

펄스 도플러 레이더의 수신 신호 기반 잡음 전력 추정 기법 연구

정태희*¹, 김소연*², 조병래*³

A Noise Power Estimation Technique using Received Signals from a Pulse-Doppler Radar

Taehee Jeong*¹, So-Yeon Kim*², and Byunglae Cho*³

This work was supported by the Agency for Defense Development grant funded by the Korean government

요 약

펄스 도플러 레이더 시스템에서는 표적의 신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio) 산출, 외부 간섭 또는 제밍 신호의 탐지 등을 위해 잡음 전력 추정이 필수적으로 요구된다. 특히 수신 신호 기반의 잡음 전력 추정 기법은 이러한 판단의 정확성을 좌우하며, 레이더 성능 향상과 신뢰성 있는 표적 탐지, 효과적인 전자전 대응을 위해 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 펄스 도플러 레이더 수신 신호를 기반으로 한 새로운 잡음 전력 추정 기법을 제안하고, 이를 실제 비행시험 데이터를 통해 성능 검증하였다. 그 결과, 기존의 표적 탐지 결과 기반 추정 기법이 36.7%의 오차를 보인 반면, 제안된 기법은 오차를 2.94%로 낮추며 추정 정확도가 크게 향상됨을 확인하였다. 본 연구는 기존 기법 대비 높은 정확도와 안정성을 갖춘 잡음 전력 추정 방안을 제시함으로써, 레이더 시스템의 전반적인 신뢰성과 성능 개선에 기여할 수 있음을 입증하였다.

Abstract

In pulse-Doppler radar systems, accurate noise power estimation is essential for calculating the Signal-to-Noise Ratio (SNR), detecting external interference or jamming signals, and ensuring overall system reliability. Signal-based noise power estimation plays a critical role in enhancing radar performance, enabling reliable target detection, and supporting effective electronic warfare countermeasures. This paper proposes a novel method for estimating noise power using received radar signals, independent of conventional target detection results. The proposed approach was validated using real flight test data from an airborne pulse-Doppler radar system. Experimental results show that while traditional estimation methods based on target detection exhibited an error of 36.7%, the proposed method reduced the error to 2.94%, demonstrating a significant improvement in accuracy. The results confirm that the proposed technique offers superior accuracy and robustness compared to existing methods, contributing to improved reliability and performance in radar systems.

Keywords

pulse-doppler radar, noise power estimation, radar system, signal to noise ratio

* 국방과학연구소 3기술연구원 4부(*¹ 교신저자)
- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0002-6427-8410>
- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0003-2424-0095>
- ORCID³: <https://orcid.org/0000-0002-9160-3362>

• Received: Aug. 20, 2025, Revised: Sep. 01, 2025, Accepted: Sep. 04, 2025
• Corresponding Author: Taehee Jeong
4th Directorate, 3rd R&D Institute, Agency for Defense Development
(ADD), Daejeon, Republic of Korea
Tel.: +82-42-821-2363, Email: taehee@add.re.kr

1. 서 론

펄스 도플러 레이더에서는 표적의 신호 대 잡음비(SNR, Signal-to-Noise Ratio)를 계산하거나, 외부 간섭 및 재밍 신호의 존재 여부를 판단하기 위해 잡음 전력 값이 활용된다. 이때 수신 신호 기반의 잡음 전력 추정 기법은 다양한 레이더 판단 및 제어 과정에서 핵심적인 역할을 한다[1]. 특히, SNR은 표적 추적 단계에서의 연관 성능에 직접적인 영향을 미치기 때문에, 잡음 전력을 정밀하게 추정하는 것은 레이더 탐지 및 추적 성능 향상을 위해 매우 중요하다. 또한, 잡음 전력은 레이더 상태 모니터링, 간섭/재밍 판단, 중심 주파수 선택 등 여러 시스템 프로세스의 기준으로 활용되므로, 그 정확한 추정은 레이더 시스템 운용에 필수적이다. 정확한 잡음 전력 추정 없이는 전체 레이더 처리 체계의 신뢰성 또한 확보하기 어렵다.

기존의 잡음 전력 추정 기법은 거리-도플러 전력 지도에서 표적 탐지를 수행한 후, 탐지된 표적을 제외한 나머지 셀의 전력을 기반으로 잡음 전력을 계산한다[1]. 그러나 이 방식은 표적 탐지 성능에 의존적이기 때문에, 탐지 확률이 낮아질 경우 추정 정확도도 함께 저하되는 문제가 있다. 특히 다중 표적 환경에서는 탐지 성능이 열화될 수 있으며, 이로 인해 미탐지된 표적이 잡음으로 잘못 간주되어 실제보다 큰 잡음 전력이 추정되는 오류가 발생할 수 있다. 따라서, 표적 탐지 성능에 대한 의존성을 줄이면서도 잡음 전력을 안정적으로 추정할 수 있는 새로운 접근 방식이 요구된다.

잡음 전력 추정 관련 최근 연구 동향으로는 상호 작용 다중 모델(IMM, Interacting Multiple Model) 필터의 우도 함수(Likelihood function)를 이용하여 잡음 분산을 실시간으로 추정하는 방법[2]이 제안되었으나, IMM 필터의 우도 함수 사용으로 다소 복잡하며, 잡음 분산은 추정하나 잡음 전력 값의 실시간 추정은 불가능하다는 단점이 있다. 잡음이 알려지지 않은 환경에서도 실현 가능한 추적 시스템을 위한 레이더 오차와 측정 잡음을 추정하기 위한 연구[3]에서는 측정 잡음 공분산을 추정하기 위해 개선된 Sage-Husa 알고리즘[4]을 제안하였으나, 이 개선된

알고리즘 역시 잡음 전력 값의 실시간 추정은 불가능하다는 한계가 있다. 또한, 방위각 방향으로 스캔하는 기상 레이더의 데이터를 수집하여 실시간으로 잡음 전력을 추정하는 방법[5][6], 합성 개구 레이더(SAR, Synthetic Aperture Radar) 잡음 재밍 분석 방법[7], 항공기 레이더 환경에서 잡음 및 기만 재밍 효과도 분석[8] 등의 연구가 최근 진행되었으나, 여전히 펄스 도플러 레이더의 거리-도플러 전력 지도에서 실시간으로 잡음 전력 값을 추정하기 어렵다는 한계가 있다.

최근에는 소형 표적 탐지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 시간 주파수 처리를 활용한 무인 항공기 탐지 관련 연구[9]에서는 잡음 제거를 위한 기술을 연구하였고, 적응 잡음 완전 앙상블 경험적 모드 분해(CEEMDAN, Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise) 알고리즘이 사용되었으나 반복 연산이 필요하여 연산량이 증가하는 단점이 있고, 잡음 전력 값의 추정이 불가능한 단점이 있다.

최근 영상 분야에서는 합성곱 신경망(CNN, Convolutional Neural Networks) 기반의 방법을 적용하여 잡음 추정을 통해 이미지 복원(Denoising)을 수행하는 연구[10]가 진행되었으나, 이러한 방법은 사전에 학습이 필요하여 사전에 많은 데이터와 시간 자원이 필요하다는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존 기법의 한계를 극복하고자 펄스 도플러 레이더의 수신 신호를 활용하여 잡음 전력을 실시간으로 추정하는 새로운 방법을 제안한다. 제안하는 기법은 거리-도플러 전력 지도를 16개의 부분 영역으로 나누고, 각 영역의 평균값을 기반으로 잡음 전력을 추정하는 방식이다. 또한, 실제 항공기 레이더 시스템 환경에서의 적용 가능성을 검증하기 위해 비행시험을 수행하였다. 이를 통해 본 연구에서 제안한 기법이 표적 탐지 결과에 의존하는 기존 방법의 한계를 효과적으로 개선할 수 있음을 확인하였다. 이러한 접근은 잡음 전력 추정의 정확도와 신뢰성을 동시에 향상시켜 레이더 시스템의 전반적인 성능 개선에 기여할 것으로 기대된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기존의 표적 탐지 결과 기반 잡음 전력 추정 기법을 설

명하고, III장에서는 본 논문에서 제안하는 수신 신호 기반 잡음 전력 추정 기법을 소개한다. IV장에서는 실제 항공기 펄스 도플러 레이더 비행시험을 통해 제안 기법의 유효성을 검증하며, V장에서 결론을 제시한다.

II. 표적 탐지 결과 기반 잡음 전력 추정 기법

펄스 도플러 레이더에서 표적 탐지 결과 기반 잡음 전력 추정 기법[1]의 구성도는 그림 1과 같다.

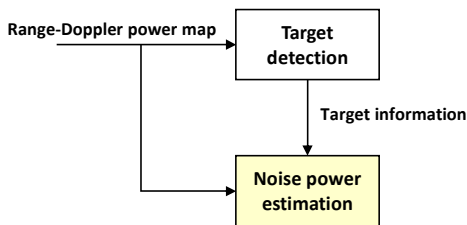


그림 1. 표적 탐지 결과 기반 잡음 전력 추정 기법
Fig. 1. Noise power estimation technique based on target detection results

표적 탐지부에서 거리-도플러 전력 지도를 입력받아 표적 탐지를 수행한 후 표적 정보(거리-도플러 전력 지도에서 표적의 위치)를 추출한다. 잡음 전력 추정부에서는 표적 탐지부에서 추출한 표적 정보와 거리-도플러 전력 지도를 이용하여 잡음 전력을 추정한다.

잡음 전력 추정부에서 잡음 전력을 추정하는 방법은 다음과 같다. 거리-도플러 전력 지도는 표적과 잡음이 존재한다고 가정하여, 거리-도플러 전력 지도에서 표적이 위치한 셀을 제외한 나머지 셀들의 평균값을 계산하여 잡음 전력을 추정한다. 이를 수식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$P_n = \frac{1}{N_{t, i, k \neq \text{target}}} \sum X(i, k) \quad (1)$$

여기서 N_t 는 거리-도플러 전력 지도에서 표적이 위치한 셀을 제외한 나머지 셀들의 개수이며, $X(i, k)$ 는 거리-도플러 전력 지도에서 i 번째 거리 셀, k 번째 도플러 셀의 전력 값이다.

표적 탐지 결과 기반 잡음 전력 추정 기법은 최대한 높은 표적 탐지 확률로 표적을 탐지하고 이 표적 정보 들을 잡음 전력 추정부로 전달해야 잡음 전력 추정의 정확도가 높아진다는 단점이 존재한다. 즉, 잡음 추정의 정확도가 표적 신호 탐지 정확도에 의존적이다.

다수의 표적이 존재하는 다중 표적 환경의 레이더 시스템에서는 탐지 성능이 열화될 수 있으며, 열화된 탐지 성능으로 인해 잡음 전력 추정 기법 또한 부정확한 값을 출력할 수 있다. 표적 탐지 시 일부 미탐지 된 표적들은 잡음 전력 추정에 사용되므로, 실제 잡음 전력보다 크게 잡음 전력이 추정되는 단점이 존재한다. 그리고, 잡음 추정을 위해 사전에 표적 탐지부를 이용해서 표적 정보를 추출해야 하므로 잡음 추정 시스템이 복잡해지는 단점이 있다.

III. 수신 신호 기반 잡음 전력 추정 기법

본 논문에서 제안하는 수신 신호 기반 잡음 전력 추정 기법은 II장에서 기술한 단점을 해소하기 위해 제안된 것으로서, 다중 표적이 존재하는 환경의 펄스 도플러 레이더 시스템에서 정확한 잡음 전력을 추정하는데 사용할 수 있으며, 별도의 표적 탐지 결과를 사용하지 않기 때문에 표적 탐지부의 설계 및 제작에 따른 비용 및 시간을 절감할 수 있고, 잡음 전력 추정 시스템의 소형화 가능 등의 장점이 있다.

펄스 도플러 레이더에서 수신 신호 기반 잡음 전력 추정 기법의 구성도는 그림 2과 같다.

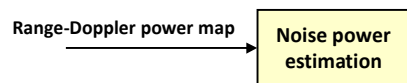


그림 2. 수신 신호 기반 잡음 전력 추정 기법
Fig. 2. Noise power estimation technique based on received signal

수신 신호 기반 잡음 전력 추정 기법은 그림 1의 표적 탐지 결과 기반 잡음 전력 추정 기법의 구성도 대비 표적 탐지부가 필요 없으며, 잡음 전력 추정부의 독립적 잡음 추정이 가능하다는 장점이 있다.

본 논문에서 제안하는 수신 신호 기반 잡음 전력 추정 기법은 다음과 같다.

입력된 거리-도플러 전력 지도를 그림 3과 같이 16개의 부분 영역으로 나누며, 부분 영역들은 거리 및 도플러 축으로 모두 같은 크기를 갖는다. 본 논문에서는 16개의 부분 영역으로 나누는 내용으로 이후 단계를 전개하였으나, 20개 또는 25개 등 다른 수의 부분 영역으로 나누는 것도 가능하다.

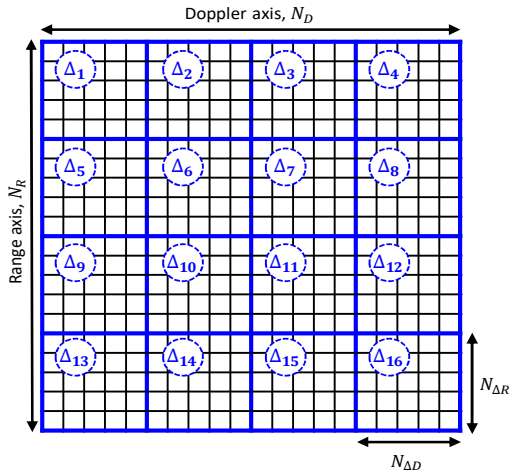


그림 3. 거리-도플러 전력 지도의 부분화
Fig. 3. Partialization of the range-doppler power map

입력된 거리-도플러 전력 지도에서 거리 축과 도플러 축의 셀 개수를 각각 N_R, N_D 라고 할 때 부분 영역의 거리 축과 도플러 축의 셀 개수는 각각 $N_{\Delta R} = N_R/4, N_{\Delta D} = N_D/4$ 가 되며, 부분 영역 전체의 셀 개수는 $N_{\Delta} = N_{\Delta R} \times N_{\Delta D} = (N_R \times N_D)/16$ 이다. 각각의 16개의 부분 영역에서 각각의 평균값 \overline{X}_M 을 식 (2)와 같이 구한다.

$$\overline{X}_M = \frac{1}{N_{\Delta}} \sum_{i,k \in \Delta_M} X(i,k) \quad (M=1, \dots, 16) \quad (2)$$

여기서 Δ_M 은 M 번째 부분 영역을 나타내며, $X(i,k)$ 는 거리-도플러 전력 지도에서 i 번째 거리 셀, k 번째 도플러 셀의 전력 값이다.

계산된 평균값 $\overline{X}_1, \dots, \overline{X}_{16}$ 을 이용해서 각 부분 영역에서 식 (3)을 만족하는 셀들만 이용하여 평균값 \widehat{X}_M 을 식 (4)를 이용하여 계산한다.

$$X(i,k) \leq \beta \times \overline{X}_M \quad (i,k \in \Delta_M) \quad (3)$$

여기서 β 는 조정 가능한 상수 값으로 보통 5dB 내외로 설정한다. 즉, 각각의 부분 영역 내의 셀들 중에서 크기가 평균값 \overline{X}_M 의 β 배와 같거나 작은 셀들만을 이용해서 평균값 \widehat{X}_M 을 식 (4)를 이용하여 계산한다.

$$\widehat{X}_M = \frac{1}{\widehat{N}_M} \sum_{i,k \in \widehat{\Delta}_M} X(i,k) \quad (M=1, \dots, 16) \quad (4)$$

여기서 $\widehat{\Delta}_M$ 은 M 번째 부분 영역 내에서 식 (3)을 만족한 영역을 나타내며, \widehat{N}_M 은 M 번째 부분 영역 내에서 식 (3)을 만족한 영역의 셀 개수를 나타내며, $X(i,k)$ 는 거리-도플러 전력 지도에서 i 번째 거리 셀, k 번째 도플러 셀의 전력 값이다. 그 후, 잡음 전력을 추정하기 위해서 계산된 평균값 $\widehat{X}_1, \dots, \widehat{X}_{16}$ 을 크기 순서로 아래 식 (5)와 같이 오름차순으로 정렬한다.

$$\widehat{X}_1, \dots, \widehat{X}_{16} \rightarrow \widehat{X}_{(1)}, \dots, \widehat{X}_{(16)} \quad (5)$$

여기서 $p \leq q$ 일 때 $\widehat{X}_{(p)} \leq \widehat{X}_{(q)}$ 를 만족한다. 오름차순으로 정렬된 평균값 $\widehat{X}_{(1)}, \dots, \widehat{X}_{(16)}$ 중 가장 작은 2개와 가장 큰 2개를 제외한 $\widehat{X}_{(3)}, \dots, \widehat{X}_{(14)}$ 에 해당하는 부분 영역들의 셀 값들 중 식 (3)을 만족하는 셀 값들을 이용하여 아래 식 (6)과 같이 잡음 전력 P_n 을 추정한다.

$$P_n = \frac{1}{\widehat{N}} \sum_{i,k \in \widehat{\Delta}} X(i,k) \quad (6)$$

여기서 $\widehat{\Delta}$ 은 $\widehat{X}_{(3)}, \dots, \widehat{X}_{(14)}$ 에 해당하는 부분 영역들 중 식 (3)을 만족하는 셀 값들이며, \widehat{N} 은 이 셀의 개수이다. 즉, 12개의 영역 중에서 식 (3)을 만족하는 셀들의 평균을 잡음 전력으로 추정한다.

IV. 비행시험을 통한 제안 기법의 유효성 검증

4.1 펄스 도플러 레이더 및 시험 항공기

펄스 도플러 레이더를 시험 항공기에 탑재한 후 비행시험을 통해 데이터를 획득하였다. 펄스 도플러 레이더의 비행시험 데이터 획득을 위한 펄스 도플러 레이더 및 시험 항공기(FTB, Flying Test Bed)는 그림 4[11]-[13]과 같으며, 능동 전자 주사 배열(AESA, Active Electronically Scanned Array) 레이더를 사용하였다.



그림 4. 펄스 도플러 레이더 및 시험 항공기
Fig. 4. Pulse-doppler radar and FTB

AESA 레이더는 전자주사를 통한 표적 탐지 및 추적을 수행하는 센서로서 항공기의 상황 인식을 위한 핵심 센서 역할을 수행한다. 시험 항공기는 민간 항공기(B-737)를 개조하여 노즈 부분에 레이더와 AESA 레이더를 장착한 항공기이다. 이는 국내에서 최초로 수행하는 레이더 시험 항공기로, 항공기 운용환경에서의 비행시험을 통해 신뢰성 있는 AESA 레이더를 개발하기 위하여 개조된 시험 항공기이다 [11]-[13].

4.2 비행시험 파라미터 및 시나리오

비행시험 데이터 획득에 사용한 펄스 도플러 레이더의 주요 파라미터는 아래 표 1과 같다. 레이더의 운용 주파수는 X 대역이며, 펄스 반복 주파수(PRF, Pulse Repetition Frequency)는 HPRF(High Pulse

Repetition Frequency)를 사용하였다.

시험 항공기는 남아프리카공화국에서 운용하였고, 세부적인 시험 항공기의 위치와 안테나 빔 조향 영역을 위성지도[14]에 나타내었으며 그림 5와 같다.



그림 5. 시험 항공기의 위치와 안테나 빔 조향 영역
Fig. 5. Position of the FTB and antenna beam steering area

표 1. 시험 레이더 관련 파라미터

Table 1. Parameters of the experimental radar

Parameter	Value
Frequency band	X-band
PRF	HPRF (> 8kHz)
Data collection date	August 2024
Position of radar	On the aircraft in the Republic South Africa

4.3 비행시험 데이터 분석

비행시험으로부터 획득한 거리-도플러 전력 지도는 그림 6과 같으며 해당 데이터에는 잡음, 표적, 클러스터 등이 포함되어 있다. 빨간색 점이 일정 오경 보율(CFAR, Constant False Alarm Rate) 탐지기[1]에서 탐지된 표적에 해당하는 셀을 의미하며 총 305 개의 셀이 탐지되었다. 기존의 표적 탐지 결과 기반 잡음 전력 추정을 위해 그림 1의 방법을 이용하여 그림 6의 거리-도플러 전력 지도에서 표적이 위치

한 셀을 제외한 나머지 셀들의 평균값을 계산(식 (1))하여 잡음 전력을 추정하였고, 그 결과 추정 잡음 전력은 $-31.22\text{dBm}(0.0007545\text{mW})$ 이었다. 잡음 추정 정확도 계산을 위하여 잡음의 참값을 그림 6의 거리-도플러 전력 지도에서 표적이 없는 부분(사이즈 10×121)을 평균하여 계산하였고, 그 결과 잡음의 참값은 $-32.58\text{dBm}(0.0005519\text{mW})$ 로 계산되었다.

노이즈가 없는 환경에서 레이더를 운용한다면 이상적인 수신기 잡음을 수학적으로 계산할 수 있지만, 잡음은 레이더 시스템 자체에서 발생하는 열잡음 외에 대기, 전파 간섭 등이 포함된 외부 환경에 의한 잡음이 발생하므로 잡음 참값은 거리-도플러 전력 지도에서 추정하였다.

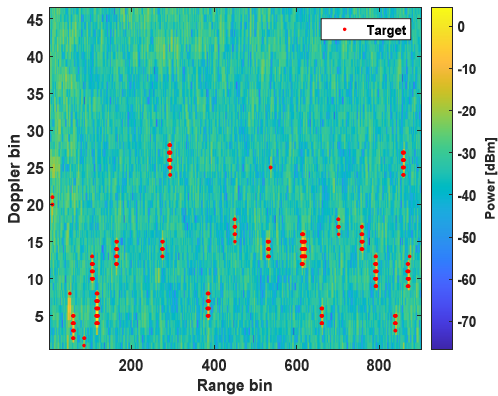


그림 6. 비행시험에서 획득한 거리-도플러 전력 지도
Fig. 6. Range-doppler power map acquired from flight tests

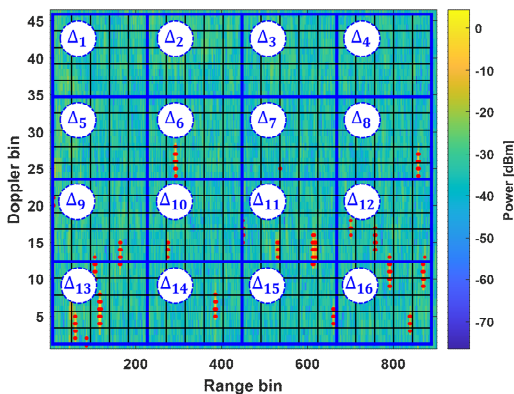


그림 7. 제안한 기법을 적용하기 위한 거리-도플러 전력 지도의 부분화

Fig. 7. Partialization of the range-doppler power map for application of the proposed method

본 논문에서 제안하는 수신 신호 기반 잡음 전력 추정 기법을 적용하기 위해 그림 7과 같이 거리-도플러 전력 지도를 부분화하였다. 부분 영역 16개에서 각각의 평균값 $\overline{X_M}$ 을 계산한 후 식 (3)을 만족하는 셀 $X(i,k)$ 을 제외하였다. 이때 식 (3)에서 조정 가능한 상수 값 β 는 3dB로 설정하였다. 상수 값 β 를 높게 설정할수록 기준치(Threshold)가 상승하며 부분 영역의 평균값이 높아지는 효과가 있어 제외되는 셀의 갯수를 증가시킬 수 있다. 반면 상수 값 β 를 작게 설정할수록 기준치가 평균값에 가까워지게 된다.

그림 8은 식 (3)을 만족하지 않는 셀을 나타낸 것이다. 전체 41,446개의 셀에서 3,066개의 셀이 제외(그림 8에서 노란색 부분)되고, 잡음 추정을 위한 셀은 약 92.6% 잔여한다. 영역을 부분화하여 잡음을 제외한 신호가 전체적으로 제외되었으나 구역별로는 차이가 있었다. 이처럼 구역의 평균이 편차가 있으므로 식 (3)을 만족하는 값만 이용하여 식 (4)처럼 평균을 계산하였다. 그 결과 표적이 포함된 영역은 표적의 영향으로 평균값이 높아지며 표적 위주로 제외된 반면 표적이 포함되지 않은 영역은 신호가 전체적으로 끌고루 제외되었다.

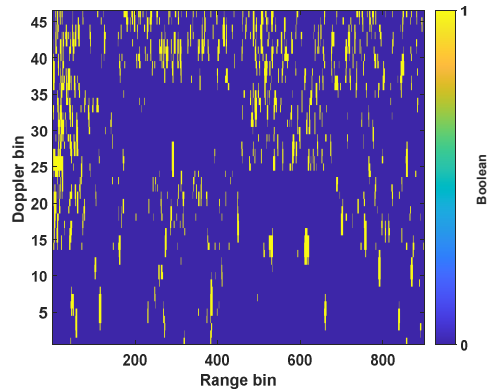


그림 8. 거리-도플러 전력 지도의 부분 영역에서 제외된 셀
Fig. 8. Excluded cells in a partial region of the range-doppler power map

그림 9는 식 (2)의 부분 영역에서의 각각의 평균값(그림 9의 파란색)과 식 (3)을 만족하는 셀을 이용하여 부분 영역에서의 평균값을 재계산(식 (4))한 결과(그림 9의 빨간색)를 비교한 그래프이다. 세기가 큰 신호를 제외함으로써 전체적으로 평균이 낮

아졌고, 특히 6번, 11번, 13번 영역에서 표적 신호가 제외되며 평균이 크게 낮아졌다. 파란색 바 그래프는 거리-도플러 전력 지도에서 평균의 전체적인 경향을 파악할 수 있고, 빨간색 바 그래프는 전체적으로 평균값이 비슷한 수준이 되어 값들이 대체적으로 고루 분포되어 있으므로 이 값을 이용하면 잡음 추정 정확도를 높일 수 있다. 그러나 13번 영역의 데이터는 기존의 평균값을 높이는 원인 셀을 제외하더라도 평균값이 여전히 다소 높게 나타나므로 이러한 문제를 해결하기 위해 식 (5)를 수행하였다.

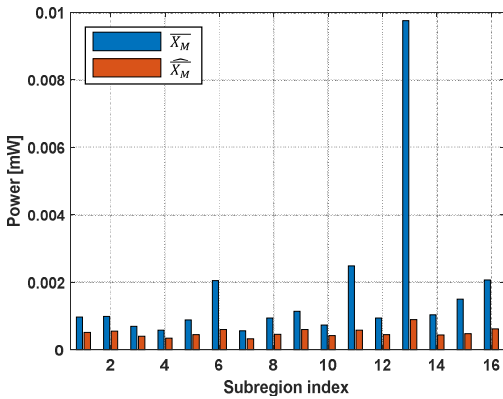


그림 9. 부분 영역에서의 셀 제외 전후 평균값 비교(파란색: 식 (2), 빨간색: 식 (4))

Fig. 9. Comparison of mean values before and after cell exclusion in a partial region(blue: Eq. (2), red: Eq. (4))

보다 정확한 잡음 전력을 추정하기 위해서 계산된 평균값 $\widehat{X}_1, \dots, \widehat{X}_{16}$ 을 크기 순서로 식 (5)와 같이 오름차순으로 정렬하였다. 오름차순으로 정렬된 평균값 $\widehat{X}_{(1)}, \dots, \widehat{X}_{(16)}$ 중 가장 작은 2개와 가장 큰 2개를 제외한 $\widehat{X}_{(3)}, \dots, \widehat{X}_{(14)}$ 에 해당하는 부분 영역들의 셀 값들 중 식 (3)을 만족하는 셀 값들을 이용하여 식 (6)과 같이 잡음 전력 P_n 을 추정하였다. 그 결과 추정된 잡음 전력은 -32.71dBm (0.0005357mW)이다. 기존의 표적 탐지 기법 기반 잡음 전력 추정 기법과 비교한 결과 약 1.49dB 차이가 있었다. 기존의 잡음 전력 추정 기법과 제안하는 잡음 전력 추정 기법의 결과와 오차를 표 2에 요약하였고, 잡음 전력 추정 오차 e 는 식 (7)로 계산하였다.

표 2. 잡음 전력 추정 결과

Table 2. Results of the noise power estimation

	Conventional method	Proposed method
Estimated noise power	$x_c = -31.22\text{dBm}$ (=0.0007545mW)	$x_p = -32.71\text{dBm}$ (=0.0005357mW)
Estimation error(e)	36.70%	2.94%

$$e = \frac{|x - x_t|}{x_t} \times 100, (x = x_c \text{ or } x_p) \quad (7)$$

이때 x_t 는 잡음의 참값, x_c 는 기존 방법을 적용한 잡음 추정 결과, x_p 는 제안한 방법을 적용하여 잡음을 추정한 결과이다. 기존의 표적 탐지 기반 잡음 전력 추정 기법은 약 36.7%의 오차를 나타내어 정확도에 한계가 있었으나, 제안한 기법은 오차를 약 2.94%로 크게 감소시켜 기존 방법 대비 잡음 전력 추정의 정확도가 현저히 향상되었음을 확인할 수 있었다. 이는 제안한 방법이 실제 펄스 도플러 레이다 신호 환경에서도 높은 신뢰성과 우수한 성능을 발휘할 수 있음을 시사하며, 다양한 환경 변화에도 안정적인 성능을 유지할 수 있는 가능성을 보여준다.

V. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 펄스 도플러 레이다 수신 신호를 활용하여 잡음 전력을 실시간으로 추정하는 새로운 기법을 제안하고 이를 연구하였다. 제안된 방법은 기존의 표적 탐지 결과에 의존하는 잡음 전력 추정 기법들이 갖는 근본적인 한계, 즉 표적 탐지 성공 여부에 따라 추정 정확도가 크게 영향을 받는 문제를 효과적으로 개선함을 확인하였다. 이를 통해 잡음 전력 추정의 신뢰성을 높이고, 결과적으로 레이다 시스템의 전체적인 성능 향상에 기여할 수 있음을 입증하였다.

특히, 다중 표적이 존재하는 복잡한 환경에서도 제안 기법은 별도의 표적 탐지 과정을 거치지 않고도 정확한 잡음 전력 추정이 가능하다는 점에서 중요한 장점을 지닌다. 이는 표적 탐지부의 설계 및 구현에 소요되는 비용과 시간을 절감할 수 있게 하며, 더 나아가 시스템의 소형화 및 간소화에도 기여할 수 있다. 잡음 전력 추정의 정확성이 향상됨에

따라 레이더 시스템 전체의 상태 추정 신뢰도 또한 증가하며, 이는 표적 신호의 SNR 산출, 레이더 상태 모니터링, 안정적인 표적 추적, 간섭 및 재밍 신호 감지에 기반한 최적 중심 주파수 선택 등 다양한 응용 분야에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 기대된다.

또한, 본 연구에서는 국내 최초로 항공기 탑재 펄스 도플러 레이더를 활용한 비행시험을 수행함으로써, 실제 환경에서 제안 기법의 적용 가능성과 유효성을 실증하였다. 이는 본 연구의 실질적인 기여도를 높이는 동시에 기존 연구 대비 차별성과 우수성을 확보한 성과로 평가될 수 있다. 향후 과제로는, 제안 기법의 성능을 극대화하기 위한 환경 특성 기반 파라미터 최적화가 요구된다. 이를 위해 다양한 조건과 상황에 대응 가능한 신뢰성 높은 최적화 기법의 개발이 필요하며, 대규모 실험 데이터의 수집과 반복적인 비행시험을 포함한 체계적인 후속 연구가 본 논문의 중요한 향후 과제로 남아 있다.

References

- [1] M. A. Richards, "Fundamentals of Radar Signal Processing", 1st ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2005.
- [2] D. Jeon, Y. Eun, H. Ko, and C. Yeom, "Performance Improvement of Maneuvering Target Tracking with Radar Measurement Noise Estimation", *Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 39, No. 1, pp. 25-32, Jan. 2011. <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2010.39.1.25>.
- [3] X. Bao, H. Chen, and J. Li, "Adaptive Tracking Algorithm with Radar Position Errors and Measurement Noise Covariance Matrix", 2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Kunming, China, pp. 414-419, Nov. 2021. <https://doi.org/10.1109/CCDC52312.2021.9601990>.
- [4] M. Narasimhappa, A. D. Mahindrakar, V. C. Guizilni, M. H. Terra, and S. L. Sabat, "MEMS-Based IMU Drift Minimization: Sage Husa Adaptive Robust Kalman Filtering", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 20, No. 1, pp. 250-260, Jan. 2020. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2941273>.
- [5] I. R. Ivić, C. Curtis, and S. M. Torres, "Radial-Based Noise Power Estimation for Weather Radars", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 30, No. 12, pp. 2737-2753, Dec. 2013. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00008.1>.
- [6] I. R. Ivić, "On the Use of a Radial-Based Noise Power Estimation Technique to Improve Estimates of the Correlation Coefficient on Dual-Polarization Weather Radars", *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 31, No. 9, pp. 1867-1880, Sep. 2014. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00052.1>.
- [7] I. Lee, K. Lee, M. Cho, Y. Park, S. Kim, and K. Kim, "SAR Noise Jamming Performance Evaluation Using SAR-ATR", *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 34, No. 7, pp. 581-590, Jul. 2023. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2023.34.7.581>.
- [8] G. Lee, H. Kim, J. Sung, U. Byoun, J. Kim, and K. Kim, "Simulation and Analysis of Deception and Noise Jamming Effectiveness in the Operating Environments of Aircraft AESA Radar Systems", *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, Vol. 35, No. 12, pp. 1042-1051, Dec. 2024. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2024.35.12.1042>.
- [9] S. Wang, Y. Luo, Y. Zheng, S. Zhongsen, Z. Yu, L. Tian, and J. Zhejun, "Detection and recognition of UAV radio frequency signals based on time-frequency processing and transfer learning with multi-channel input", *SIViP*, Vol. 19, No. 868, Jul. 2025. <https://doi.org/10.1007/s11760-025-04433-9>.
- [10] S. G. Bahnemiri, M. Ponomarenko, and K. Egiastian, "Learning-Based Noise Component Map Estimation for Image Denoising", *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 29, pp. 1407-1411, Apr. 2022. <https://doi.org/10.1109/LSP.2022.3169706>.
- [11] Gukbang News, <https://gukbangnews.com/news/artic>

leView.html?idxno=3601. [accessed: Aug. 12, 2025]

- [12] T. Jeong, S. Y. Kim, H. Ju, and B. Cho, "A Study on the Adaptive Guard Cell-based Target Detection Technique for Airborne Surveillance Radar", Journal of KIIT, Vol. 23, No. 4, pp. 135-143, Apr. 2025. <https://doi.org/10.14801/JKIIT.2025.23.4.135>.
- [13] S. Y. Kim, T. Jeong, and B. Cho, "A Study on Radar Target Detection Techniques based on the MUSIC Algorithm", Journal of KIIT, Vol. 23, No. 7, pp. 97-106, Jul. 2025. <https://doi.org/10.14801/JKIIT.2025.23.7.97>.
- [14] Google Earth Pro V7.3.3.7786. (Date of Original Imagery: Dec. 14, 2015): <https://www.google.com/intl/ko/earth/about/>. [accessed: Aug. 12, 2025]

조 병 래 (Byunglae 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

저자소개

정 태 희 (Taehee Jeong)



2009년 2월 : 한양대학교
전자통신컴퓨터공학부(공학사)
2011년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과(공학석사)
2024년 2월 : 한국과학기술원
전기및전자공학부(공학박사)
2011년 1월 ~ 현재 :

국방과학연구소 선임연구원
관심분야 : 레이더 신호처리, 표적 탐지, 레이더 시스템

김 소 연 (So-Yeon Kim)



2012년 2월 : 세종대학교
지구정보공학과(공학사)
2014년 8월 : 세종대학교
지구정보공학과(공학석사)
2015년 9월 ~ 현재 :
국방과학연구소 선임연구원
관심분야 : 레이더 신호처리,

레이더 시스템