

중위수를 이용한 새로운 간섭 공분산 행렬의 예측이 적용된 Space-Time Adaptive Processing에 대한 연구

Study on Space-Time Adaptive Processing Based on Novel Clutter Covariance Matrix Estimation Using Median Value

강성용 · 정지채

Sungyong Kang · Jichai Jeong

요약

본 논문은 space-time signal processing(STAP)의 신호 모델과 불균일한 클러터 환경을 제시하고 이를 극복하고자 연구된 nonhomogeneity detector(NHD)의 사용 이후에도 일어나는 심각한 성능 저하를 극복하고자 중위수(median)를 이용한 간섭 공분산 행렬의 새로운 예측 방법을 제시하였다. 또한 대각 로드(diagonal loading)를 적용하여 고유값(eigen value) 특성을 개선시켰으며 signal to interference plus noise ratio(SINR) 손실을 계산하여 비교하였다. 마지막으로 modified sample matrix inversion(MSMI) 통계량으로 목표물 검출 능력을 비교한 결과 제시된 방법이 평균값(average)으로 정의된 기존의 방법보다 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we presented a signal model of STAP and actual environment of clutter. The novel estimation method of clutter covariance matrix using median value is proposed to overcome serious performance degradation after NHD in nonhomogeneous clutter. Eigen value characteristic is improved through diagonal loading. Target detection ability and SINR loss of the proposed method though MSMI statistic is also compared with conventional method using average value. The simulation results, confirm the proposed method has better performance than others.

Key words : STAP, Nonhomogeneous Clutter, NHD, Median Value, Estimation of Clutter Covariance Matrix

I. 서론

Space-time signal processing(STAP)를 이용한 레이더 시스템은 비행체에서 클러터나 잡음 방해 전파와 같은 간섭 신호를 억제하고 목표물을 검출하기 위해 설계되었다^[1]. STAP에서는 간섭 신호를 space-time filter를 통해 억제하는데, 이때 가중치 벡터를 계산하여야 한다. 이를 위해서는 간섭 공분산 행렬의 예측이 필수적이므로 i.i.d.(independent and identically-

distributed)한 샘플들을 이용하여 maximum likelihood estimation(MLE)을 통해 예측하게 된다. 그러나 실제 STAP 환경에서는 빌딩, 차량, 해변가 등의 환경으로 인해 발생하는 불균일한 클러터로 인하여 모든 샘플들이 i.i.d.한 성질을 가지지 않아 심각한 성능 저하가 나타난다^{[2]~[4]}.

이러한 불균일한 클러터의 영향을 감소시켜 주는 것이 nonhomogeneity detector(NHD)이다. 그러나 inner product(IP)나 generalized inner product(GIP)와 같은

¹This research was supported in part by Brain Korea 21 project in 2009 and WCU(World Class University) program through the Korea Science and Engineering Foundation funded by the Ministry of Education, Science and Technology(R31-2008-000-10008-0).

고려대학교 컴퓨터·전파통신공학과(Department of Computer and Radio Communication Engineering, Korea University)

· 논문 번호 : 20090929-111

· 교신저자 : 정지채(e-mail : jcj@korea.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2009년 12월 16일

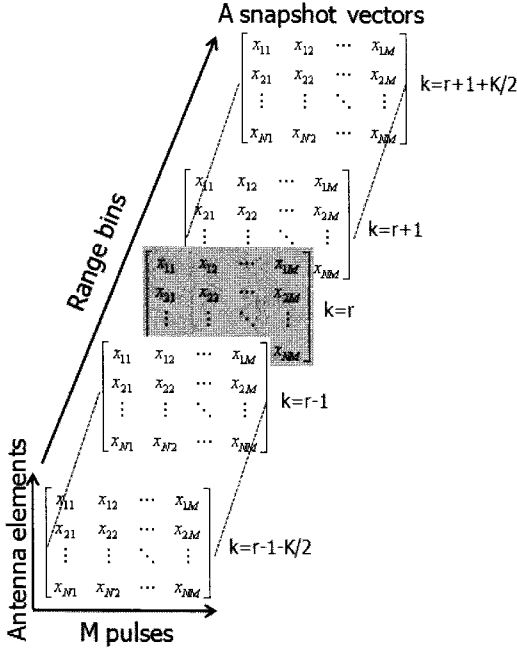


그림 1. 각 range bin에 따라 배열된 snapshot vector
Fig. 1. Array of snapshot vector for given range bins.

NHD를 거친 후에도 i.i.d.하지 않은 데이터가 완벽히 제거되지 않아 간섭 공분산 행렬의 예측에 포함되어 시스템 성능에 여전히 많은 영향을 끼친다. 본 논문에서는 이러한 불균일한 클러터의 영향을 줄이기 위하여, 간섭 공분산 행렬 예측에 있어서 행렬의 각 요소의 평균값으로 표현되는 기존의 방법 대신 중위수를 이용한 예측 방법을 제시하였다. 고유값 특성의 개선을 위하여 대각 로드를 적용하였고^[5], 그 이후 SINR 손실과 MSMI 통계량으로 목표물 검출 능력을 확인하였다.

II. 신호 모델

N 개의 수신 안테나가 간격이 일정하게 배열되어 있다. 전송 신호의 주기가 T , 일 때 pulse-repetition frequency(PRF) $f_p = 1/T$,이고, 한 주기 동안 coherent 펄스를 M 개 만큼 보낸다면, K 개의 관심 있는 range bin에 대하여 그림 1과 같이 수신 신호를 각 range bin당 N 개의 행과 M 개의 열을 갖는 3D 데이터 행렬로 표현할 수 있다. 이때 각 range bin의 신호는 목표물, 클러터, 잡음 신호의 합으로 나타낼 수 있다^{[2],[6]}.

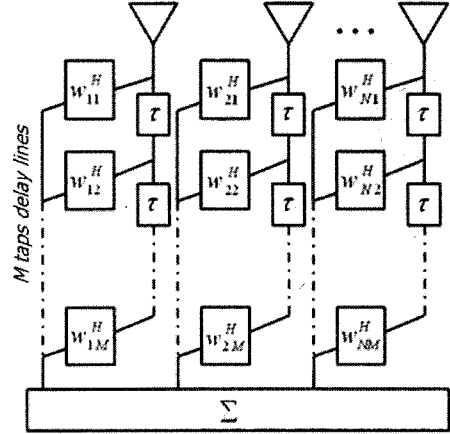


그림 2. 위상 배열 레이더의 시공간 필터 구조
Fig. 2. Structure of space-time filter of phased array radar.

$$\bar{x}(t) = \alpha_i \bar{v}_i(\omega_i, \nu_i) + \bar{x}_c(t) + \bar{n}(t) \quad (1)$$

식 (1)에서 $\bar{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_{MN}(t)]^T$ 이고, α_i 는 복소수 형태의 목표물 감쇠 요소이다. 또한 목표물 조종 벡터(steering vector)는 시간 조종 벡터 $\bar{a}(\nu_i)$ 와 공간 조종 벡터 $\bar{b}(\omega_i)$ 의 Kronecker 곱으로 $\bar{v}_i(\omega_i, \nu_i) = \bar{b}(\omega_i) \otimes \bar{a}(\nu_i)$ 와 같이 표현된다. 각 조종 벡터는 아래와 같다.

$$\bar{a}(\nu_i) = [1 \ e^{j2\pi\nu_i} \ \dots \ e^{j2\pi(M-1)\nu_i}]^T$$

$$\bar{b}(\omega_i) = [1 \ e^{j2\pi\omega_i} \ \dots \ e^{j2\pi(N-1)\omega_i}]^T$$

$\nu_i = f_i/f_p$, $\omega_i = (d/\lambda)\sin(\theta_i)$ 이고, f_i 는 목표물 Doppler 주파수, d 는 안테나 사이의 거리, λ 는 파장의 길이, 그리고 θ_i 는 목표물의 방위각이다.

N_c 개의 여러 개의 클러터 신호의 합으로 표현되는 \bar{x}_c 는 위의 목표물 신호와 마찬가지로 아래와 같이 조종 벡터 형태로 나타낼 수 있다.

$$\bar{x}_c = \sum_{i=1}^{N_c} \gamma_i \bar{v}_i(\omega_i, \nu_i) \quad (2)$$

여기서 γ_i 는 random amplitude로 STAP는 균일한 클러터 환경에 적합하게 설계되었기 때문에 Gaussian 분포로 적용된다. 그러나 많은 연구자들의 앞선 연구와 실험 결과 아래와 같은 symmetric α -stable(S α S) 분포가 실제 STAP 환경의 클러터 신호를 가장 잘 나타냄이 입증되었다^{[4],[7]}.

$$\phi(\omega) = \exp(j\delta\omega - \gamma|\omega|) \quad (3)$$

식 (3)과 같은 불균일한 특성을 갖는 실제 클러터 환경은 STAP의 성능을 크게 저하시킨다.

식 (1)과 같이 표현된 수신 신호는 간섭신호의 영향을 줄이기 위하여 그림 2와 같은 space-time filter를 거치게 된다. 이때 사용되는 가중치 벡터 w 의 계산은 상수 x , 간섭 공분산 행렬 R , 그리고 목표물 스티어링 벡터 v_s 를 사용하여 $w = xR^{-1}v_s$ 와 같이 나타낼 수 있다. 이와 같은 가중치 벡터는 간섭 공분산 행렬 R 을 알고 있는 경우이다. 실제 STAP에서는 R 을 알 수 없기 때문에 예측된 간섭 공분산 행렬을 사용한다. 간섭 공분산 행렬의 예측 방법은 주로 sample matrix inversion(SMI)를 기반으로 한 방법을 널리 사용하고 있다. 그러므로 예측된 간섭 공분산 행렬 \hat{R}^{-1} 을 이용하여 $w_{SMI} = x\hat{R}^{-1}v_s$ 와 같이 표현한다^[6]. 따라서 R 의 예측의 정확도에 따라 STAP의 성능이 크게 달라진다.

III. 간섭 공분산 행렬의 예측

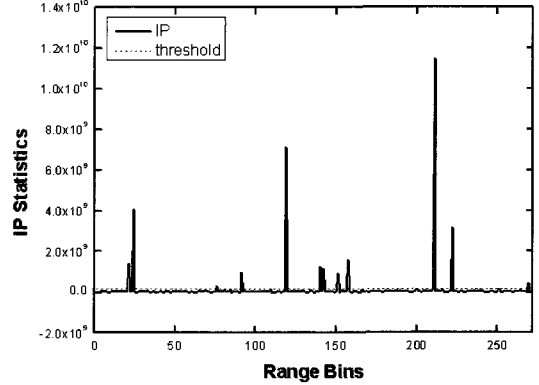
이상적인 STAP의 경우 식 (2)에서 γ_i 로 표현된 클러터의 크기를 Gaussian 분포로 균일한 클러터 환경으로 나타낸다. 이 때 수신되는 데이터의 양 또한 무한하기 때문에 예측된 간섭 공분산 행렬은 기대값으로 $\hat{R} = E[x_c x_c^H]$ 와 같이 나타낸다^[8]. 여기서 H 는 Hermitian 연산자이다. 그러나 실제 환경은 식 (3)과 같은 S_aS 분포로 표현되는 불균일한 클러터 환경을 가지며 수신되는 데이터 또한 유한하다.

3-1 Nonhomogeneity Detector

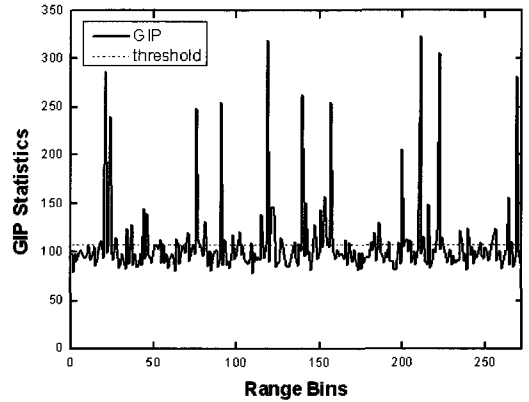
균일한 클러터 환경에서 수신된 데이터는 i.i.d.한 성질을 가지고 있다. 그러나 실제 환경에서는 불균일한 클러터의 영향으로 i.i.d.하지 않은 데이터, 즉 이상치들이 존재하게 된다. NHD는 이상치를 제외하는 작업을 하며, 주로 IP 방법과 GIP 방법을 사용한다. IP 방법은 각 셀의 파워를 계산하여 비교하는 방법으로 다음과 같은 식으로 표현한다^[9].

$$IP = x^H x \quad (4)$$

어떠한 셀에서 식 (4)를 통하여 계산한 IP 값이 일정한 기준치를 넘게 되면 이상치로 정의하고 제거한



(a) IP 통계량
(a) IP statistic



(b) GIP 통계량
(b) GIP statistics

그림 3. 각 range bin 당 NHD 방식에 따른 통계량
Fig. 3. NHD statistics versus each range bin.

다. GIP 방법은 각 셀을 Mahalanobis 거리를 구하는 것과 유사하게 다음과 같이 나타낸다^[9].

$$GIP = x^H \hat{R}^{-1} x \quad (5)$$

어떠한 셀에서 식 (5)를 통하여 계산한 GIP 값이 일정한 기준치를 넘게 되면 이상치로 정의하고 제거한다. 이와 같은 방법이 그림 3에 나타나 있다. 식 (4), (5)를 통해 구한 각 rang bin당 IP값과 GIP값이 파선으로 표현된 일정한 기준치를 초과하는 이상치들을 제거한 이후에 간섭 공분산 행렬의 예측을 함으로써 불균일한 클러터의 영향을 줄이게 된다.

3-2 간섭 공분산 행렬의 예측

실제 환경에서 간섭 공분산 행렬의 예측은 데이

표 1. 시뮬레이션에 사용된 시스템 변수들
Table 1. Parameters used in the simulation.

Parameter	Value
N	10
M	12
β (slope of clutter ridge)	1
CNR	40 dB
Azimuth angle	0°
Normalized Doppler	0.2
SNR	7 dB

과 중위수를 이용한 방법의 성능을 평가하기 위하여 위상 단일 레이더를 사용하여 시뮬레이션을 하였다. 사용된 변수는 표 1과 같다.

4-1 고유값의 분석

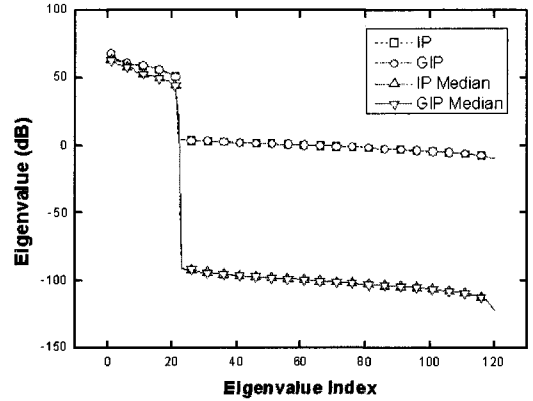
간섭 공분산 행렬을 구할 때 평균값을 이용한 기존의 방법과 달리, 본 논문에서 제시한 방법은 중위수를 이용하였기 때문에 주요하지 않은 고유값에 반영되는 잡음의 영향이 크다. 이상적인 경우, 클러터를 대변하는 주요한 고유값 이외의 값은 0 dB로 나타난다. 그러나 실제 STAP의 샘플은 유한하므로 주효하지 않은 고유값에 노이즈 특성이 나타나 0 dB에 수렴하지 않는다. 따라서 이러한 노이즈의 영향으로 인한 고유값의 왜곡을 줄이기 위해 대각 로드를 사용하였다^[5].

$$\tilde{R} = \hat{R} + \delta I_{MN} \quad (10)$$

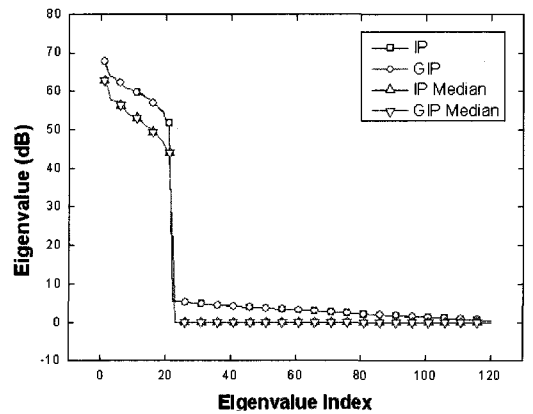
여기서 $\delta=1$ 로 설정하였다^[11]. 식 (10)을 이용하여 대각 로드를 적용하기 전과 후의 고유값이 그림 5에 나타나 있다. 대각 로드를 적용하기 전은 NHD 과정만 거친 기존의 방법이 논문에서 제시한 방법보다 좋은 고유값 특성을 보여주지만, 대각 로드를 적용한 이후에는 이상적인 경우와 같이 0 dB에 수렴하여 기존의 방법보다 NHD 이후에 중위수를 사용한 제시된 방법이 보다 좋은 고유값 특성을 보여준다.

4-2 SINR 손실 비교

STAP의 성능을 가장 잘 나타내는 방법은 이상적인 경우의 SINR에 비하여 얼마 만큼의 성능을 보여주는지 알 수 있는 SINR 손실을 측정하는 것이다.



(a) 대각 로드 이전
(a) Without diagonal loading

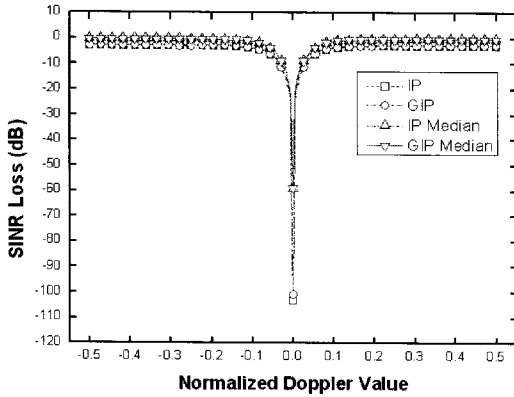


(b) 대각 로드 이후
(b) With diagonal loading

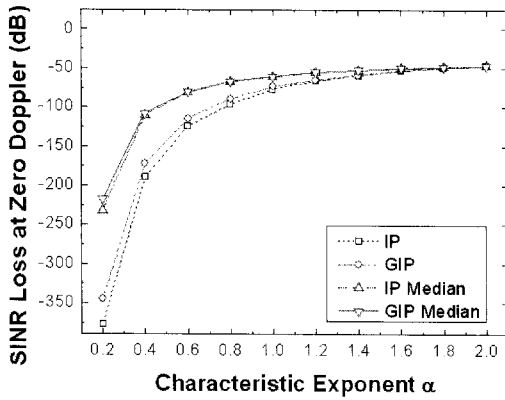
그림 5. 대각 로드에 따른 고유값의 특성
Fig. 5. Eigenvalue characteristics with/without diagonal loading.

$$SINR_{Loss} = \nu(\omega, \nu) H^R \nu(\omega, \nu) \quad (11)$$

SINR 손실을 $S_{\alpha} S$ 분포의 특성 지수 α 를 0.2에서 2.0까지 변화시키며 계산한 결과가 그림 6에 나타나 있다. zero Doppler 이외의 부분은 α 에 관계없이 제시된 방법이 기존의 방법에 비하여 각각 약 2.5 dB 만큼 더 좋은 성능을 보여주기에 α 가 0.8일 때의 SINR 손실만을 그림 6의 (a)에 나타내었다. 그러나 zero Doppler 부분에서는 기존의 방법과 제시한 방법 모두 α 값에 따라 큰 차이를 보이기에 그림 6의 (b)에 zero Doppler 부분의 SINR 손실을 α 값을 변화시키며 나타내었다. α 값이 감소할수록 그 차이가 IP의 경우 약 0.1 dB ($\alpha=2.0$)에서 80 dB ($\alpha=0.4$), GIP의 경



(a) $\alpha=0.8$
(a) $\alpha=0.8$



(a) α 값의 변화에 따른 zero Doppler의 SINR 손실
(a) SINR Loss with various alpha value at zero Doppler

그림 6. 평균값을 이용한 방법과 중위수를 이용한 방법의 SINR 손실 비교

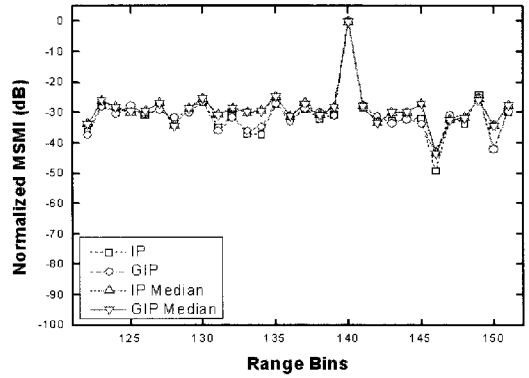
Fig. 6. Comparison of SINR loss of using average between using median.

우 약 0.1 dB ($\alpha=2.0$)에서 65 dB ($\alpha=2.0$)로 매우 급격히 증가하는 것으로 보아 중위수를 이용한 간섭 공분산 행렬의 예측 방법은 기존의 방법보다 불균일한 클러터 신호가 강한 환경일수록 성능이 우수하다는 것을 알 수 있다.

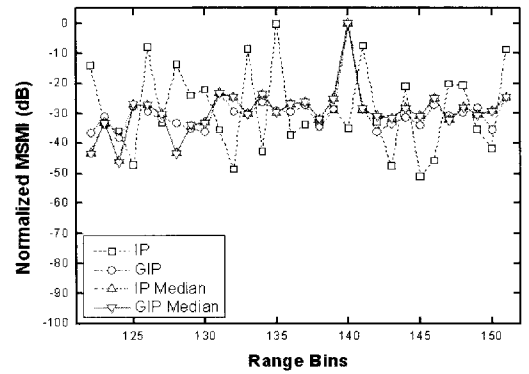
4-3 목표물 검출 통계량

마지막으로 STAP의 궁극적인 목표인 목표물 검출능력을 비교하기 위하여 MSMI 검출 통계량을 계산하여 분석하였다. 계산은 아래와 같다.

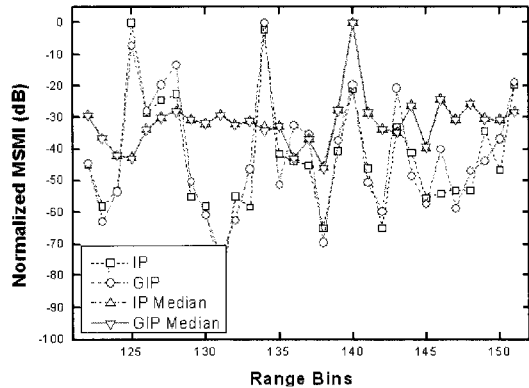
$$N_{MSMI} = \frac{|w^H x|^2}{v_s^H \hat{R}_{CUT} v_s} \quad (12)$$



(a) $\alpha=0.7$



(b) $\alpha=0.6$



(c) $\alpha=0.5$

그림 7. 각 range bin에 따른 MSMI 테스트 통계량
Fig. 7. MSMI test statistics versus range bins.

위의 식 (12)를 통하여 구한 MSMI 통계량 값을 각각의 방법이 갖는 최대치가 0 dB가 되게 표준화하여 비교하기 쉽게 만든 것이 그림 7이다. 여기서 목표물이 위치한 range bin은 140번째 range bin이다. (a) $\alpha=0.7$ 일 때 기존의 방법과 본문에서 제시한 방법 모두 140번째 range bin의 값이 가장 높게, 즉 목

표물 검출에 성공하였지만 (b) $\alpha=0.6$ 로 불균일한 클러터의 영향이 커지자 기존의 IP 방법은 실패한 것을 볼 수 있다. 또한 (c) $\alpha=0.5$ 로 변화시키자 NHD를 거친 이후 중위수를 이용하는 제시된 방법을 제외하고 기존의 NHD만 거친 IP, GIP 둘 다 목표물 검출에 실패하였다. $S_{\alpha}S$ distribution에서 α 값이 작을수록 불균일한 클러터의 영향이 커지므로, 더 낮은 α 값에서도 목표물 검출이 가능한 중위수를 이용한 간섭 공분산 행렬 예측 방법이 평균값을 이용한 기존의 방법보다 더 우수함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 간섭 공분산 행렬의 예측을 위하여 STAP에 적합한 신호 모델을 제시한 후 실제 환경과 가장 비슷한 환경인 불균일한 클러터 환경을 $S_{\alpha}S$ 분포로 나타내었다. 이와 같이 표현된 데이터들은 IP, GIP와 같은 NHD를 거치며 불균일한 클러터로 인해 발생한 이상치를 제거한 후 DoF의 2배만큼의 샘플을 선택하여 간섭 공분산 행렬의 예측에 사용된다. 기존의 간섭 공분산 행렬의 예측 방법은 각 요소의 평균값으로 표현할 수 있다. 그러나 다수의 이상치가 존재할 경우 NHD는 masking effect로 인해 모든 이상치를 제거하지 못하기 때문에 여전히 불균일한 클러터 환경에 민감하다. 본 논문에서 제시한 간섭 공분산 행렬의 예측 방법은 평균값이 아닌 중위수를 사용하여 제거되지 않은 이상치로 인한 불균일한 클러터의 영향을 대폭 감소시켰다. 시뮬레이션을 통해 고유값의 특성을 비교해 본 결과, 대각 로드를 적용하여 더 우수한 결과를 보여주었고, SINR 손실을 계산하여 비교해 본 결과, 특히 zero Doppler 부분에서 우수한 결과를 보였다. 또한 MSMI를 이용한 목표물 검출 능력을 비교해본 결과, 기존의 방법이 성공하지 못한 불균일한 클러터 신호의 세기가 더 강한 환경에서도 목표물 검출에 성공하여 우수함을 보여주었다.

참 고 문 헌

- [1] R. Klemm, "Introduction to space-time adaptive processing", *Journal of Electronics & Communication Engineering*, vol. 11, Issue 1, pp. 5-12, Feb. 1999.
- [2] P. Tsakalides, C. L. Nikias, "Robust space-time adaptive processing(STAP) in non-Gaussian clutter environments", *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 146, Issue 2, pp. 84-93, Apr. 1999.
- [3] M. Rangaswamy, J. H. Michels, and B. Himed, "Statistical analysis of the non-homogeneity detector for STAP applications", *Elsevier Digital Signal Processing*, vol. 14, Issue 3, pp. 253-267, May 2004.
- [4] P. Tsakalides, R. Raspanti, and C. L. Nikias, "Angle/Doppler estimation in heavy-tailed clutter backgrounds", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, Issue 2, Apr. 1999.
- [5] M. W. Ganz, R. L. Moses, and S. L. Wilson, "Convergence of the SMI and the diagonally loaded SMI algorithms with weak interference", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 38, Issue 3, pp. 394-399, Mar. 1990.
- [6] H. Belkacemi, S. Marcos, "Fast iterative subspace algorithms for airborne STAP radar", *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 2006, pp. 1-8, 2006.
- [7] G. W. Titi, D. F. Marshall, "The ARPA/NAVY mountaintop program: Adaptive signal processing for airborne early warning radar", *IEEE International Conference on Proceedings of the Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 2, pp. 1156-1168, 1996.
- [8] J. Ward, "Space-time adaptive processing for airborne radar", *IEE Colloquium*, pp. 2/1-2/6, Apr. 1998.
- [9] G. N. Schoenig, M. L. Picciolo, and L. Mili, "Improved detection of strong nonhomogeneities for STAP via projection statistics", *IEEE International Radar Conference*, pp. 720-725, May 2005.
- [10] M. C. Wicks, W. L. Melvin, and P. Chen, "An efficient architecture for nonhomogeneity detection in space-time adaptive processing airborne early warning radar", *Radar Conference*, pp. 295-299, Oct. 1997.
- [11] J. R. Guerci, *Space-time Adaptive Processing for Radar*, Artech House, Inc., 2003.

강 성 용



2008년 2월: 고려대학교 전파통신 공학과 (공학사)

2008년 9월~현재: 고려대학교 컴퓨터전파통신공학과 석박사통합과정 재학중

[주 관심분야] MIMO-레이다 신호 처리 기술, 초고속 광통신 네트워크, Optical-OFDM 기술

크, Optical-OFDM 기술

정 지 채



1980년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)

1982년 2월: 한국과학기술원 전기전자공학과 (공학석사)

1988년 2월: 미국 Carnegie-Mellon Univ. (공학박사)

1982년~1985년: 한국과학기술연구원 연구원

원 연구원

1988년~1993년: AT&T Bell Lab. 연구원

1993년~1995년: 포항공과대학교 교수

1995년~현재: 고려대학교 정보통신대학 컴퓨터통신공학부 교수

[주 관심분야] 초고속 광 네트워크, 광 변조 방식 기술, 레이더 신호처리