

MPRF 레이다 시스템에서 속도 추정 오류를 감소하기 위한 선별적 MTI에 관한 연구

홍성원*¹, 조병래**¹, 윤기철*², 김관성**², 김찬홍***

A Study on Selective MTI to Reduce the Error of Velocity Estimation for MPRF Radar System

Sungwon Hong*¹, Byung-Lae Cho**¹, Kichul Yoon*², Kwan-Sung Kim**², and Chan-Hong Kim***

요 약

본 논문에서는 MPRF 레이다에서 정확한 속도 추정을 위한 선별적 MTI 기법에 대하여 제안하였다. MPRF 레이다에서는 한 버스트에서 고속 표적에 대한 신호가 저속으로 폴드 오버(Fold over)되어 나타나므로 강한 클러터 신호가 있는 환경에서는 폴드 오버된 신호가 탐지되지 않을 수 있다. 클러터를 극복하고 탐지되더라도 클러터 스펙트럼 때문에 표적 신호의 속도 정보가 왜곡될 수 있는 가능성이 존재한다. 이는 도플러 정보를 얻기 위한 FFT 특성으로 인하여 발생하는 문제이며 이를 해결하기 위하여 MTI를 고려할 수 있다. 그러나 모든 거리 셀에 대한 MTI는 연산량이 많아지는 단점이 존재한다. 본 논문에서는 FFT 이후 탐지된 거리 셀에 대하여 선별적으로 MTI하는 방법을 제안하였다. 또한 해상 환경에서 실험을 통하여 획득된 데이터를 사용하여 제안하는 기법을 검증하였다.

Abstract

This study proposes the selective moving target indicator (MTI) method which estimates the precise velocity for medium pulse repetition frequency (MPRF). In MPRF radar system, because the high velocity is folded into low velocity in one burst, the folded signal cannot be detected in the strong clutter environment. Even if the target signal overcomes the clutter and is detected, there is possibility that the velocity information can be distorted. This is a problem that occurs due to the fast Fourier transform (FFT) characteristic for obtaining Doppelp information, and MTI can be considered to solve this problem. However, the MTI for all range cells has a disadvantage in that the amount of computation increases. In this paper, the method of selectively applying MTI to detected range cells is proposed. Then, the proposed method is confirmed by the data from the real experiment.

Keywords

medium pulse repetition frequency, moving target indicator, velocity estimation, radar signal processing

* 국방과학연구소 선임연구원

- ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0001-9509-0691>

- ORCID²: <http://orcid.org/0000-0002-4216-1713>

** 국방과학연구소 책임연구원

- ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0002-9160-3362>

- ORCID²: <http://orcid.org/0000-0002-7385-4141>

*** 국방과학연구소 수석연구원 (교신저자)

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7877-1521>

· Received: Jan. 14, 2022, Revised: Feb. 21, 2022, Accepted: Feb. 24, 2022

· Corresponding Author: Chan-Hong Kim

Agency for Defense Development, Yuseong P.O.Box 35, DaeJeon, 34186, Korea,

Tel.: +82-42-821-3606, Email: chkim@add.re.kr

1. 서론

해상 환경에서 사용되는 레이더는 클러터 신호를 배제하기 위하여 주로 MPRF(Medium Pulse Repetition Frequency) 파형을 사용한다. MPRF 파형을 사용할 경우 속도 정보를 추출하기 위하여 FFT(Fast Fourier Transform)을 사용하여 도플러 필터를 생성한다[1]. 또한 클러터 신호는 제로 속도 주변에 존재하므로 FFT 결과에서 제로 속도에 해당하는 필터와 주변 필터들은 사용하지 않는다[2][3]. 한편, MPRF 특성상 고속 표적에 대한 신호가 저속으로 폴드 오버(Fold over)될 수 있는데[4] 이 때 사용하지 않는 도플러 필터에 의해 걸러질 수 있으며 이로 인하여 추정되는 속도가 왜곡될 수 있다. 만약 속도가 왜곡된다면 MPRF 모호성 처리 과정에서 최종 속도 추정이 잘못되어 표적 추적이 원활하지 못할 수 있다[5].

클러터 스펙트럼이 넓은 경우 FFT보다 클러터 제거 능력이 우수한 MTI(Moving Target Indicator)를 고려해 볼 수 있다[6]. 그러나 MTI기법은 FFT보다 클러터 제거 능력은 우수하나 신호의 이득은 낮아 신호 탐지가 불가능할 수 있어 잘 사용하지 않는다. 그리고 거리 셀이 많은 MPRF에서 거리 셀마다 MTI를 적용할 경우 연산량 측면에서도 불리하다.

본 논문에서는 FFT와 MTI의 단점을 상호보완하기 위하여 FFT로 탐지 후 탐지된 신호에 대하여 MTI를 적용하는 선별적 MTI 기법에 대하여 제안하였다. FFT로 탐지하기 때문에 탐지 손실은 MTI보다 낮으며 선별적으로 MTI를 적용함으로써 연산량도 확보할 수 있다.

2장에서는 선별적 MTI 방법을 소개하고, 3장에서는 실제 해상시험 데이터를 사용한 결과들을 보여

준다. 또한, 윈도우 MATLAB 환경에서 기존의 MTI 기법과 연산량도 비교하였다. 4장에서는 시험 결과로부터 결론을 도출한다.

II. MPRF 모호성 처리 및 MTI

2.1 MPRF 모호성 처리

MPRF 레이더 시스템은 하나의 PRF(Pulse Repetition Frequency)에서 측정할 수 있는 속도가 제한되어 있기 때문에 표적 측정 거리와 속도에 대한 모호성이 존재한다. PRF로 측정을 벗어나는 표적 속도를 갖는 표적은 그림 1과 같이 FFT 특성으로 인하여 폴드 오버되어 저속으로 탐지된다.

모호성을 해결하기 위하여 MPRF 시스템에서는 PRF가 서로 다른 펄스를 사용하여 표적의 속도를 추정한다. 이 때 여러 측정 속도를 각 PRF마다 반복하여 일치하는 속도를 찾는 과정이 모호성 처리 과정이다[7]. 만약 측정 속도가 왜곡된다면 모호성 처리 과정에서 오차가 누적되어 원래 표적 속도를 추정할 수 없게 된다. 따라서 MPRF 레이더 시스템에서는 하나의 버스트에서 속도를 정확하게 측정할 수 있어야 최종 속도 추정이 정확하게 이루어질 수 있다.

2.2 MTI

MTI는 그림 2와 같이 제로 속도 근처에 분포하는 클러터 신호를 억제하기 위한 수단으로 사용되어왔다. MTI는 필터는 HPF(High Pass Filter)의 일종으로 속도가 빠른 표적 신호를 통과시키며 제로 속도 성분을 강하게 억압하는 특성을 가진다.

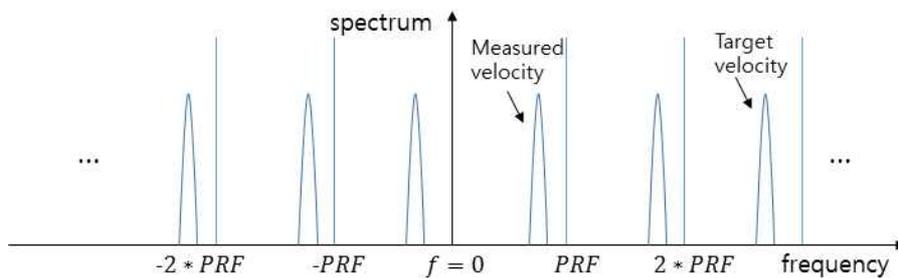
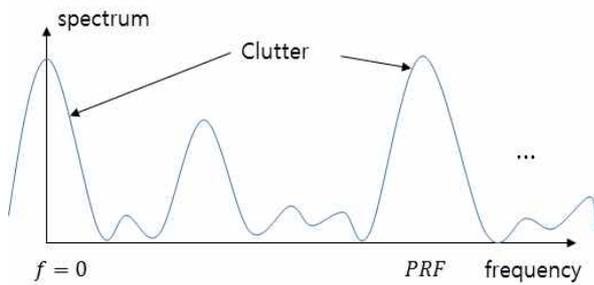
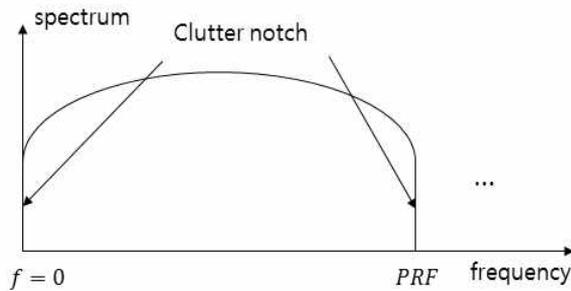


그림 1. MPRF 속도 모호성
Fig. 1. Ambiguity of MPRF velocity



(a) 클러터 신호의 스펙트럼
(a) Spectrum of clutter signal



(b) MTI 필터 응답
(b) Spectrum of MTI filter

그림 2 클러터 신호 및 MTI 필터 스펙트럼
Fig. 2. Spectrum of clutter signal and filter

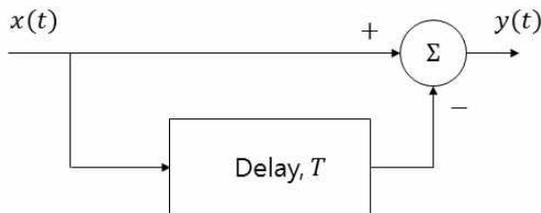


그림 3. 단일 지연선 상쇄기
Fig. 3. Single delay line canceler

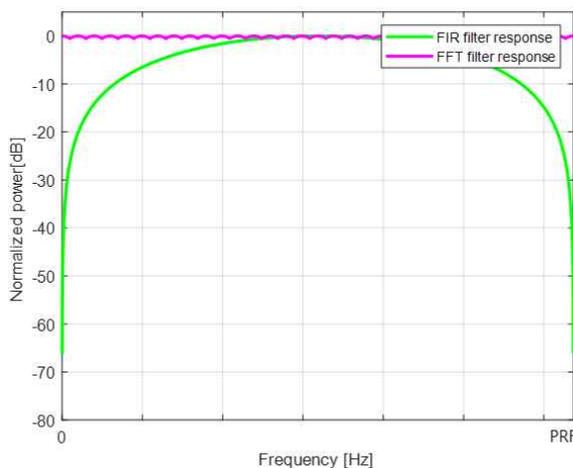


그림 4. FFT와 MTI 필터 응답
Fig. 4. Filter responses of FFT and MTI

간단하게 사용할 수 있는 MTI 필터로는 그림 3과 같은 단일 지연선 상쇄기(Single delay line canceler)가 있을 수 있으며 성능향상을 위하여 이중 지연선, N-펄스 상쇄기 등을 사용할 수 있다[8].

본 논문에서 사용한 MTI 필터는 실제 시스템에 적용하기 위하여 연산량이 적은 단일 지연선 상쇄기를 고려하였다.

MPRF 레이더에서는 N 개의 펄스를 송수신하여 처리하므로 N 개의 펄스에 대한 MTI는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s_{MTI}(n,r) = s_{n+1}(r) - s_n(r) \quad (1)$$

여기서 $n=1, \dots, N-1$ 이며, r 은 각 펄스 별 거리 셀을 나타낸다. 식 (1)의 결과값을 동일 거리 셀에 대하여 FFT를 취하면 속도 정보를 추출할 수 있다. MTI는 제로 속도 클러터를 확실하게 억제할 수 있어 클러터 스펙트럼에 해당하는 FFT 결과도 활용할 수 있다. 그러나 그림 4와 같이 FFT보다 필터 이득이 낮아 원하는 신호를 탐지할 가능성이 낮아진다.

또한, PRI(Pulse Repetition Interval)가 길거나 샘플링 주파수가 높다면 거리 셀이 많아져 연산량이 높아진다는 단점이 있다.

III. 선별적 MTI 기법

그림 5는 클러터와 표적이 동일 거리 셀에 존재할 때 기존의 펄스 도플러 처리방법인 FFT 스펙트럼을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 클러터를 제거하기 위하여 특정 필터를 사용하지 않을 경우 표적의 속도 성분을 정확하게 추정되지 않으며 왜곡이 발생하는 것을 알 수 있다. 이를 해결하기 위하여 2.1절의 MTI를 고려할 수 있으나 전체 거리 셀에 대하여 적용하는 것은 연산량 측면에서 불리하다. 따라서 본 절에서는 FFT를 사용하여 표적을 탐지한 후 탐지된 셀에 대해서만 MTI 처리하는 방법을 제안한다.

제안하는 알고리즘은 그림 6과 같다. 만약 M 개의 거리 셀과 N 개의 펄스 개수를 사용하는 레이더를 가정한다면 기존의 MTI 방식은 $M(N-1)$ 개의 뺄셈연산이 수행된다.

그러나 제안하는 선별적 MTI 방식은 한 버스트 내의 표적 개수 T 에만 영향을 받으므로 $T(N-1)$ 개의 뺄셈연산이 수행된다. 클러터 스펙트럼이 저속에 분포하는 것을 고려하면 특정 속도 V_s 이하에서 탐지된 표적에 대해서만 MTI를 사용하면 되므로 실제로 한 버스트 내에 표적 개수는 적다고 볼 수 있다.

따라서 많게는 수천 개에 이르는 모든 거리 셀에 대하여 MTI를 하는 것보다 제안하는 선별적 MTI 연산량이 적음을 알 수 있다.

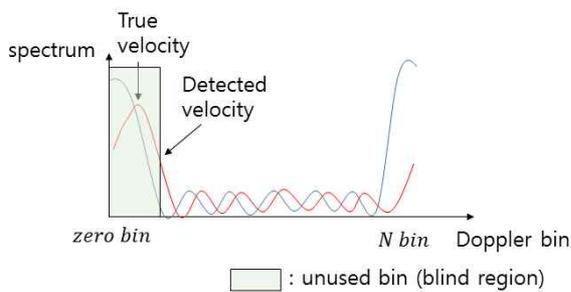


그림 5. 클러터 및 임의의 속도를 갖는 표적에 대한 FFT 도플러 필터 결과
 Fig. 5. FFT Doppler filter result of clutter and target with an arbitrary velocity

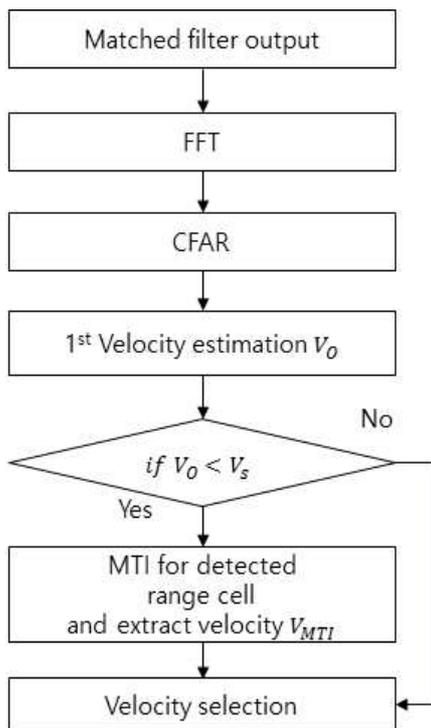


그림 6. 제안하는 선별적 MTI 알고리즘
 Fig. 6. Proposed selective MTI algorithm

IV. 실험 결과

제안하는 기법을 검증하기 위하여 실제 해상 클러터 환경에서 측정한 시험 데이터에 적용하였다. 동해상에서 S대역 레이더와 모의표적장치를 사용하여 시험 데이터를 수집하였으며 수집된 데이터는 거리, 속도 정보 등의 정보가 포함된 신호처리 결과 데이터와 모의표적 신호, 클러터 신호와 잡음 신호가 함께 존재하는 2차원 거리-도플러 데이터를 포함한다. 모의표적장치에서 생성한 표적의 속도는 280 m/s 이다.

그림 7은 모의표적장치에서 생성한 표적에 대하여 측정한 데이터를 거리-속도 영역에서 표현한 것이다. 4버스트를 사용하여 모호성 처리를 한 결과 최종 속도 측정값을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 모호성 처리가 제대로 되지 않아 허위 속도가 발생하는 것을 알 수 있다. 레이더의 PRI와 주파수를 고려했을 때 각각의 버스트에서 표적 속도는 38.9621m/s이다. 그러나 특정 버스트에서 속도 추정이 왜곡되어 나타나 허위 속도를 생성한 것을 알 수 있다. 그림 8은 왜곡된 속도를 추정한 버스트에 해당하는 거리-도플러 데이터이다.

그림 8의 빨간색 원으로 표시된 부분에서 클러터 스펙트럼과 표적의 스펙트럼이 섞여서 존재하는 것을 알 수 있으며 클러터 스펙트럼에 해당하는 도플러 필터를 제거하면 표적의 속도는 저속이 아닌 고속으로 왜곡되질 수 있다.

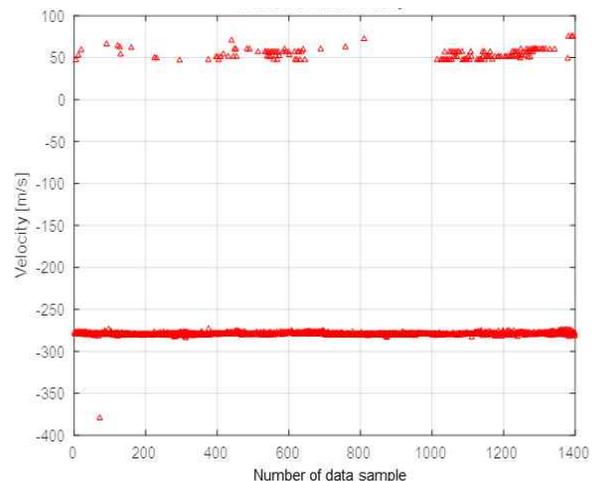


그림 7. 허위속도 측정 데이터
 Fig. 7. Measured velocity with ghost

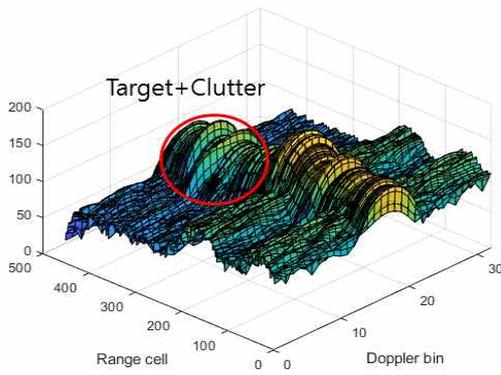
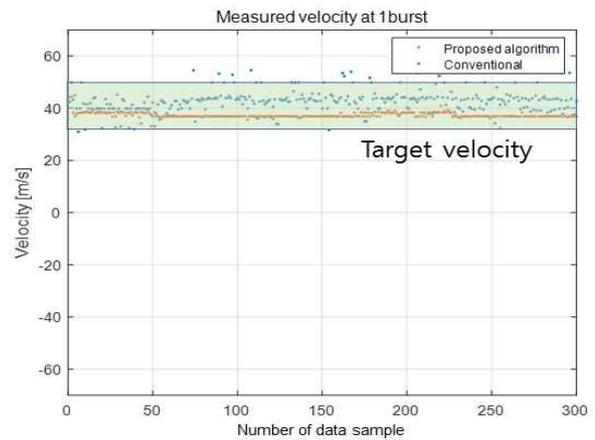


그림 8. 한 버스트 거리 도플러 맵
Fig. 8. Range-Doppler map of one burst



(a) 한 버스트 속도

(a) Measured velocity of the target in one burst

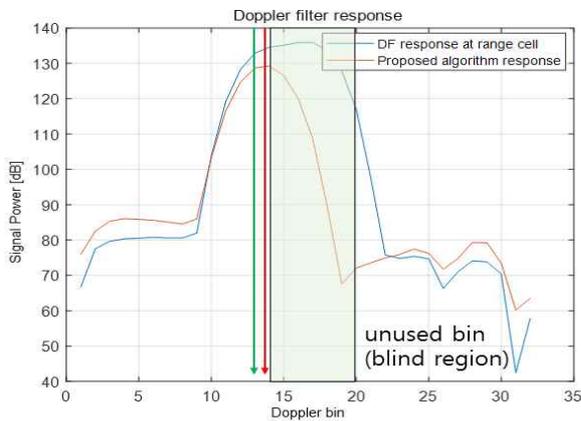
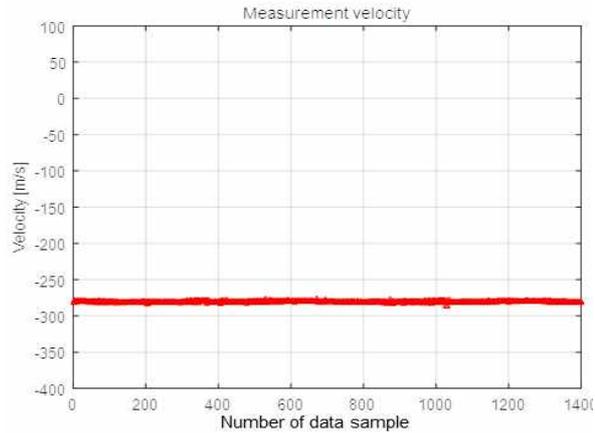


그림 9. 기존 방법과 제안하는 방법의 도플러 영역 비교
Fig. 9. Comparison of Doppler response between conventional method and the proposed algorithm

그림 9는 해당 거리 셀에 대하여 MTI 적용한 결과를 나타낸다. 기존의 도플러 필터를 사용하여 추정시 녹색 화살표에 해당하는 속도를 추정하게 된다. 그러나 제안하는 알고리즘을 사용할 경우 클러터 스펙트럼을 억제하여 표적의 스펙트럼이 나타나 빨간색 화살표에 해당하는 속도 추정을 할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 10은 선별적 MTI 기법을 적용하여 실제 시스템에서 모호성 처리한 결과를 나타낸다. 그림 10(a)는 한 버스트 측정 속도를 제안하는 알고리즘과 기존 시스템을 같이 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 제안하는 알고리즘이 원래의 측정 속도인 38.9621m/s를 측정하는 것을 알 수 있다. 그림 10(b)는 모호성 처리 이후 모의표적의 속도를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 허위 속도를 줄이고 정확한 표적 속도를 추정할 것을 알 수 있다.



(b) 모호성 처리 이후 속도

(b) Velocity after ambiguity solving

그림 10. 알고리즘이 적용된 속도 데이터

Fig. 10. Velocity data with proposed algorithm

한편, 전체 거리 셀에 대하여 MTI를 적용하는 것과 선별적 MTI 기법의 연산량을 비교하기 위하여 표 1과 같이 시뮬레이션 환경을 구성하여 실험하였다.

연산량 측정 방법은 MATLAB에서 제공하는 tic, toc함수를 사용하여 측정하였으며 2,000번을 반복 수행한 후 수행시간을 평균 내었다.

표 1. 시뮬레이션 환경
Table 1. Simulation environment

| | |
|---------|------------------------|
| OS | Windows 10 x64 |
| CPU | Intel i7-6700 @ 3.4GHz |
| RAM | 8GB |
| Program | MATLAB R2021a |

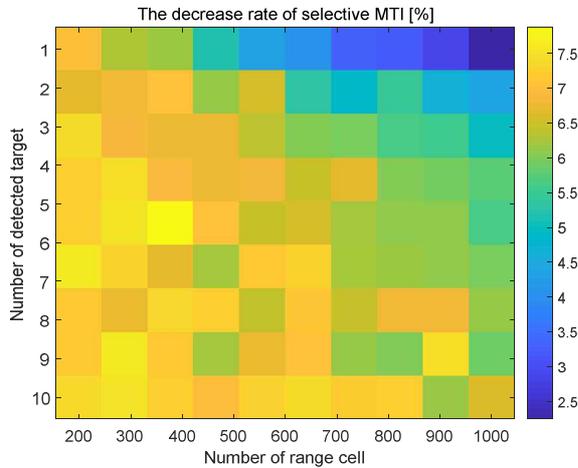


그림 11. 알고리즘 수행시간 비교
Fig. 11. Comparison of real operation time between algorithms

그림 11은 두 가지 알고리즘에 대하여 거리 셀 및 표적 개수에 따른 수행 시간 비교 결과이다. 결과값은 식 (2)와 같이 전체 거리 셀에 대한 MTI와 선별적 MTI 알고리즘의 수행 시간을 비로 나타내었으며 숫자가 클수록 제안하는 알고리즘의 수행시간이 더 작음을 나타낸다.

$$ratio = \frac{\text{selective MTI}}{\text{fully MTI for all range}} \quad (2)$$

가로축은 표적 개수를 나타내며 세로축은 거리 셀 개수를 나타낸다. 그림 11에서 알 수 있듯이 전체적으로 선별적 MTI 알고리즘이 전체 거리 셀에 대한 MTI를 적용하는 것보다 수행시간이 줄어들었다. 또한 표적 개수보다 전체 거리 셀이 많아질수록 선별적 MTI 알고리즘의 수행시간이 줄어들음을 알 수 있다. 따라서 PRI가 길거나 샘플링 주파수가 높아 거리 셀이 많은 레이다 시스템에서는 선별적 MTI 알고리즘을 사용하는 것이 연산량 측면에서 이득이다.

V. 결 론

본 논문에서는 MPRF 레이다 시스템에서 속도 추정 오류를 감소하기 위한 선별적 MTI 기법을 제안하였다. MPRF 레이다 시스템에서는 사용하지 않

는 도플러 필터로 인하여 표적의 속도가 왜곡되어 모호성 처리 시 정확한 표적 속도를 추정할 수 없는 문제점이 발생한다. 제안하는 기법은 탐지된 표적 신호에 대하여 선별적으로 MTI를 적용하여 클러터 스펙트럼에 가려진 표적 속도를 추출하여 모호성 처리 시 속도 추정 오류를 감소시킬 수 있는 기법이다. 모든 거리 셀에 대하여 MTI를 적용할 수도 있지만 이는 거리 셀이 많아짐에 따라 연산량이 증가한다는 단점이 있다. 실제 해상 시험 데이터를 사용한 결과 제안하는 선별적 MTI 기법으로 모호성 처리 시 속도추정 오류를 감소시킬 수 있었으며 시뮬레이션을 통하여 전체 거리 셀에 대한 MTI 기법보다 제안하는 기법이 연산량이 줄어들음을 확인하였다.

References

- [1] C. Alabaster, "Pulse Doppler Radar - Principles, Technology, Applications", NJ: Scitech Publishing, 2012.
- [2] M. Diani, G. Corsini, F. Berizzi, and D. Calugi, "Ground clutter model for airborne MPRF radars in look-down search mode", IEE Proceedings - Radar, Sonar, Navigation, Vol. 143, No. 2, pp. 113-120, Apr. 1996. <https://doi.org/10.1049/ip-rsn:19960305>.
- [3] S. Watts, "Modeling and Simulation of Coherent Sea Clutter", in IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 48, No. 4, pp. 3303-3317, Oct. 2012. <https://doi.org/10.1109/TAES.2012.6324707>.
- [4] B. R. Mahafza, "MATLAB Simulations for Radar Systems Design", A CRC Press Company, 2004.
- [5] R. S. Narasimhan, A. Vengadarajan, and K. R. Ramakrishnan, "An efficient algorithm for range, range rate ambiguity resolution in MPRF pulse Doppler radars", 2018 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, pp. 1-9, Mar. 2018. <https://doi.org/10.1109/AERO.2018.8396402>.
- [6] Y. V. Goncharenko, G. Farquharson, V. Gorobets, V. Gutnik and Y. Tsarin, "Adaptive moving target

indication in a windblown clutter environment", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 50, No. 4, pp. 2989-2997, Oct. 2014. <https://doi.org/10.1109/TAES.2014.130540>.

- [7] S. A. Hovanesian, "Medium PRF Performance Analysis", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-18, No. 3, pp. 286-296, May. 1982. <https://doi.org/10.1109/TAES.1982.313320>.
- [8] J. M. Yang, S. J. Shin, M. J. Lee, and W. W. Kim, "Analysis of Detection Performance of Radar Signal Processor with Relation to Target Doppler Velocity and Clutter Spectrum Characteristics", The journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 22, No. 1, pp. 47-58, Jan. 2011. <http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2011.22.1.047>.

저자소개

홍 성 원 (Sungwon Hong)



2010년 2월 : 경북대학교
전자전기컴퓨터학부(공학사)
2012년 2월 : 경북대학교
모바일통신공학과(공학석사)
2017년 2월 : 경북대학교
전자공학부(공학박사)
2017년 2월 ~ 현재 : 국방과학

연구소 선임연구원
관심분야 : 레이더 시스템, 레이더 신호/데이터 처리 등

조 병 래 (Byung-Lae Cho)



1999년 2월 : 경북대학교
전자전기공학부(공학사)
2001년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학석사)
2005년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과 (공학박사)
2005년 3월 ~ 2006년 1월 :

포항공과대학교 전자전기공학과(연구원)
2006년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 레이더 신호처리, 영상레이더 등

윤 기 철 (Kichul Yoon)



2011년 2월 : 성균관대학교
기계공학부(공학사)
2013년 2월 : 서울대학교
기계항공공학부(공학석사)
2016년 12월 : 펜실베이니아
주립대학교 기계원자력공학부
(공학박사)

2016년 10월 ~ 현재 : 국방과학 연구소 선임연구원
관심분야 : 레이더 시스템, 레이더 체계설계 등

김 관 성 (Kwan-Sung Kim)



2002년 2월 : 부산대학교
전기전자공학부(공학사)
2004년 2월 : 한국과학기술원
전기전자공학과(공학석사)
2020년 2월 : 한국과학기술원
전기전자공학과(공학박사)
2007년 2월 ~ 현재 : 국방과학

연구소 선임연구원
관심분야 : 레이더 시스템설계 및 성능분석, 신호처리 등

김 찬 흥 (Chan-Hong Kim)



1991년 2월 : 경북대학교
전자공학과(공학사)
1993년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학석사)
2008년 8월 : 한국과학기술원 전기
및 전자전공(공학박사)
1993년 ~ 현재 : 국방과학연구소

수석연구원
관심분야 : 레이더 및 SAR 시스템 설계/분석, 위상배열
안테나 설계/분석, 안테나 측정, 전자장 수치해석,
안테나 신호처리 등