

도플러 저해상도 레이더의 탐지성능 향상을 위한 속도 기반 하이브리드 도플러 처리 기법

권대현*¹, 조병래**², 윤기철*², 김관성*³, 김찬홍*⁴

Velocity based Hybrid Doppler Processing Method to Improve the Detection Performance of Low Doppler Resolution Radar

Daihyun Kwon*¹, Byung-Lae Cho**², Kichul Yoon*², Kwan Sung Kim*³, and Chan-Hong Kim*⁴

요약

본 논문에서는 SIR을 높이기 위하여 속도 기반 하이브리드 도플러 처리 기법을 제안하였다. 본 논문에서 제안하는 기법은 Moving target indicator(MTI)와 Finite impulse response(FIR) 2가지 필터를 속도 구간별로 사용하는 기법이다. 제안한 알고리즘에서는 속도 경계 값을 사용 하는데, 이 값을 결정하는 2가지 파라미터를 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 찾았다. 첫 번째는 모호 속도이며 속도 경계 값과 선형관계인 것을 알아내었다. 두 번째는, FIR 필터의 클러터 표준편차 이며, 속도 경계 값과 로그관계에 있다는 것을 알아내었다. 탐지확률은 Signal to interference ratio(SIR)이 클수록 높아지므로, SIR을 높이면 탐지성능이 향상된다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션을 통하여 검증되었다.

Abstract

In this paper, the velocity based hybrid doppler processing method is proposed to increase SIR. The proposed method uses two filters, MTI and FIR, for each velocity interval. The proposed algorithm uses a velocity boundary and two parameters are specified by Monte Carlo simulation that determine this value. The first is the ambiguity velocity which has a linear relationship with the velocity boundary. The second is the standard deviation of the FIR filter, and we investigate that it is logarithmic with the velocity boundary. Since the detection probability increases as the SIR increases, the detection performance improves as the SIR increases. Finally, the proposed algorithm was verified through simulation.

Keywords

detection, doppler processing, moving target indicator, finite impulse response filter, radar signal processing

* 국방과학연구소 레이더·전자전 기술센터

- ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0002-2014-3071>

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

- ORCID³: <http://orcid.org/0000-0002-7385-4141>

- ORCID⁴: <http://orcid.org/0000-0002-7877-1521>

** 국방과학연구소 레이더·전자전 기술센터(교신저자)

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

· Received: Oct. 12, 2022, Revised: Dec. 07, 2022, Accepted: Dec. 10, 2022

· Corresponding Author: Byung-Lae Cho

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

Tel.: +82-42-821-2073, Email: chobl@add.re.kr

1. 서 론

레이더 수신신호는 표적신호, 클러터, 잡음으로 구성된다[1]. 이때, 잡음은 자연계에 항상 존재하고 있는 반면에 클러터는 탐지환경에 따라 다르다. 다만, 탐지환경이 지상이던 해상이던 저속클러터의 세기가 매우 강하여 SIR(Signal to Interference Ratio)을 낮추고 탐지성능을 떨어뜨린다[2]. 따라서 저속클러터를 제거하여 SIR을 높이기 위한 알고리즘들이 개발되었고 대표적으로 MTI(Moving Target Indicator), FIR(Finite Impulse Response) 등이 있다.

MTI는 인접한 두 펄스 신호 간 차이를 구하여 0 속도 클러터를 효과적으로 제거하는 특징을 가지고 있다[3][4]. 그러나 주파수 응답특성상 클러터와 표적신호를 전체적으로 감쇄시켜서 탐지성능에 악영향을 줄 수 있다는 단점이 있다.

FIR은 임펄스 응답의 유한한 선형결합으로 구성된다[5]. 본 논문에서 사용한 FIR은 계수를 설정할 때, 모델링된 클러터의 공분산 행렬을 최소화하는 계수를 사용하였다[6]. 클러터의 중심 속도와 속도 표준편차를 설정하여 저속클러터를 제거하기 위한 좁고 깊은 차단 필터를 생성 할 수 있다. 즉, FIR은 MTI에 비하여 전체적인 주파수 응답특성이 우월하다. 그러나 저속클러터가 있는 구간에 표적이 있을 경우 표적신호의 극댓값을 감쇄시켜서 극댓값이 2개로 갈라지게 되어 표적신호를 왜곡시키는 단점이 있다.

클러터 환경에서 클러터를 억제하여 탐지성능을 향상시킨 연구들이 있다. 항공레이더에서 STAP(Spatio-Temporal Adaptive Processing)을 기반으로 표적 탐지를 수행한 연구이다[7]. 이 논문에서는 STAP 알고리즘을 사용하면 클러터의 부엽에 가려져 있던 신호를 탐지할 수 있음을 보였다. 또한, 해상레이더에서 클러터 공분산 행렬을 추정하고, 그 행렬의 Whitening filter를 계산하여 표적 탐지성능을 높인 연구가 있다[8].

도플러 처리는 레이더 표적신호로부터 도플러 속도를 계산하는 과정이다. 도플러 처리 시 2가지 이상의 알고리즘을 혼합하여 사용하는 것을 하이브리드 도플러 처리라고 부른다[9]. 하이브리드 도플러 처리는 알고리즘 조합 종류에 따라 무수히 많은 방

법이 존재한다. 다만, 본 논문의 속도 기반 하이브리드 도플러 처리는 MTI와 FIR을 혼합한 방식을 말한다. 속도 구간별로 다른 알고리즘을 사용하였다. 즉, 저속구간에서는 MTI를 사용하고 고속구간에서는 FIR을 사용하면 표적 중심 속도가 유지되면서 SIR을 증가시켜 탐지성능을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서 제안한 하이브리드 도플러 처리를 위해서는 속도 경계 값을 찾는 것이 가장 중요하다. 따라서, 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 속도 경계 값을 결정하는 두 변수 모호 속도와 클러터 표준편차를 찾았다.

본 논문의 다음과 같이 구성되었다. 2장에서는 MTI와 FIR의 개념에 대하여 다루었다. 3장에서는 본 논문에서 제안한 속도 기반 하이브리드 처리 기법과 속도 경계 값 설정 과정에 대하여 서술하였다. 4장에서는 몬테카를로 시뮬레이션 결과를 다루었다. 마지막으로 5장에서는 결론과 향후 과제에 대하여 기술하였다.

II. 관련 연구

2.1 MTI

MTI는 이동표적을 탐지하기 위하여 고정클러터를 제거하는데 주로 사용된다. Canceller라고도 불리며 아래와 같이 정의할 수 있다[3].

$$y(t) = x(t) - x(t - T) \quad (1)$$

이때, t 는 시간, T 는 시간 편이, $x(t)$ 입력, $y(t)$ 는 출력이다. 또한, 전달함수는 아래와 같다.

$$|H(w)| = \left| \frac{Y(w)}{X(w)} \right| = 2 \left| \sin\left(\frac{wT}{2}\right) \right| \quad (2)$$

이때, w 는 주파수, $X(w)$ 는 주파수영역의 입력 신호, $Y(w)$ 는 주파수영역의 출력, $H(w)$ 는 전달함수이다. 여기서 전달함수는 펄스 반복 주파수에 따라 주기적으로 0이 되는 것을 알 수 있다. 실제로 그려보면 그림 1과 같다. 레이더 탐지 관점에서 보면 고정 클러터를 제거하는 특성을 가진다.

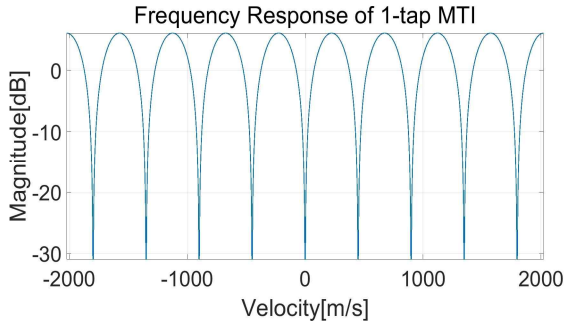


그림 1. 1-tap MTI의 주파수 응답
Fig. 1. Frequency response of 1-tap MTI

다만, 표적신호도 전체적으로 감쇄시키는 단점을 가진다. 또한, 모든 거리 셀에 대하여 수행 시 신호 처리 연산 량이 증가하여 실시간성에 악영향을 줄 수 있다.

2.2 FIR

FIR필터는 임펄스 응답의 선형결합으로 구성되므로, 계수 값에 따라서 특성이 다르다. 본 논문은 저속클러터 제거하는 최적의 FIR을 사용하였다[8]. 클러터를 제거하는 최적의 FIR은 측정된 신호와 모델링된 신호 간 오차를 e 라고 가정하면, e 의 공분산 행렬 기댓값을 최소화하는 계수로 구성된다. 최적화 식은 아래와 같다.

$$\min_{\mathbf{w}} E(\mathbf{e}\mathbf{e}^H) \quad (3)$$

$$\mathbf{w} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{v}$$

이때, e 는 신호 모델링 오차, H 는 행렬의 허미션, E 는 기댓값, \mathbf{w} 는 최적 계수, R 은 공분산 행렬, \mathbf{v} 는 수신신호와 클러터 간 상관벡터 이다. 이 최적의 \mathbf{w} 를 펄스압축 된 수신신호에 곱한 후 FFT 를 수행한 것이 최적의 클러터 제거 FIR이다.

MTI와 FIR의 주파수 응답을 비교하면 그림 2와 같다. FIR은 설계 목적에 맞게 저속영역을 좁고 깊게 제거하는 것을 확인할 수 있다. 다만, FIR은 저속 표적신호를 왜곡하여 극댓값이 2개로 갈라지게 하는 단점이 있으므로 저속영역에서는 MTI를 사용하는 것이 유리하다. 반대로, 고속영역에서 FIR이 주파수 응답이 더 좋은 것을 확인할 수 있다.

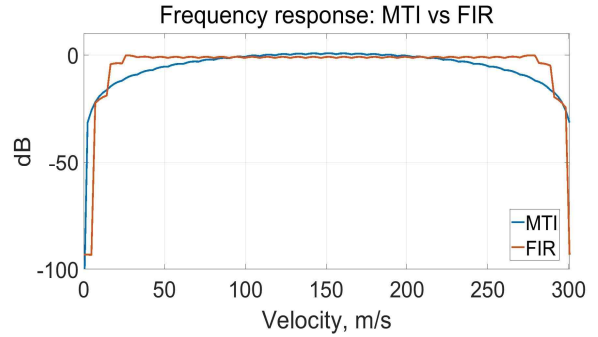


그림 2. MTI와 FIR의 주파수 응답 비교
Fig. 2. Frequency response comparison of MTI and FIR

III. 속도 기반 하이브리드 도플러 처리 기법

3.1 속도 기반 하이브리드 도플러 처리 기법

본 논문에서 제안한 하이브리드 도플러 처리 기법은 MTI와 FIR을 특정 속도구간 별로 각각 사용하는 기법이다. 알고리즘 흐름을 보면 먼저 신호를 생성하는데, s 는 표적신호, c 는 클러터, n 은 열잡음이며 x 는 수신신호이다. 수신된 신호는 MF(Matched Filtering)과정을 거친 후, 속도 기반 하이브리드 도플러 처리를 통해 표적 정보를 획득하게 된다.

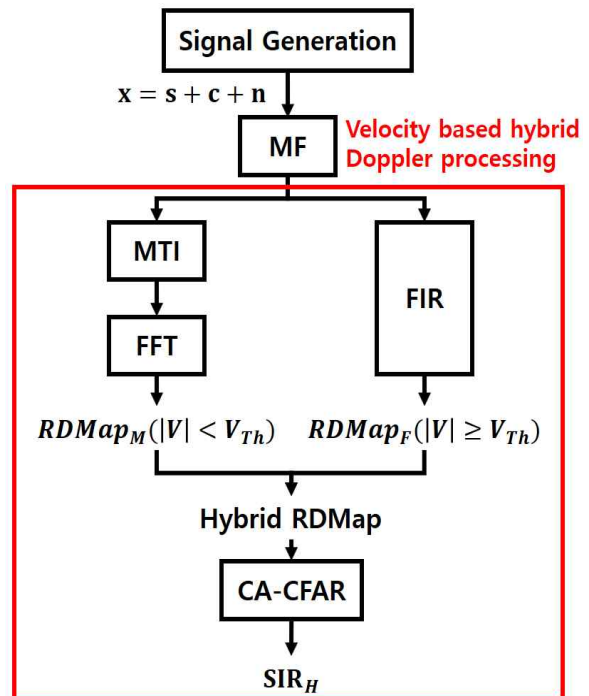


그림 3. 속도 기반 하이브리드 도플러 처리
Fig. 3. Velocity based hybrid doppler processing

MF을 거친 신호는 한편으로 MTI기반 도플러 처리를 수행하고 그 결과 RDM_{ap_M} 을 획득하고, 다른 한편으로 FIR기반 도플러 처리를 수행하여 RDM_{ap_F} 를 획득한다. 즉, 도플러 속도가 V 이고 속도 경계 값이 V_{Th} 이면 저속영역에 대해서는 MTI의 도플러 처리 결과인 $RDM_{ap_M}(|V| < V_{Th})$ 를 사용하고, 고속영역에 대해서는 FIR의 도플러 처리 결과인 $RDM_{ap_F}(|V| \geq V_{Th})$ 를 사용하는 것이 속도 기반 하이브리드 도플러 처리 기법이다.

그 후 CFAR 알고리즘을 적용하여 탐지 결과를 획득한다. 본 논문에서는 CA-CFAR(Cell Averaging-Constant False Alarm Rate) 알고리즘을 적용하였다. CA-CFAR로 탐지된 신호의 극댓값 대비 CA-CFAR의 평균 간섭 레벨 비가 SIR이다.

3.2 탐지성능 기반 속도 경계 값 V_{Th} 찾기

속도 기반 하이브리드 도플러 기법을 사용하기 위하여 속도 경계 값 V_{Th} 를 설정해야 한다. 본 논문에서는 탐지성능을 CA-CFAR기준 SIR로 정의하였으므로, SIR을 최대화 할 수 있는 V_{Th} 를 찾아야한다.

V_{Th} 를 찾기 위한 몬테카를로 시뮬레이션 구성도를 그림 4에 나타내었다. 모델링 된 신호를 각각 MTI와 FIR을 적용 후 CA-CFAR를 적용하였다. 이때, 탐지 결과의 극댓값 대비, CA-CFAR 계산 시 사용하는 표적 주변 신호의 평균값을 SIR로 정의하였다. 또한, 획득 한 MTI의 SIR 값은 SIR_M 이고 FIR의 SIR 값이 SIR_F 이다. SIR_M 보다 SIR_F 이 커지는 순간의 속도 값이 바로 경계 값 V_{Th} 이다.

V_{Th} 는 MTI와 FIR의 주파수 응답에 따라 달라진다. 즉, 모호 속도 V_u 와 FIR에서 모델링한 클러터 속도 표준편차 σ_c 에 따라서 달라진다. 즉, 아래 식과 같이 표현 할 수 있다.

$$V_{Th} = f(V_u, \sigma_c) \tag{4}$$

V_u 와 σ_c 의 각 파라미터를 가변해가며 시뮬레이션을 수행하였고, 그 결과 찾아낸 V_{Th} 값들을 표 1에 정리하였다.

Find V_T
Monte Carlo simulation

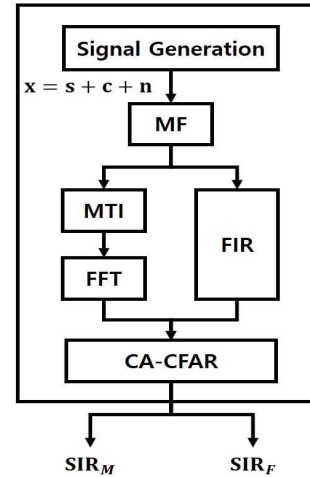


그림 4. 하이브리드 도플러 처리의 속도 경계 값을 찾기 위한 몬테카를로 시뮬레이션 구성도

Fig. 4. Diagram of monte carlo simulation to find velocity boundary value of hybrid doppler processing

표 1. V_u 와 σ_c 에 따른 V_{Th} 값

Table 1. Values of V_{Th} depending on V_u and σ_c

$V_u \backslash \sigma_c$	0.001	1	10
83	2.61	7.83	13.02
151	4.74	14.22	23.67
250	7.83	23.46	39.06

표 1에서 $f(\sigma_c)$ 를 계수로 볼 때, V_u 와 V_{Th} 를 아래의 식 같은 선형 관계로 근사할 수 있다.

$$V_{Th} \approx f(\sigma_c) \cdot \frac{V_u}{31.92} \tag{5}$$

표 1에 의하여, $f(\sigma_c)$ 는 $f(0.001) \approx 1$, $f(1) \approx 3$, $f(10) \approx 5$ 가 성립한다.

표 1에서 V_u 를 계수로 볼 때 V_{Th} 와 σ_c 를 아래의 식 같이 로그 관계로 근사할 수 있다.

$$V_{Th} \approx f(\sigma_c) \cdot \frac{V_u}{31.92} \tag{6}$$

$$f(\sigma_c) = 0.55x^3 + 1.97x^2 + 2.67x + 7.83$$

$$(x = \log_{10}\sigma_c)$$

V_u 는 $f(\sigma_c)$ 를 계수로 볼 때 명확하게 V_{Th} 와 선형관계를 보였다. 또한, σ_c 는 V_{Th} 와 로그 관계를 보였다. 다만, σ_c 의 비선형 근사식 (6)은 시뮬레이션 하지 않은 데이터 값에 대하여 다른 경향성을 보일 수 있다. 따라서 본 논문에서 $\sigma_c = 0.001$ 은 고정 값을 사용하고 V_u 값만 바꾸어가며 연구를 수행하였다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 탐지성능을 CA-CFAR기반 SIR로 정의하였다. 제안한 알고리즘의 탐지성능을 확인하기 위하여 그림 5와 같이 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

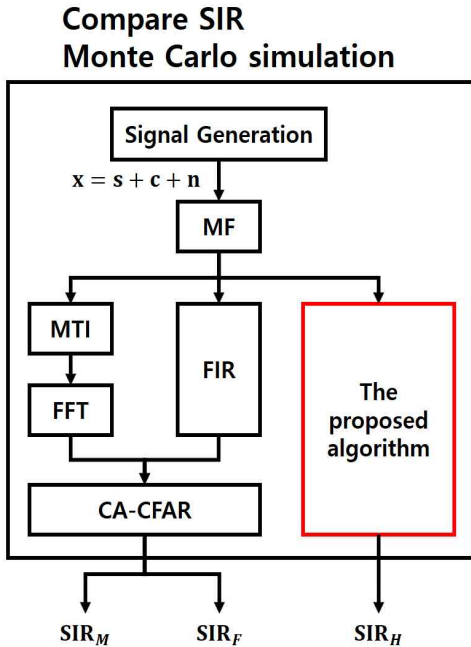


그림 5. 알고리즘 간 탐지성능 비교를 위한 몬테카를로 시뮬레이션 흐름도

Fig. 5. Monte carlo simulation flow chart for comparison of detection performance between algorithms

수신신호 x 를 생성 후 MTI와 FIR 그리고 본 논문의 하이브리드 도플러 처리를 수행 후 CA-CFAR로 탐지를 수행하여 SIR 출력을 계산하였다. 그림 5에서 MTI의 SIR값은 SIR_M 이고 FIR의 SIR값은 SIR_F 이다. 마지막으로, 하이브리드 도플러 처리의 SIR값은 SIR_H 이다.

시뮬레이션 결과 얻은 SIR 값들을 비교하면 그림 6과 같다. 제안한 알고리즘은 경계 값 V_{Th} 를 기준으로 V_{Th} 보다 속도가 작은 영역에서는 SIR_M , 그 반대일 때는 SIR_F 값을 가지게 된다. 따라서, 모든 속도영역에서 가장 높은 값을 가질 수밖에 없다. 이 사실은 그림 6을 통해 확인되었다.

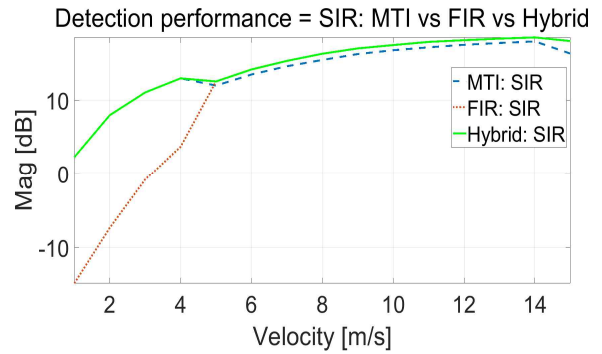


그림 6. 알고리즘 간 SIR 비교

Fig. 6. Comparison of SIR between algorithms

또한, 제안한 기법의 SIR이 MTI와 FIR에 비하여 향상된 평균 증가 비율을 표 2에 나타내었다. 평균 증가 비율을 각 속도 값에 대한 제안한 기법의 SIR과 MTI(혹은 FIR)의 SIR의 비를 구하고 그 값들의 평균을 구한 것이다. 따라서, 제안한 하이브리드 도플러 처리 기법이 기존 알고리즘 대비 성능이 향상되는 것을 확인 할 수 있었다.

표 2. MTI, FIR대비 제안한 알고리즘의 SIR 평균 증가 비율

Table 2. Averaging increase rate of SIR of the proposed algorithm compared to MTI and FIR

변수	값 [dB]
$mean\left(\frac{Hybrid}{MTI}\right)$	0.5638
$mean\left(\frac{Hybrid}{FIR}\right)$	3.5762

V. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 속도 기반 하이브리드 도플러 처리 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 MTI와 최적의 클러터 제거 FIR을 속도 구간별로 나누

어 사용하여 저속과 고속에서 모두 탐지 성능을 높이는 방법이었다.

또한, 제안한 알고리즘의 경계 값 V_{Th} 를 얻기 위하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 V_{Th} 는 V_u 와 선형관계이고, V_{Th} 는 σ_c 와는 로그 관계임을 알 수 있었다. 또한, 제안한 알고리즘이 MTI, FIR보다 SIR이 높게 나오는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인했다.

본 논문에서는 클러터를 모델링할 때, 속도 평균 값과 표준편차 σ_c 를 고정값을 사용하였다. 이는, FIR 사용을 저속 클러터 제거를 목적으로 했기 때문이다. 다만, 본 논문에서 가정한 저속 클러터 파라미터가 실제 환경과 다를 수 있다. 그러므로 실제 환경의 데이터를 입력받아서 클러터 모델 파라미터를 추정하면 클러터 제거 성능이 더 높아질 것이다. 즉, 적응형 FIR를 사용하여 하이브리드 도플러 처리를 수행하면 SIR이 높아지고 탐지성능을 향상시킬 수 있을 것이다. 이러한 적응형 FIR기반 하이브리드 도플러 처리 연구가 향후 과제가 될 것으로 보인다.

References

- [1] M. A. Richards, J. Scheer, W. A. Holm, and W. L. Melvin, "Principles of modern radar", Vol. 1, pp. 3-4, Jun. 2010. <https://doi.org/10.1049/SBRA021E>.
- [2] S. Hong, K. S. Kim, B. L. Cho, and C. H. Kim, "A Study on Environmental Adaptive CFAR to Improve Performance under Sea Clutter Environments", The Journal of KIIT, Vol. 19, No. 7, pp. 83-90, Jul. 2021. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2021.19.7.83>.
- [3] M. Ash, M. Ritchie, and K. Chetty, "On the Application of Digital Moving Target Indication Techniques to Short-Range FMCW Radar Data", in IEEE Sensors Journal, Vol. 18, No. 10, pp. 4167-4175, May 2018. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2823588>.
- [4] H. Jeon, C. Bae, and H. Yang, "Clutter Suppression Method for Altitude and Mainlobe Clutter In Moving Platform Radar", Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 22, No. 10, pp. 1386-1391, Oct. 2018. <https://doi.org/10.6109/JKIICE.2018.22.10.1386>.
- [5] A. E. Cetin, O. N. Gerek, and Y. Yardimci, "Equiripple FIR filter design by the FFT algorithm", in IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 14, No. 2, pp. 60-64, Mar. 1997. <https://doi.org/10.1109/79.581378>.
- [6] E. D'addio, A. Farina, and F. A. Studer, "Performance Comparison of Optimum and Conventional MTI and Doppler Processors", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 6, pp. 707-715, Nov. 1984. <https://doi.org/10.1109/TAES.1984.310453>.
- [7] T. H. Kim, H. W. Jeon, J. H. Shin, and Y. D. Kang, "Improvement of Detection Ranges for Targets in Sidelobe Clutter Surroundings by Sigma-Delta STAP for Airborne Radars", Journal of Electromagnetic Engineering And Science, Vol. 19, No. 4, pp. 234-238, Oct. 2019. <https://doi.org/10.26866/jees.2019.19.4.234>.
- [8] S. Choi, H. Yang, J. Song, H. Jeon, J. Kim, and Y. Chung, "Sea clutter covariance matrix estimation and its application to whitening filter", Journal of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 21 No. 2, pp. 134-142, Apr. 2021. <https://doi.org/10.26866/jees.2021.21.2.134>.
- [9] B. C. Armstrong, "A comparison of conventional, adaptive and hybrid Doppler processing techniques", IEEE Proceedings of the 1992 South African Symposium on Communications and Signal Processing, Sep. 1992. <https://doi.org/10.1109/COMSIG.1992.274299>.

저자소개

권 대 현 (Daihyun Kwon)



2014년 2월 : 한양대학교
전기공학과(공학사)
2016년 2월 : 한국과학기술원
전기 및 전자 공학과(공학석사)
2016년 2월 ~ 7월 :
한국과학기술원 건설 및
환경공학과 위촉연구원

2018년 5월 ~ 현재 : 국방과학연구소 연구원
관심분야 : 레이더 신호처리, 인공지능

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

윤 기 철 (Kichul Yoon)



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

2016년 10월 ~ 현재 : 국방과학연구소 선임연구원
관심분야 : 레이더 시스템, 레이더 체계설계

김 관 성 (Kwan Sung Kim)



2002년 2월 : 부산대학교
전기전자공학부(공학사)
2004년 2월 : 한국과학기술원
전기 및 전자공학과(공학석사)
2020년 2월 : 한국과학기술원
전기 및 전자공학과(공학박사)
2007년 2월 ~ 현재 :

국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 레이더 시스템설계 및 성능분석, 신호처리

김 찬 홍 (Chan-Hong Kim)



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

수석연구원

관심분야 : 레이더 및 SAR 시스템 설계·분석,
위상배열안테나 설계·분석, 안테나 측정, 전자장
수치해석, 안테나 신호처리