

이동 플랫폼 레이더에서 고도 클러터와 주엽 클러터 억제 기법

전현무^{1*} · 배창식¹ · 양훈기²

Clutter Suppression Method for Altitude and Mainlobe Clutter In Moving Platform Radar

Hyeonmu Jeon^{1*} · Chang-sik Bae¹ · Hoon-gee Yang²

^{1*}Naval MFR, Hanwha systems, Gyeonggi-do, 17121, Korea

²Department of Electronics Engineering, Kwangwoon University, seoul 01897, Korea

요 약

이동하는 플랫폼에 탑재된 레이더는 주엽으로 수신되는 주엽 클러터 신호와 더불어 부엽에서 수신되는 고도 클러터에 의해서 표적 신호가 간섭을 받는다. 고도 클러터는 거리가 주엽 클러터에 비해 비교적 짧기 때문에 강한 신호로 레이더에 유입된다. 이러한 클러터는 레이더의 오보 확률을 높이는 주 원인으로 주엽 클러터와 고도 클러터 신호를 동시에 억제할 수 있는 기술이 요구된다.

본 논문에서는 이동 플랫폼 레이더에서 발생하는 주엽 클러터와 고도 클러터 신호를 제거하기 위해서 2개의 펄스 제거기(pulse canceller) 구조를 사용하는 클러터 억제 방법을 제시한다. 펄스 제거기를 사용함에 따른 수신신호의 상관도를 분석하고 두 영역의 클러터를 억제하기 위해서 상관도가 고려된 staggered 펄스 제거기 구조를 보인다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 두 개의 주파수군에 형성된 고도 클러터와 주엽 클러터 성분들이 제안된 staggered 펄스 제거기를 통해 제거되는 것을 보인다.

ABSTRACT

The radar in the moving platform is interfered by the mainlobe clutter as well as the altitude clutter that is received from sidelobe. The altitude clutter is relatively short range compared to mainlobe clutter and therefore enters the radar with a strong signal. As these clutters are major reason making the probability of false alarm high, it is required to suppress both altitude clutter and mainlobe clutter.

In this paper, It is proposed the clutter suppression method consisted of two pulse canceller to suppress the clutters being two frequency area in moving platform. It is analyzed the correlation of output signals according to the use of pulse canceller and provided the structure of staggered pulse canceller considered the correlation. Finally, it shows that altitude clutter and mainlobe clutter are suppressed by proposed staggered pulse canceller using the simulation.

키워드 : 이동 플랫폼 레이더, 고도 클러터, 주엽 클러터, 펄스 제거기, 클러터 억제

Key word : Moving Platform Radar, Altitude Line Clutter, Mainlobe Clutter, Pulse Canceller, Clutter Suppression

Received 18 August 2018, Revised 24 August 2018, Accepted 6 September 2018

* Corresponding Author Hyeonmu Jeon(E-mail : hmjeon.bt@gmail.com, Tel:+82-31-8020-7211)

Naval MFR, Hanwha systems, 491-23, Gyeonggidong-ro, Namsa-myun, Cheoin-gu, Yongin-city, Gyeonggi-do, 17121, Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2018.22.10.1386>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

레이더는 클러터의 간섭에 의해 표적의 탐지와 추정 성능이 저하된다. 움직이지 않는 플랫폼에서 운용되는 레이더는 0Hz 부근에 하나의 군으로 주엽 클러터 성분이 형성되고 이러한 클러터 신호는 MTI(moving target indicator) 필터를 통해 주엽 클러터를 억제할 수 있다 [1, 2]. MTI 필터 중 가장 널리 사용되는 펄스 제거기는 동일 레인지 빈에 존재하는 클러터 신호를 단순히 차(subtraction) 연산을 수행함으로써 주엽 클러터 신호를 효과적으로 억제할 수 있다 [3, 4].

이동 플랫폼의 레이더 신호는 도플러 주파수가 천이된 주엽 클러터와 더불어 플랫폼의 이동방향과 수직방향에서 수신되는 고도 클러터에 의해 간섭을 받는다. 특히, 고도 클러터는 부엽에 수신되지만 주엽 클러터에 비해 근거리 존재하기 때문에 간섭 영향이 크므로 표적을 효과적으로 탐지하기 위해서 필수적으로 제거되어야 한다 [3, 4]. 이와 같이 클러터가 두 개의 영역으로 형성되는 경우는 단일 펄스 제거기만을 통해 클러터를 억제할 수 없다. 이동 플랫폼에서 지상 클러터 억제 기술로 사용되는 STAP(space time adaptive processing)은 도플러 축과 공간 축으로 클러터 신호를 처리하므로 이동 플랫폼에서 발생하는 클러터를 억제할 수 있다 [5, 6]. 하지만 STAP 기술은 많은 데이터 저장 능력과 연산량이 요구되어 레이더 시스템의 규모나 비용적인 측면에서 구현의 한계점이 있다 [6].

본 논문에서는 이동 플랫폼 레이더에서 발생하는 주엽 클러터와 고도 클러터를 억제하기 위한 방법으로 2개의 펄스 제거기 구조를 사용하는 새로운 구조의 펄스 제거기 기술을 제시한다. 펄스 제거기를 사용함에 따른 신호의 상관도를 분석하고 두 영역의 클러터를 억제하기 위해서 상관도가 고려된 펄스 제거기 구조를 보인다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 제안된 펄스 제거기에 의해 두 개의 주파수 군에 형성된 고도 클러터와 주엽 클러터 성분들이 제거됨을 보인다.

II. 시스템 모델링

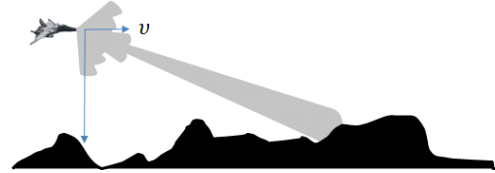


Fig. 1 Radar geometry

그림 1은 이동 플랫폼에 탑재되어 운용되는 레이더 환경을 나타내었다. 위와 같은 환경에서 레이더에 수신되어 다운 컨버전된 수신신호 $y(t)$ 는 다음식과 같이 표적신호 $x(t)$ 와 클러터 신호 $c(t)$ 그리고 잡음신호 $n(t)$ 로 구성된다.

$$y(t) = x(t) + c(t) + n(t). \quad (1)$$

위의 식 (1)에서 표적신호 $x(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [3].

$$\begin{aligned} x(t) &= \alpha e^{j2\pi f_c \tau} = \alpha e^{j2\pi f_c (2R_0 + 2v \cos(\theta)t)/c} \\ &= \alpha e^{j2\pi f_d 2R_0/c} e^{j2\pi f_d t}. \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 α 는 표적의 응답, c 는 빛의 속도, f_c 는 캐리어 주파수(carrier frequency)를 나타내며 τ 는 표적에 산란되어 수신된 지연 시간으로 표적이 속도 v m/s로 이동하는 경우 $\tau = 2(R_0 + v \cos(\theta)t)/c$ 이고 R_0 와 θ 는 레이더와 표적사이의 초기 거리와 레이더와 표적이 이루는 각도를 각각 의미한다. f_d 는 레이더와 표적 사이에 발생하는 도플러 주파수이다.

클러터 신호 $c(t)$ 를 얻기 위해서는 레이더 3dB 빔영역에 의한 각(angle) 해상도(resolution)와 거리 해상도가 만드는 클러터 패치의 통계적 특성, 클러터 패치와 레이더간의 도플러 주파수 및 클러터 패치 간 상관도를 적용해서 얻을 수 있다[7, 8]. 클러터의 스펙트럼은 가우시안 모델을 사용하였고 마지막으로 잡음신호 $n(t)$ 는 백색 가우시안 잡음(white Gaussian noise)으로 $CN(0, \sigma^2)$ 를 따른다고 가정하였다[9, 10].

PRI(pulse repetition interval)가 t_0 라 할 때 m 번째 펄스에 대한 수신 신호는 $y(mt_0)$ 이 되며 표현의 간결성을 위해서 이하 설명에서는 $y[m]$ ($m = 1, 2, \dots, M$)로 표현한다.

정지된 환경에서 운용되는 레이더에서 Two-펄스 제거기를 사용한 신호의 출력신호 $z[m]$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z[m] = y[m] - y[m + 1] \tag{3}$$

식 (3)로부터 0Hz의 도플러 주파수 성분들이 제거되고 이때 펄스 제거기의 blind 속도 V_b 은 다음식과 같다 [3].

$$V_b = \frac{\lambda}{2 \times PRI} (m/s) \tag{4}$$

위의 식 (4)에 해당하는 속도를 갖는 표적 신호가 레이더로부터 손실되는 것을 방지하기 위한 방안으로 staggered-펄스 반복 주파수(pulse repetition frequency, PRF) 기술을 적용함으로써 blind 속도에 있는 표적을 탐지할 수 있다 [3].

그림 1과 같이 이동하는 플랫폼의 레이더에서는 플랫폼 자체의 이동 속도 v 에 의해서 주엽 클러터에서 발생하는 도플러 주파수가 $f_{d,c}$ 만큼 천이되므로 펄스 제거기를 적용하기 위해서는 천이된 도플러 주파수 보상 과정을 추가함으로써 주엽 클러터를 억제할 수 있다. 하지만 이러한 처리 과정에서 고도 클러터는 0Hz에서 $-f_{d,c}$ 로 천이되어 존재하고 부엽으로 수신되는 고도 클러터 신호가 표적신호를 간섭한다. 따라서 표적 신호는 주엽 클러터 신호와 함께 고도 클러터에 의해서 크게 간섭을 받고 이와 같이 두 개의 주파수 영역에서 발생하는 클러터 신호는 단일 펄스 제거기만으로는 억제할 수 없으므로 이를 다루기 위한 클러터 억제 방법을 다음 장에 제시한다.

III. 제안 펄스 제거 시스템

고도 클러터와 주엽 클러터를 억제하기 위해 제안하는 펄스 제거기 알고리즘의 순서도는 그림 2와 같다.

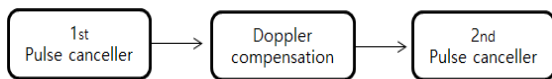


Fig. 2 Block diagram of the proposed pulse canceller

수신신호 $y[m]$ 과 $y[m + 1]$ 은 식 (3)와 같이 첫 번째 펄스 제거기에서 0Hz 부근에 존재하는 고도 클러터 신호를 제거하고 주엽 클러터를 제거하려면 이동 플랫폼

속도와 주엽 클러터의 상대 속도만큼 발생하는 도플러 주파수 $f_{d,c}$ 를 다음식과 같이 보상한다.

$$z'[m] = z[m] * e^{-j2\pi m f_{d,c}} \tag{5}$$

식 (5)과 같이 도플러 주파수 $f_{d,c}$ 가 보상된 $z'[m]$ 에 포함된 주엽 클러터는 0Hz의 도플러 주파수를 갖도록 천이된다. 다음으로 두 번째 펄스 제거기는 식 (3)와 동일한 과정을 수행하여 0Hz에 위치하는 주엽 클러터 신호는 억제할 수 있지만 주엽 클러터 인근에 표적 신호가 존재할 시 표적 신호까지 제거 또는 감소될 수 있으므로 이를 고려한 펄스 제거기를 설계해야 한다.

아래 그림 3은 표적 $z'[m]$ 와 k 샘플 차이만큼 이격된 $z'[m + k]$ 의 상관도를 나타내었다. 시뮬레이션 파라미터는 표1과 같다.

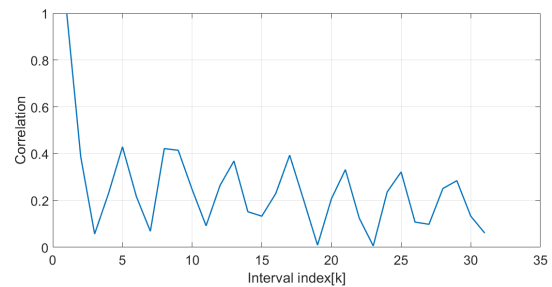


Fig. 3 Correlation of pulse canceller output

위의 그림에서 $k \leq 2$ 구간에 대하여 $z'[m]$ 과 $z'[m + 1]$ 의 상관도가 상당히 높은 것을 확인할 수 있다. 그러므로 식 (3)와 동일한 과정을 두 번째 펄스 제거기에 적용 시 클러터 신호뿐만 아니라 표적 신호까지 제거될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 현상을 피하려면 두 번째 펄스 제거기에서는 첫 번째 단에서 사용한 일반적인 펄스 제거기가 아닌 두 펄스간의 상관도를 고려하여 다음 식 (6)과 같이 두 번째 펄스 제거기에 입력되는 신호는 임의의 p 만큼 샘플이 이격된 펄스 제거기를 사용한다.

$$r[m] = z'[m] - z'[m + p] \tag{6}$$

식 (6)로부터 표적신호는 남기고 0Hz에 존재하는 주엽 클러터 신호를 억제할 수 있다.

3.1. Blind 속도

식 (6)에서 두 펄스간의 상관도가 적절히 감소된 p 를 선택함으로써 주엽 클러터 신호를 억제할 수 있지만 다

음식과 같이 두 번째 펄스 제거기에 의해 V_b 보다 낮은 속도에서 blind 속도가 발생한다.

$$V'_b = \frac{V_b}{p} \text{ (m/s)} \tag{7}$$

V'_b 는 두 번째 펄스 제거기를 사용하여 생기는 blind 속도를 나타낸다. 즉, 펄스간의 간격이 멀어질수록 두 개의 펄스간의 상관관계는 떨어지지만 그에 따른 blind 속도가 낮아진다. 이러한 blind 속도 문제는 그림 4와 같이 두 번째 펄스 제거기가 두 개의 병렬 구조로 staggered PRF 형태가 되도록 구성함으로써 해결할 수 있다.

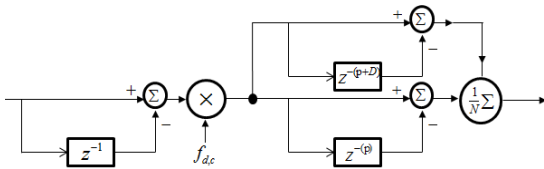


Fig. 4 Configuration of proposed pulse canceller

그림 4에서 두 번째 펄스 제거기는 N개의 병렬 구조로 확장 가능하지만 단순화하기 위하여 N=2인 경우로 제한하였다. 위의 그림에서 지연 인덱스는 각각 p와 p+D이고 여기서 D는 staggered PRF 기술과 동일한 방법으로 최소 공배수가 최대가 되도록 서로 다른 이격 인덱스를 이용한다 [3]. staggered PRF가 적용된 제안 펄스 제거기의 응답함수 H(f)는 다음식과 같다.

$$H(f) = \left(1 - e^{-j2\pi(f-f_{d,c})PRI} \right) \times \left(2 - e^{-j2\pi p(f)PRI} - e^{-j2\pi(p+D)(f)PRI} \right) \tag{8}$$

IV. 시뮬레이션

표 1은 본 알고리즘을 수행하기 위한 시뮬레이션의 파라미터를 나타낸 표이다.

Table. 1 Simulation parameter

Parameter	Value	Parameter	Value
Radar Velocity	300km/h	PRF	20kHz
Target Velocity	(-30, -20)m/s	Operating frequency	10GHz
Target range bin	125bin	# of pulse integration	32

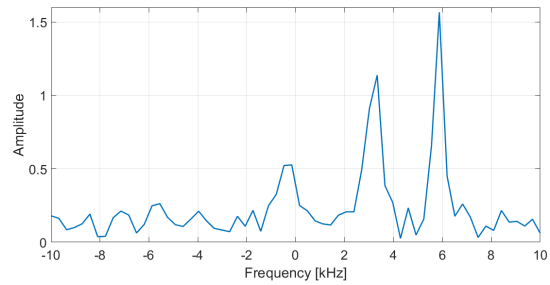


Fig. 5 Spectrum of received signal

그림 5는 레이더에 수신된 $y[m]$ 의 주엽 클러터, 고도 클러터, 그리고 표적신호의 주파수 성분을 나타낸 그림이다. 고도 클러터는 0Hz 위치에서 나타나는 것을 확인할 수 있고 5.6kHz 위치에 주엽 클러터 성분이 존재하는 것을 확인할 수 있으며 표적은 3.6kHz에 위치하여 있다.

그림 6는 첫 번째 펄스 제거기를 사용하여 그림 5에서 0Hz에 존재하는 고도 클러터를 억제한 결과를 보인다. 표적 신호와 주엽 클러터 신호는 큰 변화 없이 존재하는 것을 알 수 있다.

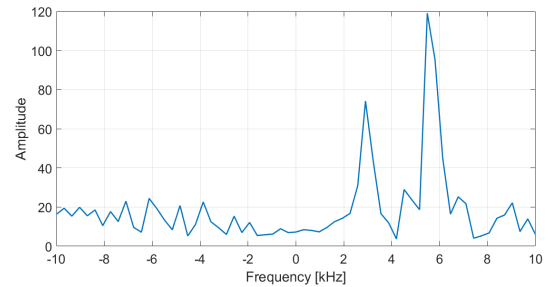


Fig. 6 Spectrum of 1st pulse canceller output

그림 7은 식 (5)과 같이 이동 플랫폼의 속도 보상한 후 두 번째 펄스 제거기를 사용한 결과로써 p가 1, 3인 경우에 대한 출력의 정규화된 주파수 스펙트럼이다. 우선 5.6kHz에 해당하는 주파수가 보상되므로 표적 신호는 -2kHz대역에 존재하고 두 경우 모두 표적 신호가 -2kHz 주파수에 위치하는 것을 알 수 있다. p=1인 경우 상관도가 높은 신호들이 두 번째 펄스 제거기에 의해 제거가 되므로 표적 신호가 제거되거나 간섭 신호들이 증가하므로 SIR(signal to interference ratio)이 감소한다. p=1인 경우와는 달리 p=3인 경우 상관도가 줄어든 두 개의 펄스를 사용함에 따라 클러터 신호들이 증가하지 않고 0Hz 신호가 제거되는 것을 확인할 수 있다.

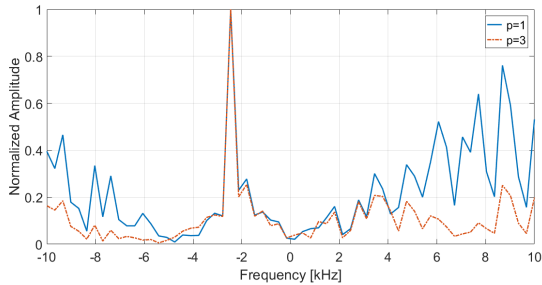


Fig. 7 Spectrum of 2nd pulse canceller output

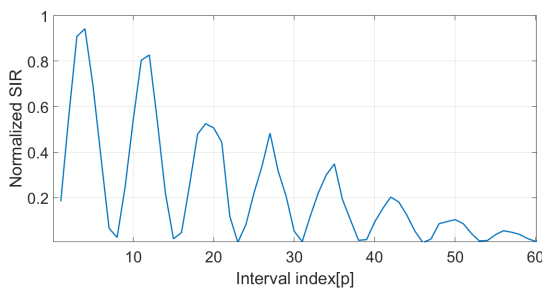


Fig. 8 Normalized SIR corresponding to p

그림 8은 이격 간격이 p인 non-staggered 펄스 제거기 출력단의 SIR을 나타낸 그림이다. 그림 7의 결과와 같이 p=3 이상인 부분에서는 클러스터 신호가 억제되어 SIR이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 전체적으로 p가 증가할수록 SIR이 감소 추이를 보이는 것은 p가 증가함에 따라 식 (6)에 의해 처리될 수 있는 펄스수가 감소하므로 발생하는 현상이다. 그리고 이격 간격 p=8을 주기로 nulling이 발생하는 것은 non-staggered 펄스 제거기의 blind 속도에 의해 발생하는 것으로 staggered PRF 구조가 필요함을 보인다. 그림 3, 그림 7, 그리고 그림 8의 결과로부터 이격 간격 p 상관도가 0.5이하로 줄어드는 지점과 펄스 제거기에 의해 처리될 수 있는 펄스수를 고려하여 설계해야 함을 알 수 있다.

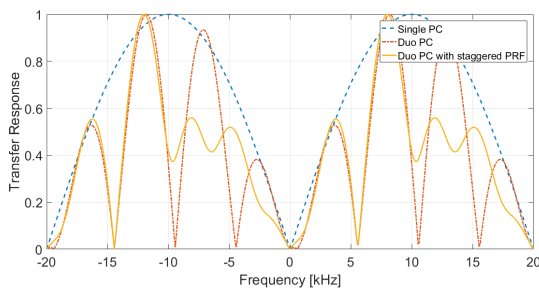


Fig. 9 Frequency response of pulse canceller(PC)

그림 9는 p=4인 경우에 대하여 첫 번째단의 펄스 제거기, non-staggered 제안 펄스 제거기, 그리고 staggered 제안 펄스 제거기 알고리즘의 필터 응답을 나타낸다. non-staggered 제안 펄스 제거기에 의해서 V'_b 가 V_b 에 비해 4배 줄어드는 것을 확인할 수 있고 이로 인해 탐지 불가능한 영역이 대략 4배 늘어나는 것을 알 수 있다. staggered 제안 펄스 제거기는 내부의 두 번째 펄스 제거기에 대하여 p=3, $p+D_1=4$, $p+D_2=5$ 로 staggered PRF를 구성한 필터 응답이다. 위의 결과로부터 내부 staggered PRF에 의해 blind 속도 문제가 해결됨을 확인할 수 있고 0Hz와 5.6kHz에 해당하는 고도 클러스터와 주엽 클러스터가 적절히 제거되는 것을 필터 응답을 통해 확인할 수 있다.

마지막으로 그림 10과 그림 11은 그림 8과 동일한 환경으로 각각 staggered 제안 펄스 제거기와 non-staggered 제안 펄스 제거기에 대한 출력 신호를 거리에 따라 non-coherent 적분한 값이다. non-staggered 제안 펄스 제거기는 125번째 레인지 bin에 존재하는 표적 신호가 검출되지 않지만 staggered 제안 펄스 제거기에서 출력된 결과에서는 표적신호가 주변 신호 레벨보다 확연히 높은 결과 값을 보이는 것을 확인할 수 있고 이에 따라 클러스터 신호가 제거되고 표적이 탐지가 가능함을 알 수 있다.

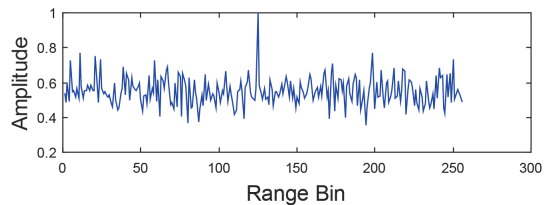


Fig. 10 Pulse integration with a staggered PRF

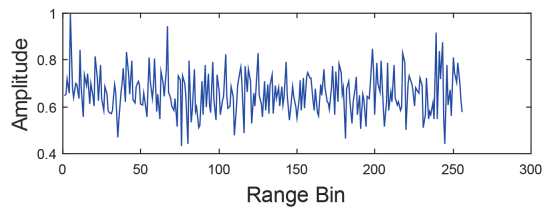


Fig. 11 Pulse integration without a staggered PRF

V. 결 론

본 논문에서는 이동하는 플랫폼의 레이더에서 펄스 제거기를 사용하여 주엽 클러터와 고도 클러터를 제거하기 위한 알고리즘을 제안하였다.

첫 번째 펄스 제거기를 이용하여 고도 클러터를 억제 후 출력값의 상관도를 고려한 두 번째 펄스 제거기 구조를 제시하였고 상관도가 0.5이하로 낮은 이격 인덱스 p 를 사용함으로써 주엽 클러터가 억제되는 것을 보였다. 마지막으로 제안 펄스 제거기에 의해 발생하는 blind 속도 문제를 해결하기 위하여 두 번째 펄스 제거기 구조를 병렬 구성함으로써 두 영역에 형성된 클러터 신호를 제거하고 표적을 효율적으로 탐지할 수 있음을 보였다.

ACKNOWLEDGEMENT

This material is based upon work supported by the Ministry of Trade, Industry&Energy (MOTIE, Korea) under Industrial Technology Innovation Program(No. 10050545, 'Development of Collision Avoidance Radar Sensor System for Helicopter')

REFERENCES

- [1] I. Cohen and N. Levanon, "Adjusting 3-Pulse Canceller to Enhance Slow Radar Targets" *IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems*, Tel Aviv, Israel, pp. 1-5, Nov. 2015.
- [2] X. -M. Li, D. -Z. Feng, H. -W. Liu, M. -D. Xing and D. Luo, "Two-dimensional pulse-to-pulse canceller of ground clutter in airborne radar" *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 3, pp. 133-143, Feb. 2009.
- [3] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, 2ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2014.
- [4] G. W. Stimson, H. D. Griffiths, C. J. Baker, and D. Adamy, *Introduction to Airborne Radar*, 3ed. New Jersey, NJ: SciTECH Publishing, 2014.
- [5] J. R. Guerci, *Space-Time Adaptive Processing for Radar*, 2nd. Boston London, ARTECH HOUSE, 2014.
- [6] W. L. Melvin, "Space-Time Adaptive Processing for Radar," in *Academic Press Library in Signal Processing*, 1sted. Oxford, Elsevier, ch. 12, pp. 595-666, 2014.
- [7] K. D. Ward, R. A. Tough, and S. Watts, *Sea Clutter : Scattering, the K Distribution and Radar Performance*, 1st ed. London, The Institution of Engineering and Technology, 2006.
- [8] Y. Dong, "Optimal non-coherent gddetection in K-distributed clutter environment," in *International Conference on Radar*, Adelaide: SA, pp. 252-257, 2013.
- [9] J. Lee, "Analysis of Sea Clutter Removal Capability in a Weather Radar Based on a Vertical Phased Array Antenna," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 22, no. 1, pp.155-161, Jan. 2018.
- [10] J. Lee, "Analysis of Clutter Effects in a Weather Radar," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 20, no. 9, pp.1641-1648, Sep. 2016.



전현무(Hyeonmu Jeon)

2012년 2월 : 광운대학교 전자공학과 학사
 2017년 8월 : 광운대학교 전파공학과 박사
 2018년 ~ 현재 : 한화시스템 레이더 PGM
 연구소 전문 연구원
 ※관심분야 : 레이더 신호처리, 레이더 시스템
 설계/성능분석



배창식(Chang-sik Bae)

2015년 2월 : 광운대학교 전자융합공학과 학사
 2017년 2월 : 광운대학교 전파공학과 석사
 2017년 ~ 현재 : 한화시스템 레이더 PGM
 연구소 연구원
 ※관심분야 : 레이더 신호처리, 레이더 시스템
 설계/성능분석



양훈기(Hoon-gee Yang)

1985년 2월 : 연세대학교 전자공학과 학사
 1987년 5월 : SUNY at Buffalo 전기컴퓨터공학과
 석사
 1992년 4월 : SUNY at Buffalo 전기컴퓨터공학과
 박사
 1992년 5월 ~ 10월 : SUNY at Buffalo 연구원
 1993년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 전자공학과 교수
 ※관심분야 : 무선통신 시스템, 디지털 신호처리,
 레이더 신호처리