상관도가 0.5~0.6 정도에 위치하므로 γ 가 표적과의 상관도보다 충분히 크도록 $\gamma = 0.7$ 로 정하고, 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 5는 $\gamma = 0.7$ 을 만족하는 i 의 일부인 $i = -4, \dots, 0$

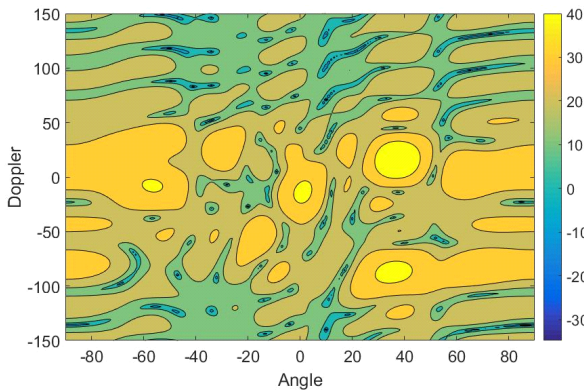


그림 5. $i = -4, \dots, 0$ 를 사용하여 억제한 신호
Fig. 5. Suppressed signal using $i = -4, \dots, 0$.

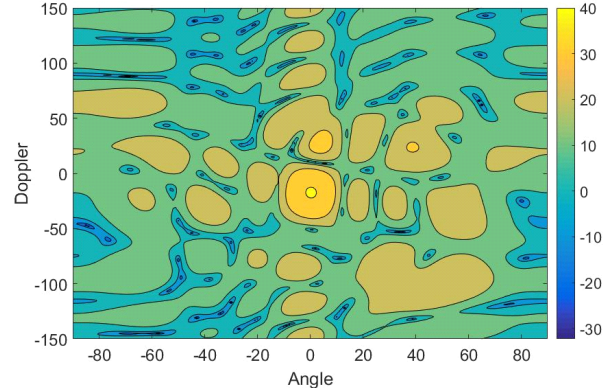


그림 6. $\gamma = 0.7$ 를 만족하는 모든 i 를 사용하여 억제한 신호
Fig. 6. Suppressed signal using all i satisfied by $\gamma = 0.7$.

에 대해서만 적용하여 클러터 억제 알고리즘을 적용한 출력 신호의 angle-Doppler 스펙트럼이다.

일부 클러터는 제거되었지만, 여전히 상대적으로 신호 세기가 강한 클러터가 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 ICM에 의해서 ICM이 없는 환경의 클러터 릿지보다 좁아진 영역($i = -4, \dots, 0$)의 클러터는 억제가 되었지만, 그 이외의 영역에 대해서는 $\hat{\mathbf{x}}_{\Delta f, i}$, $i = -4, \dots, 0$ 로부터 수신신호 \mathbf{x} 가 갖고 있는 클러터 신호 공간을 추정할 수 없기 때문에, 클러터 성분들을 완전히 제거하지 못한 결과로 해석할 수 있다.

그림 6은 $\gamma = 0.7$ 을 만족하는 모든 i 에 대하여 클러터 억제 알고리즘을 적용한 결과를 angle-Doppler 스펙트럼으로 나타내었다.

그림 6으로부터 표적 신호는 정확히 남고, 클러터 신호만 적절히 제거됨을 확인할 수 있다.

V. 결 론

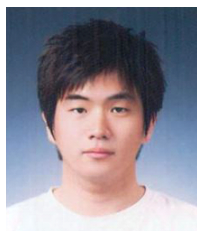
본 논문은 바이스태틱 레이다 환경에서 발생하는 비-균질한 클러터에 대하여 angle-Doppler 스펙트럼상에 나타나는 클러터 릿지 구조에 대해 분석하고, 클러터를 억제하는 알고리즘을 제시하였으며, 수학적 유도 및 시뮬레이션을 통해 클러터가 제거됨을 보였다. 실제 수신신호에 포함된 클러터를 사전정보로부터 주파수가 변이된 클러터를 생성하여 ICM에 의해 퍼진 클러터 신호 공간들을

추정하였고, 추정된 신호 공간들을 수신신호에서 내적하여 제거함으로써 진폭 성분이 추정되는 것을 보였다. 본 논문에서 제시한 클러터 억제 알고리즘은 CUT 데이터만을 사용하기 때문에 IID한 secondary 데이터 부족 문제를 해결할 수 있고, 여러 가지 형태의 클러터로 이루어진 복잡한 환경에서도 활용이 가능할 것으로 기대한다.

References

- [1] W. L. Melvin, "A STAP overview", *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.* vol. 19, no. 1, pp. 19-35, 2004.
- [2] J. R. Guerci, *Space-Time Adaptive Processing for Radar*, MA: Artech House, 2003.
- [3] I. S. Reed, J. D. Mallet, and L. E. Brennan, "Rapid convergence rate in adaptive arrays", *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 6, pp. 853-863, 1974.
- [4] S. T. Smith, "Covariance, subspace and intrinsic Cramer-Rao bounds", *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 53, no. 5, pp. 1610-1630, 2005.
- [5] J. F. Degurse, L. Savy, and S. Marcos, "On using a priori knowledge in space-time adaptive processing", *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 56, no. 6, pp. 2598-2602, 2008.
- [6] G. Zhiqi, T. Haihong, "Robust STAP algorithm based on knowledge-aided SR for airborne radar", *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 11, no. 2, pp. 321-329, 2017.
- [7] K. L. Noh, "Space-time adaptive processing : A knowledge-based perspective for airborne radar", *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 23, no. 1, pp. 51-65, 2006.
- [8] J. R. Guerci, E. J. Baranoski, "Knowledge-aided adaptive radar at DARPA", *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 23, no. 1, pp. 41-50, 2006.
- [9] J. S. Bergin, C. M. Telxera, P. M. Techau, and J. R. Guerci, "Improved clutter mitigation performance using knowledge-aided space-time adaptive processing", *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42, no. 3, pp. 997-1009, 2006.
- [10] P. Stoica, J. Li, X. Zhu, and J. R. Guerci, "On using a priori knowledge in space-time adaptive processing", *IEEE Transaction on Signal Processing*, vol. 56, no. 6, pp. 2598-2602, 2008.
- [11] H. Jeon, Y. Chung, W. Chung, and H. Yang, "Clutter covariance matrix estimation using weight vectors in knowledge-aided STAP", *IET Electronics Letters*, vol. 53, Issue. 8, 2017.
- [12] E. Aboutanios, B. Mulgrew, "Evaluation of the single and two data set STAP detection algorithms using measured data.", *IGARSS 2007*, Barcelona, pp. 23-28, 2007.
- [13] M. S. Greco, S. Watts, *Academic Press Library in Signal Processing: Volume 2 - Communications and Radar Signal Processing, chapter 12*, Academic Press, New York, NY, 2014.
- [14] M. S. Greco, S. Watts, *Academic Press Library in Signal Processing: Volume 2 - Communications and Radar Signal Processing, Chapter 11*, Academic Press, New York, NY, 2014.
- [15] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, McGraw-Hill-Interscience, 2005.

전 현 무



2012년 3월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
 2017년 8월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
 2017년 9월~현재: 광운대학교 전파공학과
 [주 관심분야] 레이더 탐지/추정, STAP, SAR GMTI

양 동 혁



1997년 3월: 공군사관학교 전자공학과 (공학사)
 2006년 6월: 미국 Wichita State University
 전기전자공학과 (공학석사)
 2015년 3월~현재: 광운대학교 방위사업
 학과 박사과정
 [주 관심분야] SAR ATR, SAR GMTI,
 Maximin Algorithm, GPS 좌표 보정

정 용 식



1989년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)
2000년 8월: 서울대학교 전기공학부 (공학박사)
2003년 3월~2006년 2월: 명지대학교 통

신공학과 조교수

2006년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과 교수

[주 관심분야] 전자파수치해석 및 EMI/EMC, Radar 신호처리

김 중 만



2002년 2월: 경북대학교 전자전기공학부 (공학사)
2004년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2005년 2월~현재: 국방과학연구소 연구원
[주 관심분야] 레이더 시스템 및 탐지/추적

정 원 주



1989년 2월: 고려대학교 수학과 (이학사)
1999년 2월: Cornell University Electrical Engineering (공학석사)
2002년 2월: Cornell University Electrical Engineering (공학박사)
2002년~2005년: (주)Dotcast, Senior System Architect로 근무

2005년~현재: 고려대학교 컴퓨터통신공학부 정교수

[주 관심분야] Digital Signal Processing for Digital Communications Systems, MIMO RADAR

양 훈 기



1985년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1987년 5월: 미국 SUNY at Buffalo University 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
1992년 4월: 미국 SUNY at Buffalo University 전기컴퓨터공학과 (공학박사)
1993년 3월~현재: 광운대학교 전파공학과

교수

[주 관심분야] 무선통신 시스템, UWB, RFID, 스펙트럼 공학, 레이더 신호처리