THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2017 Aug.; 28(8), 661～669.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2017.28.8.661
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

항공용 레이다를 이용한 잠망경 탐지 MMTI 신호처리 기법 연구 및 성능 분석

Study on MMTI Signal Processing Algorithm and Analysis of the Performance for Periscope Detection in Airborne Radar

정재훈 · 이재민 · 윤재혁 · 신희섭

Jae-Hoon Jung · Jae-Min Lee · Jae-Hyuk Youn · Hee-Sub Shin

요 약

본 논문에서는 잠망경을 탐지할 수 있는 항공용 레이다를 이용한 MMTI(Maritime Moving Target Indicator)에 대해 기술한다. 먼저 해상 클러터와 해상 표적의 특성을 알아보고, GMTI(Ground Moving Target Indicator)와 MMTI의 차이를 분석하여, 최적의 MMTI 운용환경 및 운용방법을 제안한다. 그리고 저속의 작은 해상 표적을 탐지하기 위하여 STAP(Space-Time Adaptive Processing)을 활용한 신호처리 알고리즘을 제시한다. 시뮬레이션을 통해 다양한 RCS에 대한 2채널 시스템과 3채널 시스템의 최소탐지속도 탐지확률을 분석하고, 거리 정확도, 속도 정확도, 방위각 정확도와 같은 주요 성능 변수를 분석한다.

Abstract

This paper describes an MMTI(Maritime Moving Target Indicator) for periscope detection in airborne radar. Firstly, we analyze the characteristics of sea clutter, sea targets. Secondly, we study the differences between GMTI(Ground Moving Target Indicator) and MMTI. This paper proposes an optimal MMTI operating environment and method. We also suggest a signal processing algorithm using STAP(Space-Time Adaptive Processing) for detecting small RCS target moving low speed. The detection probability for moving target with MDV(Minimum Detectable Velocity) is simulated under various RCS and multi-channel system. Finally, we analyze the major performance for range, velocity and azimuth accuracy.

Key words: Airborne Radar, MMTI, Periscope Detection, STAP, MDV

Ⅰ. 서 론

레이다는 전천후 주야간 감시 정찰이 가능하기 때문에 오늘날 해상과 지상에서 다양하게 이용되고 있다. GMTI (Ground Moving Target Indicator)와 MMTI(Maritime Moving Target Indicator)는 지상과 해상의 이동표적을 탐지하고, 표적의 속도, 위치를 제공한다[1],[2].

해상 감시는 전통적인 신호처리 기법(대공 탐지 모드와 유사)으로 운용하는 원거리 해상 탐지 모드와 STAP (Space-Time Adaptive Processing)을 이용한 저속의 작은 표적 탐지 모드로 나눌 수 있다[3].

원거리 해상 탐지는 비교적 큰 선박을 속도와 이동 방

LIG 넥스원 우주영상연구소(Space Image Lab., LIG Nex1)
· Manuscript received June 13, 2017 ; Revised July 5, 2017 ; Accepted July 25, 2017. (ID No. 20170613-057)
· Corresponding Author: Jae-Hoon Jung (e-mail: jhjung84@lignex1.com)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

향에 관계없이 탐지하는 운용 모드로, 비-코히어런트(non-coherent) 방식 운용하고, 펄스마다 주파수 가변을 수행한다. 표적의 방위각은 안테나 스캔을 통해 대략적으로 추정한다. 도플러를 이용하지 않기 때문에 낮은 PRF 사용이 가능하다. 따라서 거리모호성 없이 원거리 탐지가 가능하다.

작은 저속 이동표적 탐지모드는 긴시간 코히어런트(coherent) 신호를 획득한다. 특히 잠망경의 경우, RCS가 0.25~1 m^2으로 작기 때문에, SNR을 확보하는 것이 중요하다[4]. 이 운용방식은 데이터를 누적하기 때문에 SNR을 향상시킬 수 있으며, 도플러 처리가 가능하기 때문에 표적의 시선속도를 추출할 수 있다. 또한 다중채널 STAP 신호처리를 통해 클러터 메인로브 내의 저속 이동 표적을 탐지 할 수 있다. 그리고 STAP을 응용하여 적응 CFAR (Adaptive Constant False Alarm Rate) 알고리즘을 적용할 수 있고, 다중채널 특성을 이용해 표적의 방위각 계산이 가능하다.

본 논문에서는 잠망경까지 탐지 가능한 저속 이동표적 탐지 모드에 대해 기술한다. GMTI와 MMTI의 클러터 특성, 표적 특성, 운용환경을 비교분석하여 MMTI에 특화된 체계설계, 신호처리 알고리즘을 제시하며, 표적 RCS, 표적 속도, 시스템 채널 수 등의 주어진 조건에서 최적의 성능을 도출할 수 있는 알고리즘을 제시한다. 2장에서는 MMTI의 운용환경과 해상 클러터에 대해 알아보고, 3장에서는 MMTI와 GMTI의 차이점에 대해 논의한다. 4장에서는 MMTI 신호처리 기법에 대해 알아본다. 5장에서는 원시데이터 생성에 대해 기술하고, 6장에서는 시뮬레이션을 통한 주요 성능을 확인한다.

Ⅱ. MMTI 운용환경과 해상 클러터 특성

잠망경은 작은 RCS를 가지고 아주 짧은 시간 약 5초 정도 노출된다. 게다가 잠망경 또는 스노클은 해상 표면의 파도 속도와 유사하게 아주 저속으로 이동한다. MMTI는 비-가우시안 해상 클러터 환경에서 저속으로 이동하는 작은 RCS를 탐지할 수 있어야 한다.

해상 클러터는 그림 1과 같은 정규화된 해상 클러터 RCS로 표현된다[5]. 그림 1은 I-밴드에서 평균 클러터 세기를 나타내며, 단위는 dBm^2/m^2이다. 해상 클러터는 그림

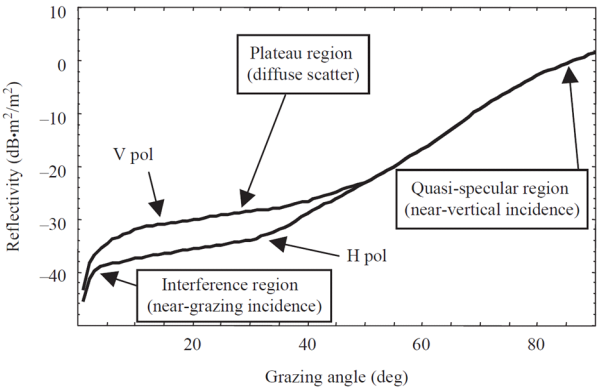


그림 1. 해상 클러터 RCS[5]
Fig. 1. Sea clutter RCS[5].

과 같이 지표각과 편파에 따라 달라지며, 지표각이 낮을수록 RCS가 작아진다. 또한 H-편파가 V-편파에 비해 상대적으로 RCS가 작다. 따라서 효과적으로 MMTI를 운용하기 위해서는 항공기 운용 고도를 낮추고, H-편파를 적용하여 해상 클러터의 영향을 최소화한다.

단일 레이다 해상도 셀에서 수신되는 클러터의 순시 전력은 클러터 반사 면적의 평균 전력에 대하여 변한다. 클러터의 반사도가 변이하는 원인은 크게 두 가지이다. 첫 번째는 해양 표면의 형태, 지표각, 잔물결 등에 의한 것, 두 번째는 레이다 반사 면적 내의 많은 산란 요소가 이동을 하여 발생시키는 간섭 에너지에 의한 것이다. 위 두 가지 변이에 의한 해상 클러터의 진폭 특성을 모델링하면 K-분포와 가깝다[5].

Ⅲ. MMTI와 GMTI

GMTI와 MMTI 모드는 CPI마다 PRF와 주파수 가변을 적용하여 탐지 불가 구간(blind zone)을 해결한다. 해상 클러터는 여러 개의 산란 인자들을 포함하고 있는데, 중심 주파수가 변하면 산란 인자들의 벡터 합이 변한다. 즉, MMTI에서는 부가적으로 중심 주파수 가변을 통해 클러터의 비상관화 효과를 얻을 수 있다.

해상 표적은 지상 표적에 비해 상대적으로 속도의 동적 범위가 좁다. GMTI에서의 이동 표적은 일반적으로 자동차이기 때문에 일반 도로에서 최대 160 km/h까지 속도를 가질 수 있다. 하지만 해상 표적의 경우, 빠른 선박이

최대 80 km/h 정도의 속도를 가진다. 따라서 GMTI에서는 속도모호성을 해결하기 위해 높은 PRF를 사용하지만, MMTI는 상대적으로 낮은 PRF을 사용할 수 있어서 GMTI 보다 거리모호성 없는 원거리 탐지가 가능하다.

하지만 자동차의 경우, 물리적인 크기와 RCS가 거의 비슷하지만, MMTI의 경우 잠망경 RCS 0.25~1 m^2, 큰 전투함의 경우 RCS가 6,000 m^2으로 표적의 물리적인 크기와 RCS 범위가 아주 넓다. 어떤 표적을 주 표적으로 선정하느냐에 따라 최적의 거리 해상도/거리 빈 크기가 달라지고, 거리 빈 크기에 따라 CFAR 변수가 달라진다.

Ⅳ. MMTI 신호처리 알고리즘

MMTI 신호처리 알고리즘을 그림 2와 같이 제시한다. 거리 해상도를 위해서 거리압축을 수행하고, 항공기 이동을 보상하기 위해 RCMC(Range Cell Migration Compensation)를 수행한다[6]. MMTI에서는 CPI가 짧기 때문에 본 논문에서는 거리-시간 도메인에서 RCM 보상을 제안한다. RCMC 후 항공기 속도와 스퀸트 각에 의해 발생하는 도플러 변이를 보상한다. 특히, 근거리에서 스퀸트 각이 큰 경우, 도플러 변이는 거리의 함수로 변하게 되는데, 각 거리빈마다 도플러 중심이 달라지면 STAP에서 거리마다 널 지점이 달라져서, 클러터 제거 성능을 저하시킨다[7]. 따라서 STAP 처리 전에 스퀸트 각 보상을 통하여 거리와 무관하게 도플러 중심을 0 Hz로 보상한 후, STAP, CFAR 그리고 표적 각도 계산을 수행한다.

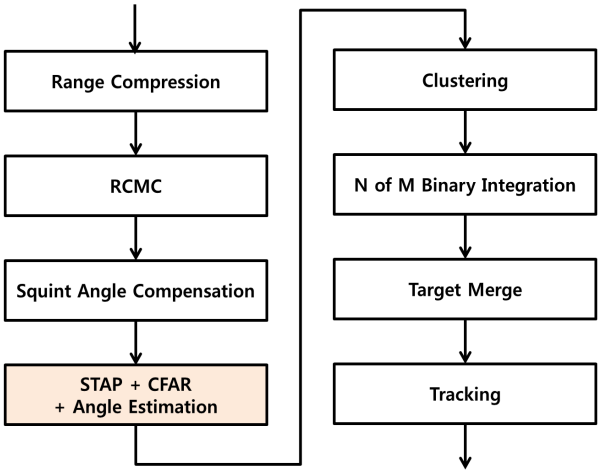


그림 2. MMTI 신호처리 순서도
Fig. 2. MMTI signal processing flowchart.

본 논문에서는 post-Doppler STAP 중에서 도플러 빈 3개의 정보를 이용하는 adjacent-bin k-3 post-Doppler STAP을 적용한다[8]. CFAR 후 HIT들은 클러스터링 과정을 통해 한 개의 대푯값을 가지게 되고, N of M 이진 누적기법을 통해 탐지 확률을 높이고, 오경보를 저감한다. 그리고 여러 번 중복되어 탐지되는 표적을 병합하여 한 스캔마다 표적 정보를 추출하고, 마지막으로 칼만 필터를 이용하여 추적을 수행한다.

STAP, CFAR, 각도 계산에 대한 자세한 방법은 그림 3과 같다. STAP을 위한 첫 번째 과정은 데이터를 STAP에 맞게 정렬하는 것이다. 그리고 도플러 도메인으로 변경을 위한 도플러 필터를 생성하고, 공분산 행렬을 계산한다. 공분산 행렬 계산은 SMI(Sample Matrix Inversion) 기법을 적용하며, 일반적으로 많이 사용하는 슬라이딩 방식을 채택하였다[9]. 이상적인 공분산 행렬을 위해서는 표적이 없는 균질(homogeneous)한 클러터 환경을 가정하는데, 해상 클러터는 비-균질(non-homeogenous)한 특성을 가진다. 또

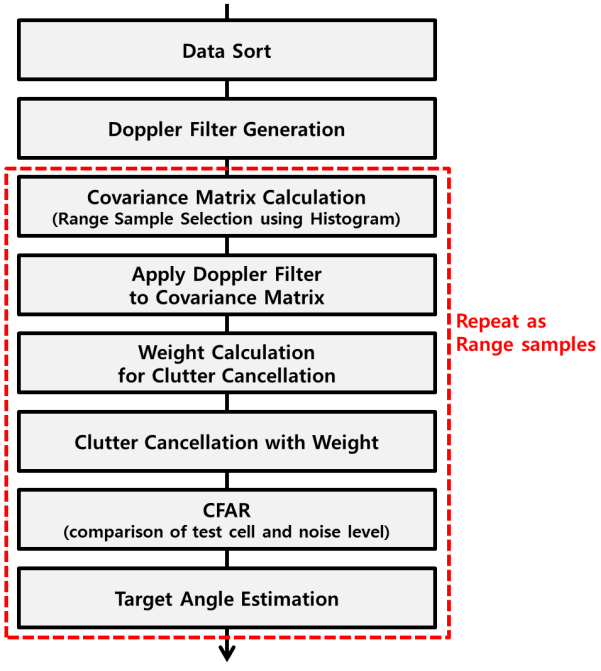


그림 3. STAP, CFAR, 각도 계산 상세 순서도
Fig. 3. Detailed flowchart for STAP, CFAR, angle estimation.

한 표적의 물리적인 크기와 RCS가 다양하기 때문에, 표적이 큰 경우 가드셀이 상대적으로 많이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 거리빈마다 전력에 대한 히스토그램을 분석, 98 %를 넘어가는 거리 빈에 대해서는 표적이 있거나 또는 스파이크 클러터가 존재한다고 판단하여 해당 거리 정보를 제외하고 공분산 행렬을 계산하는 방식을 제안한다. 이후 공분산 행렬을 도플러 도메인으로 바꾸고, 클러터 제거 가중치를 계산한다. 가중치와 해당 거리 빈의 수신신호를 곱하여 CFAR의 테스트 셀(test cell)을 준비하고, 공분산 행렬로부터 잡음레벨을 계산한다. 그리고 테스트 셀과 잡음레벨을 비교하여 HIT 탐지 여부를 결정한다. 탐지가 된 HIT에 대해서는 표적 각도를 계산한다.

표적 각도 오차는 일반적으로 빔폭의 1/6, 1/8, 1/10의 규격을 가진다. 만약 방위 빔폭 4.0º, 방위각 정확도가 빔폭의 1/10일 경우, 방위각 오차는 0.4º이다. 경사거리 10 km에서 각도 오차를 거리로 환산하면 약 70 m, 만약 경사거리 100 km이면 방위각 오차는 거리로 698 m가 된다. 따라서 높은 방위각 정확도가 필요하다.

본 논문에서는 기존 모노펄스를 활용하는 방법, 그리고 STAP MLE(최대가능도 예측법, Maximum Likelihood Estimation) 최적의 값을 찾는 방법으로 각도 계산 알고리즘을 구현하였다.

모노펄스를 이용한 각도 계산 방법은 두 개의 독립적인 채널 데이터에서 합(Σ)/차(Δ) 신호를 만들고, 합/차 신호의 위상차이로부터 표적 각도를 추정하는 방법이다[10]. 안테나 채널이 3개인 경우, 인접해 있는 채널 데이터 간에 합/차 신호를 만들어 모노펄스 각도 1과 2를 계산한다. 그리고 전력이 큰 데이터가 더 높은 SNR을 가진다는 가정 하에 모노펄스 각도 1과 2 중에서 높은 전력을 가지는 모노펄스 각도를 최종 표적 각도로 선정한다.

수식 1은 STAP 최대 가능도에 대한 비용함수이다. 표적 각도 ϕ와 표적 속도 f_d에 따라 최댓값이 결정된다.

$$\{\hat{\phi},\hat{f_d}\}=\arg\max_{\phi,f_d}\frac{\left|s(\phi,f_d)^H R^{-1}x\right|^2}{s(\phi,f_d)R^{-1}s(\phi,f_d)} \quad (1)$$

여기서 s는 시공간 조향 벡터, R은 공분산 행렬, x는 수신 신호이다. MLE는 표적 각도에 따라 포물선의 형태로 값을 가진다. MLE가 최댓값을 가지는 표적 각도를 찾기 위한 방법으로 Newton법을 MLE에 적용한 방법[11], Nickel의 적응 모노펄스를 기본으로 한 방법[12]이 있다.

Ⅴ. MMTI 원시데이터 생성

MMTI 원시데이터는 그림 4와 같이 생성한다. 원시데이터 생성 시뮬레이터는 사용자가 입력해야 할 파라미터(점선)와 시뮬레이터가 계산하는 파라미터(실선)로 나눌 수 있다.

본 논문에서 설정한 주요 파라미터는 표 1과 같다. 항공기 고도는 6,000 m, 항공기 속도는 150 m/s이며, 중심주파수는 X-대역을 사용한다. 최소탐지속도(Minimum Detectable Velocity : MDV)는 해외사례 조사를 통하여 10 km/h로 선정, 도플러 모호성 없는 PRF를 설계하였다. 편파는 해상 클러터 반사도가 작은 H-편파로 설계하였다. 해상의 상태는 Sea state 3을 기준으로 하며, 클러터 반사 절대 값은 그림 1에 따라 -38 dBm^2/m^2으로 선정하였다.

항공기 레이다의 경우, 하드웨어 무게/크기 등의 제약이 크며, 채널이 많아질수록 하드웨어가 복잡해지고, 채널간 보정이 어려워진다. 또한 채널이 많아질수록 연산량이 많아지고, 실시간 신호처리를 위해서는 신호처리 보드의 개수가 증가하게 된다. 이는 비용, 무게, 크기의 증가를 의미한다. 따라서 본 논문에서는 채널수를 최소화하여

표 1. 주요 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameter.

Parameter	Value
Platform height	6,000 m
Platform velocity	150 m/s
Number of channels	2 or 3
Center frequency	X-band
Polarization	H-pol.
Slant range	9.9~11.6 km
Bandwidth	20 MHz
Pulse number	64
PRF	1,600 Hz
Sea state	Sea state 3
Clutter RCS	−32 dBm^2/m^2
MDV goal	10 km/h

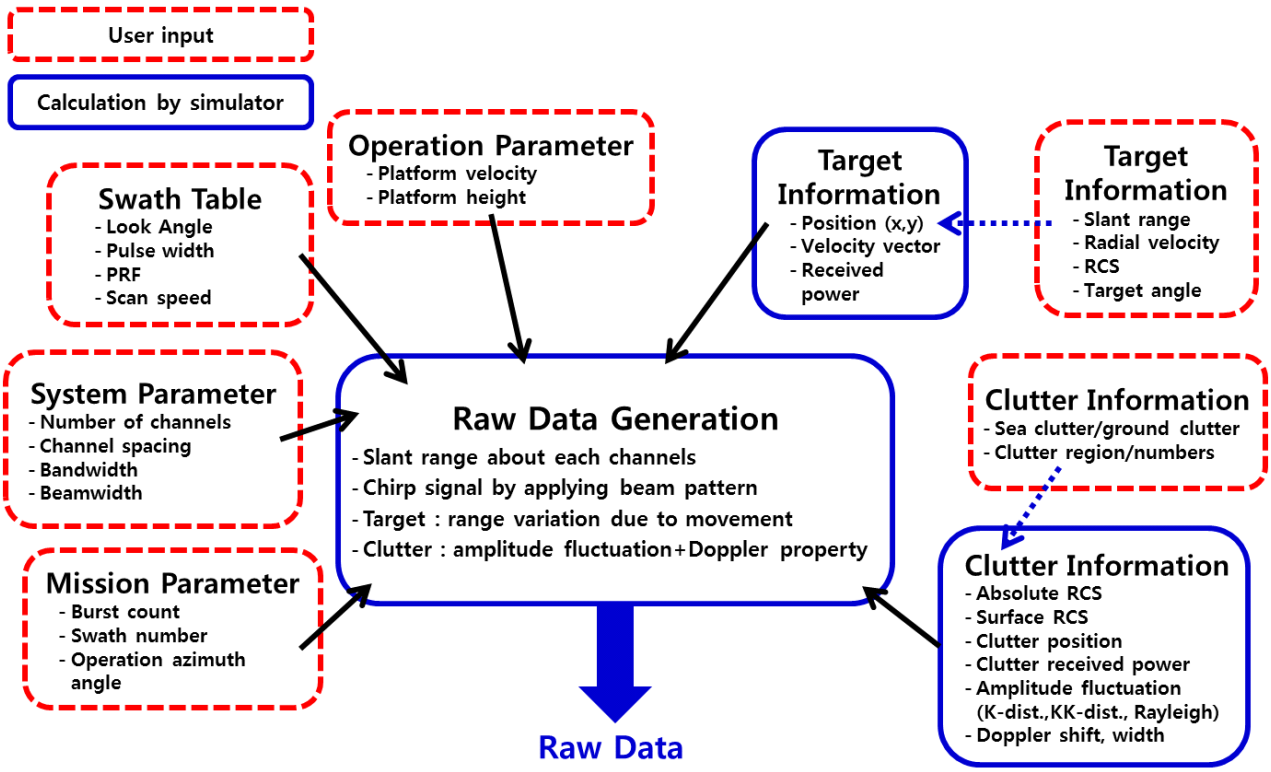
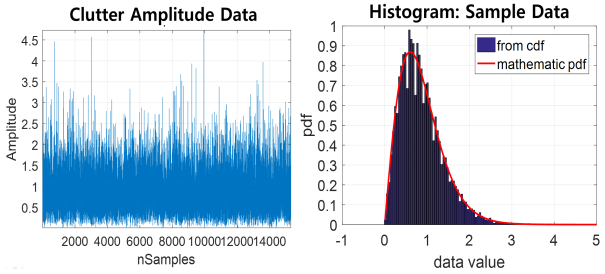


그림 4. 원시데이터 생성 시뮬레이터
Fig. 4. Raw data generation simulator.

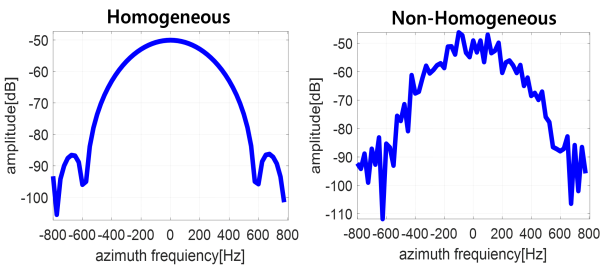
채널수 2개 또는 3개에 대해서 성능분석을 수행하여, 요구규격을 위한 최적의 시스템 및 알고리즘을 도출한다.

그림 5 왼쪽은 K-분포를 가지는 해상 클러터 진폭 데이터이고, 오른쪽은 생성된 데이터의 히스토그램과 K-분포 PDF(실선)를 비교한 것이다. 그림 6 왼쪽은 절대 RCS만 반영된 균질한 클러터에 대한 도플러 스펙트럼이고, 오른쪽 그림은 그림 5의 해상 클러터 진폭 데이터를 반영한 특정 거리 빈에서의 클러터 도플러 스펙트럼이다. 클러터 도플러 스펙트럼은 이상적인 빔패턴 형상을 가지는 것이 아니라 많은 산란 요소들에 의해 랜덤특성을 가진다.



(a) 클러터 진폭 데이터 (b) 히스토그램: 샘플 데이터
(a) Clutter apmlitude data (b) Histogram: Sample data

그림 5. 해상 클러터 진폭 데이터와 히스토그램
Fig. 5. Sea clutter amplitude data and histogram.



(a) 균질한 클러터 (b) 비-균질한 클러터
(a) Homogeneous (b) Non-homogeneous

그림 6. 원시데이터 생성 시뮬레이터
Fig. 6. Raw data generation simulator.

Ⅵ. MMTI 성능 지표와 시뮬레이션 결과

6-1 탐지확률, 최소탐지속도, 클러터 제거 성능

표 2에서 시나리오 1은 클러터 주엽에 해당하는 최소 탐지속도에 대한 시나리오, 시나리오 2는 클러터 부엽에 해당하는 빠른 표적에 대한 시나리오이다. RCS 3종류에 대하여 반복시험을 통하여 CFAR 단계에서의 탐지 확률을 확인한다. 이때 오경보율은 2.9915e-4이다.

표 3은 클러터 제거 전의 SCNR(Signal to Clutter Noise Ratio)이다. MDV 표적은 주엽 클러터로 인해 SCNR이 나쁘고, 빠른 표적은 클러터의 영향이 거의 없다. CFAR 탐지확률을 위해서는 SCNR이 12 dB 이상 필요하다. 하지만 MDV 표적 RCS 1 m^2일 때 SCNR은 2.4 dB, RCS 0.25 m^2일 때 SCNR은 −3.62 dB이다. 따라서 RCS 1 m^2보다 작은 표적을 탐지하기 위해서는 클러터 제거가 필요하다.

그림 7은 표적 RCS 10 m^2에 대한 클러터 제거 전/후의 거리-도플러 맵을 도시한 것이다. 왼쪽 그림이 클러터 제거 전, 오른쪽 그림이 클러터 제거 후의 그림이다. 0 Hz 부근의 해상 클러터가 클러터 제거 후 잡음레벨로 떨어진 것을 확인할 수 있다. 해상 클러터의 특성상 특정 거리 빈의 스펙트럼은 랜덤 특성을 가진다. 따라서 그림 8과 같이 평균 도플러 스펙트럼으로 클러터 제거 성능을 확인한다. MDV에 해당하는 도플러와 부엽에 해당하는 도플러에서의 제거 성능은 표 4와 같다.

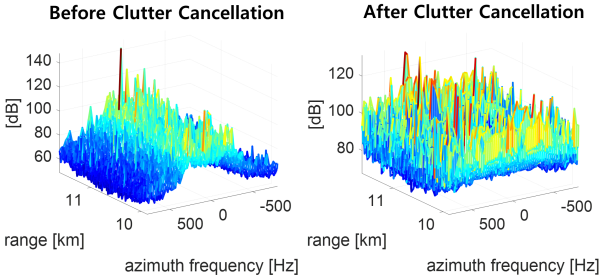
표 5는 300회 반복 시험을 통한 클러터 제거 전 데이터

표 2. 탐지확률 - 표적 시나리오
Table 2. Detection probability - target scenario.

	Scenario 1		Scenario 2	
	Target 1	Target 2	Target 1	Target 2
Velocity	10 km/h	−10 km/h	30 km/h	50 km/h
Slant range	10,250 m	11,150 m	10,250 m	11,150 m
RCS	10 m^2, 1 m^2, 0.25 m^2			

표 3. 클러터 제거 전 SCNR
Table 3. SCNR before clutter cancellation.

		RCS 10 m^2	RCS 1 m^2	RCS 0.25 m^2
Target power		−39.75dB	−49.85 dB	−55.87 dB
Clutter + noise	MDV	−52.25 dB		
	Fast target	−70.17 dB		
SCNR	MDV	12.5 dB	2.4 dB	−3.62 dB
	Fast target	30.42 dB	20.32 dB	14.3 dB



(a) 클러터 제거 전 (b) 클러터 제거 후
(a) Before clutter cancellation (b) After clutter cancellation

그림 7. 클러터 제거 전/후 거리-도플러 맵
Fig. 7. Range-Doppler map before/after clutter cancellation.

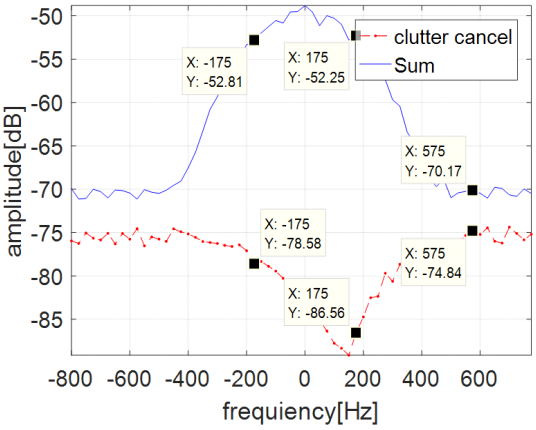


그림 8. 클러터 제거 성능
Fig. 8. Clutter cancellation performance.

표 4. 클러터 제거 성능
Table 4. Clutter cancellation performance.

	−175 Hz	+175 Hz	+575 Hz
Before clutter cancellation	−52.81 dB	−52.25 dB	−70.17 dB
After clutter cancellation	−78.88 dB	−86.56 dB	−74.84 dB
Performance	26.07 dB	34.31 dB	4.67 dB

의 탐지확률이다. RCS 10 m^2의 경우, SCNR이 충분하여 클러터 제거 전에도 높은 탐지 확률을 가진다. RCS 1 m^2의 경우 표 3에서 확인하였듯이 MDV 표적은 SCNR이 2.4 dB이 불과하다. 따라서 표적이 탐지되지 않았으며, 부엽에 있는 빠른 표적은 100 %의 탐지되었다. RCS 0.25 m^2의 경우, MDV 표적 탐지확률 0 %, 빠른 표적은 채널 2 시스템에서 80 % 이상, 채널 3 시스템에서는 100 % 탐지되었다.

표 6은 클러터 제거 후의 탐지 확률로 RCS 10 m^2 경우 90 % 이상 탐지 확률을 확인하였다. RCS 1 m^2 MDV 표적의 경우 클러터 제거 전에는 탐지 확률이 0 %이었으나 클러터 제거 후 100 % 탐지하였다. RCS 0.25 m^2 MDV 표적의 경우 2채널에서는 클러터 제거 후라도 6 %의 미비한 탐지 확률을 보였으며, 3채널에서는 62 %로 탐지확률이 크게 향상되었다. 3채널의 경우 2채널에 비해 SINR 3 dB 상승 효과가 있고, 자유도(degree of freedom) 증가로 인해 필터 성능이 향상되어 2채널의 비해 탐지 확률이 크게 높아졌다. 현재 탐지확률은 CFAR 단의 탐지 확률이며, 1 CPI 동안 빔 폭의 1/4만큼 스캔을 가정하여 2 of 4 이진누적 규칙을 적용할 경우 탐지 확률은 84 %까지 향상된다. 이후 추적을 수행할 경우 탐지 성능을 더 향상시킬 수 있다.

표 5. 클러터 제거 전 탐지 확률
Table 5. Detection probability before clutter cancellation.

	RCS 10 m^2		RCS 1 m^2		RCS 0.25 m^2	
	MDV	Fast target	MDV	Fast target	MDV	Fast target
Ch 2	100 %	99.5 %	0 %	100 %	0 %	84 %
Ch 3	100 %	100 %	0 %	100 %	0 %	100 %

표 6. 클러터 제거 후 탐지 확률
Table 6. Detection probability after clutter cancellation.

	RCS 10 m^2		RCS 1 m^2		RCS 0.25 m^2	
	MDV	Fast target	MDV	Fast target	MDV	Fast target
Ch 2	100 %	97.5 %	100 %	100 %	6 %	97 %
Ch 3	100 %	94.5 %	100 %	100 %	62 %	100 %

표 7. 거리 정확도/속도 정확도
Table 7. Range accuracy/velocity accuracy.

Slant range accuracy	
Range bin size	7.5 m
Range error	2.0205 m
Range error ratio about range bin	0.2694
Velocity accuracy	
Doppler bin size	25 Hz(=0.38 m/s)
Velocity error	0.1615 m/s
Velocity error ratio about Doppler bin	0.4250

6-2 경사거리 정확도, 속도 정확도

표적의 경사거리와 속도는 클러스터 멤버들의 가중평균을 통한 클러스터의 중심 값으로 계산된다. 경사거리와 속도 오차는 거리 빈, 도플러 빈의 크기에 의해 결정된다. 본 시뮬레이션에서 거리 빈 크기는 7.5 m 정도이며 도플러 빈은 25 Hz, 속도로 환산하면 0.38 m/s이다. 300회 반복시험 후 경사거리 오차, 속도 오차에 대해 표준편차 결과를 표 7에서 확인할 수 있다. 속도의 경우, 클러터 제거 과정에 도플러 빈마다 각기 다른 손실이 클러스터 중심의 오차로 반영되어, 상대적으로 오차가 크게 발생한다.

6-3 방위각 정확도

방위각 정확도는 300회의 반복 시험에 대한 표준편차로 정의하며, 시나리오는 표 8과 같다. 시나리오 1은 균질한 클러터에서의 MDV 표적의 각도 정확도, 시나리오 2는

표 8. 방위각 정확도 - 표적/클러터 시나리오
Table 8. Azimuth angle accuracy – target/clutter scenario.

		Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Clutter		Homogeneous	Non-homogeneous	Non-homogeneous
Ta-get	Velocity	10 km/h / −10 km/h	10 km/h / −10 km/h	30 km/h / 50 km/h
	Range	10,250 m / 11,150 m		
	RCS	10 m^2		
Angle estimation method		1. Simple monopulse method 2. STAP MLE: Newton method 3. STAP MLE: Nickel method		

표 9. 방위각 정확도 결과
Table 9. Azimuth angle accuracy result.

		Simple monopulse		STAP MLE: Newton		STAP MLE: Nickel	
		Ch 2	Ch 3	Ch 2	Ch 3	Ch 2	Ch 3
Scen-ario 1	Angle	0.1930°	0.1918°	0.2332°	0.0757°	0.2910°	0.0845°
	Ratio	1/20	1/20	1/16	1/50	1/13	1/45
Scen-ario 2	Angle	0.1995°	0.1935°	0.2316°	0.1064°	1.1486°	0.4528°
	Ratio	1/19	1/20	1/16	1/36	1/3	1/8
Scen-ario 3	Angle	0.0995°	0.0821°	0.4411°	0.1374°	0.4613°	0.1401°
	Ratio	1/38	1/46	1/9	1/28	1/8	1/27

비-균질한 해상 클러터에서 MDV 표적의 각도 정확도, 시나리오 3은 30 km/h, 50 km/h 상대적으로 빠른 표적의 각도 정확도이다. 각 시나리오에 대하여 3가지 각도 계산 방법으로 방위각 정확도를 분석하고 비교한다.

방위각 정확도 결과는 표 9와 같다. 시나리오 1의 경우, 2채널에서는 기본 모노펄스가 높은 정확도를 가지고, 3채널에서는 STAP MLE 기법의 방위각 정확도가 높았다. 이때 MLE 2가지 방법 방위각 정확도는 거의 비슷하다. 시나리오 2는 비-균질의 클러터이기 때문에 STAP 공분산 행렬에 영향을 미친다. 기본 모노펄스와 MLE Newton 방법은 클러터 균질 여부와 상관없이 시나리오 1과 거의 유사한 방위각 정확도를 가졌다. 하지만 MLE Nickel의 경우, 방위각 정확도가 크게 나빠졌다. 시나리오 3은 빠른 표적이기 때문에 클러터 영향이 미비하다. MLE 방법은 STAP 특성상 클러터 공분산 행렬을 이용하기 때문에 클러터가 약한 빠른 표적에 대한 방위각 정확도가 떨어진다.

결론적으로 비-균질한 실제 해상 탐지라고 가정할 시 저속 표적의 경우 2 채널에서는 모노펄스, 3 채널 이상일 경우 Newton 방법이 높은 방위각 정확도를 가지며, 빠른 표적의 경우 채널수와 상관없이 기본 모노펄스를 활용하는 것이 효과적이다.

Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 adjacent-bin k-3 post-Doppler STAP, 적응 CFAR 등을 적용하여 MMTI 원시데이터 생성 및 주요 성능 변수에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

표적 RCS 1 m^2 MDV 표적의 경우 클러터 제거 후 100 % 탐지하였으며, RCS 0.25 m^2의 경우 3채널에서 62 % 탐지확률을 확인하였다. 속도 정확도의 경우, 경사거리 정확도에 비해 상대적으로 큰 오차를 가졌다. MDV 표적의 방위각 정확도는 채널 2 시스템에서는 기존 모노펄스 방법이, 채널 3시스템에서는 Newton 방법이 높은 정확도를 가졌다.

현실적인 해상 탐지를 위해서는 클러터 스파이크의 모사 및 이를 제거하는 방법에 대한 연구가 필요하다. 또한, 각도 계산법 Newton의 경우 많은 반복 횟수를 필요하기 때문에 실시간 처리를 위해서는 반복 횟수를 줄일 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

References

[1] 배창식, 전현무, 양동혁, 양훈기, "SAR-GMTI에서 지상이동표적의 속도 추정 기법", 한국전자파학회논문지, 28(21), pp. 139-146, 2017년 2월.

[2] 김태형, 윤정숙, 정재훈, 유성현, "항공기 레이다의 GMTI 모드를 위한 Sigma-Delta STAP의 적용 설계와 성능 분석 시뮬레이션", 한국전자파학회논문지, 28(4), pp. 336-346, 2017년 4월.

[3] Martin Kirscht, Alexander Dallinger, Jan Mietzner, Bernhard Bickert, Jorg Hippler, and Rudolf Zahn, "Advanced radar modes for airborne surveillance radars", *Radar symposium(IRS) 2015 16th International*, Aug. 2015.

[4] D. Curtis Schleher, "Periscope detection radar", *IEEE Proc., International Radar Conference*, pp. 704-707, 1995.

[5] Keith Ward, Robert Tough, and Simon Watts, *Sea Clutter: Scattering, the K Distribution and Radar Performance,* 2nd Edition, Institution of Engineering and Technology, London, 2013.

[6] Y. K. Chan, V. C. Koo, "An introduction to synthetic aperture radar (SAR)", *Progress in Electromagnetic Research B*, vol. 2, pp. 27-64, 2008.

[7] O. Kreyenkamp, R. Klemm, "Doppler compensation in forward-looking STAP radar", *IEE Proc. Radar, Sonar and Navig.*, vol. 148, Issue 5, pp. 253-258, 2001.

[8] J. Ward, "Space-time adaptive processing for airborne

radar", *Massachusetts Institute of Technology Lincoln Laboratory*, *Technical Report* 1015, Dec. 1994.
[9] William L. Melvin, "A STAP overview", *IEEE A&S Systems Magazine*, vol. 19, no. 1, pp. 19-35, Jan. 2004.
[10] Sherman, *Monopulse Principles and Techniques,* Artech House, Washingon, 1985.
[11] R. C. Davis, L. E. Brennan, and L. S. Reed, "Angle estimation with adaptive arrays in external noise fields", *IEEE Transaction on Aerospace and Electronics System*, vol. AES-12, no. 2, pp. 179-186, Mar. 1976.
[12] U. Nickel, "Monopulse estimation with subarray-adaptive arrays and arbitrary sum and difference beams", *IEE Proc. Radar, Sonar Navig.*, vol. 143, no. 4, pp. 232-238, Aug. 1996.

정 재 훈

2006년 6월: 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학과 (공학사)
2008년 8월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
2008년 8월～현재: LIG 넥스원 우주영상연구소 연구원
[주 관심분야] 레이다 신호처리, GMTI 신호처리

이 재 민

2005년 2월: 고려대학교 전기전자전파공학부 (공학사)
2005년 3월～현재: LIG 넥스원 우주영상연구소 연구원
[주 관심분야] 레이다 신호처리, GMTI 신호처리

윤 재 혁

2010년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
2014년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)
2014년 1월～현재: LIG 넥스원 우주영상연구소 연구원
[주 관심분야] 레이다 신호처리, 추적 알고리즘

신 희 섭

2004년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2009년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2009년 1월～현재: LIG 넥스원 우주영상연구소 연구원
[주 관심분야] 레이다 신호처리, SAR 신호처리