

단일 펄스 LFM 파형에서 표적 속도 추정 방법

Target Velocity Estimation Method Using the Single-Pulse LFM Waveform

김태형 · 박준현 · 박준태 · 박성호 · 유성현 · 강연덕

Tae-Hyung Kim · June-Hyune Park · Joon-Tae Park · Sung-Ho Park · Seong-Hyun Ryu · Yeon-Duk Kang

요 약

펄스 레이더에서 LFM(linear frequency modulation) 파형은 펄스 압축 후에 좋은 도플러 내성과 낮은 부엽 레벨 특성 때문에 많이 사용된다. 반면에 좋은 도플러 내성 때문에 단일 펄스 LFM 파형으로 표적의 도플러 속도를 추출하기가 쉽지 않다. 단일 펄스의 송수신만으로 표적의 거리와 속도 탐지가 가능하다면 여러 임무를 수행해야 하는 다기능 레이더에서는 자원관리 측면에서 이점이 많다. 본 논문에서는 단일 펄스 LFM 파형으로 표적의 속도를 추정하는 방법을 제시한다. 제안한 방법은 LFM 파형의 펄스 압축에서 나타나는 거리-도플러 결합(range-Doppler coupling) 현상과 정합 필터(matched filter)와 신호의 도플러 주파수 불일치에 의한 SNR(signal to noise ratio) 손실 현상을 이용한다. 제안한 방법은 표적의 거리 탐지 후에 추가적인 두 번의 정합 필터링 처리 등을 통해 적은 계산량으로 표적의 속도를 추정할 수 있으며, 시뮬레이션을 통해 그 기능과 성능을 확인하였다.

Abstract

Linear frequency modulation(LFM) waveforms in pulsed radars are extensively used owing to their excellent Doppler tolerance and low side-lobe level characteristics after pulse compressions. On the contrary, it is difficult to determine target Doppler velocity from single-pulse LFM waveforms because of their excellent Doppler tolerance. If it is possible to detect the range and velocity of targets with only single-pulse transmission and reception, multi-function radars can gain advantages in terms of resource management. In this paper, we propose a method of estimating target velocity using single-pulse LFM waveforms. The proposed method uses range-Doppler coupling and signal to noise ratio loss effects due to Doppler frequency inconsistency between the matched filter and signal during pulse compressions. The proposed method can estimate the target velocity from a few computations through two additional matched filtering processes after the target range detection, and its function and performance are verified via simulations.

Key words: LFM Waveforms, Single-Pulse Doppler Estimation, Matched Filter, Pulse Compression, Range-Doppler Coupling

I. 서 론

여러 임무를 수행해야 하는 다기능 레이더에서 단일 펄스의 송수신만으로 표적의 거리와 속도 탐지가 가능하다면 짧은 드웰(dwell) 시간으로 표적의 거리와 속도를 탐

지할 수 있기 때문에 효율적인 자원관리 측면에서 이점이 많다. 여러 개의 가간섭성(coherent) 펄스들을 이용한 속도 탐지는 도플러 분해능 및 클러터 제거 측면에서 유리하지만 짧은 드웰을 형성하기 힘들다. PCM(pulse code modulation) 파형을 이용해 단일 펄스로 거리와 속도를 탐

LIG넥스원(주) (LIG Nex1 Co., Ltd.)

· Manuscript received May, 20, 2020 ; Revised June, 2, 2020 ; Accepted June, 10, 2020. (ID No. 20200520-042)

· Corresponding Author: Tae-Hyung Kim (e-mail: thkim07@gmail.com)

지하는 방법은 있다^[1]. 그러나 PCM 파형은 펄스 압축 후에 신호의 부엽 레벨 특성이 좋지 않고 정합 필터와 표적 신호의 도플러와의 차이에 대한 민감성이 높아 신호의 도플러 값이 커질수록 펄스 압축 후에 주/부엽 특성이 나빠지고, SNR(signal to noise ratio) 손실이 커진다^[2]. LFM(linear frequency modulation) 파형은 펄스 압축 후에 신호의 부엽 레벨이 비교적 낮고, 표적 신호의 도플러에 의해 신호의 주/부엽 특성이 많이 변하지 않는 좋은 도플러 내성 때문에 높은 도플러 속도를 가지는 표적 탐지에도 유리하다^[2]. 반면에 좋은 도플러 내성은 단일 펄스 LFM 파형으로 표적의 도플러 속도를 추정하는 것을 어렵게 한다. LFM 파형에서 속도를 추정하는 기존 연구들은 존재한다^{[3]~[5]}. 참고문헌 [3]은 LFM 파형의 펄스 압축에서 나타나는 거리-도플러 결합(range-Doppler coupling) 현상을 이용한 것이며, 참고문헌 [4]는 정합 필터(matched filter)와 신호의 도플러 주파수와와의 불일치에 의한 SNR 손실 현상을 이용한 것이다. 참고문헌 [3]과 [4]의 방법들은 레이다 반사 신호의 시간 축 영역에서 표적 신호가 있는 부분을 최적으로 추출할 수 있어야 최적으로 동작한다. 그러나 참고문헌 [3]과 [4]에는 최적의 알고리즘 동작을 위한 표적 신호 추출 방법이 기술되지 않아 실제 적용에 제한적이다. 참고문헌 [5]의 방법은 부분적으로 상승 스윕(sweep) 주파수와 하강 스윕 주파수를 가지는 LFM 파형(triangular FM 파형)으로 표적의 도플러를 추출한다. 참고문헌 [5]에서 사용하는 LFM 파형에 의해 펄스 압축 후 표적 신호의 피크(peak)가 표적의 도플러 크기에 따라 동일 크기의 두 개의 피크로 분리되어 나타난다. 시간 축에서 두 개의 피크로 분리된 폭의 크기로부터 표적의 도플러를 구할 수 있다. 그러나 참고문헌 [5]의 방법은 신호의 피크가 두 개로 분리됨으로 신호 피크의 크기에 손실이 발생하며, 여러 표적이 모여 있을 때 한 표적에 대한 한 쌍의 피크를 찾는 과정 등이 필요한 단점이 있다.

본 논문에서는 단위 펄스 LFM 파형으로 표적의 도플러를 추정하는 방법을 제안한다. 제안한 방법은 표적 신호의 도플러를 추정하기 위하여 LFM 파형의 거리-도플러 결합 현상과 정합 필터와 신호의 도플러 주파수와와의 불일치에 의한 SNR 손실현상을 이용한다. 그리고 펄스 압축 외에 추가적인 두 번의 정합 필터링 처리로 표적의

도플러를 추정한다. 제안한 방법의 적용을 위한 표적 탐지 및 표적 신호 추출 방법 등의 과정을 기술하였으며, 시뮬레이션을 통해 제안 방법의 기능과 성능을 확인하였다.

II. 도플러를 가진 LFM 반향 신호의 펄스 압축

레이다에서 송신하는 펄스 LFM 파형은 다음과 같다.

$$x_t(t) = A_t \Pi\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi f_c t + j\pi \frac{\beta}{T_p} \left(t - \frac{T_p}{2}\right)^2\right) \quad (1)$$

여기에서 $x_t(t)$ 는 레이다 송신 신호, T_p 는 펄스 폭, β 는 스윕 주파수 대역폭, f_c 는 송신 주파수, A_t 는 송신 신호 크기, 그리고 $0 \leq t < T_p$ 일 때에 $\Pi(t/T_p) = 1$ 로 이외에는 $\Pi(t/T_p) = 0$ 로 정의한다. R_0 거리에 위치한 표적에 대한 레이다 반향 신호를 수신하여 송신 주파수 성분을 제거한(기저대역) 신호에서 LFM 반향 신호 부분을 추출하여 표현하면 다음과 같다.

$$y_R(t) = B(\theta_r) \Pi\left(\frac{t-\tau}{T_p}\right) \times \exp\left(j2\pi f_d t + j\pi \frac{\beta}{T_p} \left((t-\tau) - \frac{T_p}{2}\right)^2\right) \quad (2)$$

여기에서 $B(\theta_r) = A_r \exp(j\theta_r)$, A_r 는 수신 신호 크기, θ_r 는 신호 위상, $\Pi((t-\tau)/T_p)$ 의 값은 $0 \leq t-\tau < T_p$ 일 때에 1로 이외에는 0으로 정의, $\tau = 2R_0/C$, C 는 광속, f_d 는 수신 신호의 도플러 성분, 그리고 $f_d = 2v_d/\lambda_c$ 로 표현되며, v_d 는 도플러 속도, λ_c 는 송신 파장이다. 수신 신호 $y_R(t)$ 를 기준신호 $\exp(j\pi(\beta/T_p)(t - T_p/2)^2)$ 로 정합 필터링 처리하여 펄스 압축을 수행하는데, 그림 1은 $\beta = 40$ MHz, $T_p = 200 \mu s$ 인 LFM 파형을 이용한 경우에 $v_d = 6,400$ m/s인 표적 반향 신호를 펄스 압축한 결과를 보여준다.

그림 1에서 보듯이 표적 속도가 0 m/s인 경우를 기준으로 했을 때 표적 속도 6,400 m/s인 경우에는 표적 전력 피크 위치가 거리 쪽으로 이동한 것을 볼 수 있다. 표적 피크의 크기도 좀 더 줄어든 것으로 볼 수 있다. 즉, LFM 파형의 펄스 압축에서 거리-도플러 결합에 의한 표적 피크의 거리 이동 현상과 정합 필터와 신호의 도플러 주파수와와의 불일치에 의한 SNR 손실현상을 관찰할 수 있다. 본 논문은 LFM 펄스 압축에서 이런 거리-도플러 결합과 표

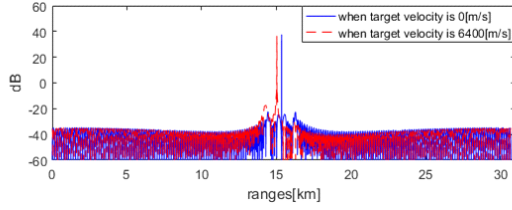


그림 1. 표적 속도에 따른 펄스 압축 결과들
Fig. 1. Pulse compressions according to target velocity.

적 SNR 손실 현상을 이용하여 표적의 도플러 속도를 추출한다. 그림 2는 거리-도플러 결합 현상에 의한 표적 도플러와 표적 피크 이동 거리 관계를 나타낸다. 표적 도플러 f_d 에 의한 표적 피크 이동 거리 Δr 은 $\Delta r = -f_d CT_p / (2\beta)$ 으로 표현할 수 있다^[2]. 표적 피크의 이동 거리의 양으로 표적의 도플러를 탐지한다면 도플러 속도 탐지 해상도 Δv 는 파형의 거리 해상도 및 레이더 신호의 샘플링 주파수 F_s 에 의해 결정되며, 식 (3)과 같다(거리 해상도와 샘플링 주기를 동일하게 설정한 것으로 가정).

$$\Delta v = \frac{2\beta}{CT_p} \frac{C}{2F_s} \frac{\lambda_c}{2} \quad (3)$$

만약 $F_s = 40 \text{ MHz}$, $T_p = 200 \text{ } \mu\text{s}$, $\beta = 40 \text{ MHz}$, $\lambda_c = 0.03$ 이면 $\Delta v = 74.95 \text{ m/s}$ 이며, 이런 속도 탐지 해상도는 너무 낮은 값이다(Δv 는 표적 전력 피크의 한 거리 셀 이동에 해당하는 표적 도플러 속도를 나타낸다.). 식 (3)에서 속도 해상도는 β 에 비해 F_s 와 T_p 의 값이 커진다면 좋아진다는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 LFM 펄스 압축 후에 표적 속도가 0 m/s인 표적 피크를 기준으로 표적 피크의 상대적 이동 거리로부터 표적의 속도를 추출하며, 보간(interpolation)을 통해 추출하는 속도의 해상도를 높인다.

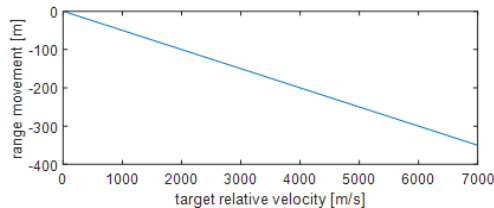


그림 2. 펄스 압축에서 거리-도플러 결합
Fig. 2. Range-Doppler coupling in pulse compression.

III. 단일 LFM 펄스로 표적 속도 탐지 처리 과정 설계

그림 3은 설계한 단일 LFM 펄스로 표적의 도플러 속도를 탐지하는 과정을 나타내었다. 그림 3의 첫 번째 과정은 식 (3)으로 결정되는 속도 탐지 해상도 간격으로 관심 속도 값의 최소치부터 최대치까지에 해당하는 도플러 속도를 포함하는 LFM 파형 신호들을 만들어 일렬로 연결하여 만든 새로운 원형 신호 $C(n)$ 을 만드는 과정이며 처음 한 번만 만들어 계속 사용하면 된다. 신호 $C(n)$ 은 관심 있는 모든 도플러 속도를 포함하는 신호이고, 이 신호를 이용하여 정합 필터링 처리를 하면 시간 축에서 연속한 LFM 신호들 중에서 표적의 속도에 해당하는 LFM 신호 지점에서 최대의 전력 피크가 나타날 것이다. 신호 $C(n)$ 은 시간 축에서 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$C(t) = \sum_{k=-3K}^{3K} \left(\Pi \left(\frac{t - \alpha(k)}{T_p} \right) T_k(t) \right) \quad (4)$$

$$T_k(t) = \exp \left(j2\pi f(k)t + j\pi \frac{\beta}{T_p} \left((t - \alpha(k)) - \frac{T_p}{2} \right)^2 \right)$$

여기에서 $K = \text{ceil}(V_{\max} / \Delta v)$, V_{\max} 는 최대 관심 속도, $\text{ceil}(x)$ 는 x 보다 크고 가까운 정수, $f(k) = (\Delta v / 3) 2k / \lambda_c$, $\alpha(k) = (k + 3K)(T_p + 3K / F_s) + (k + 3K + 1)(K / F_s)$ 이다. 그림 3의 단일 LFM 파형 운영과 레이더 반사 신호 획득 과정은 식 (1)의 신호를 전송하여 식 (2)의 반향 신호를 포함하는 기저대역의 레이더 반사 신호를 획득하는 과정이다. 그 다음으로 일반적인 펄스 압축 등의 레이더 신호 처리를 통해 표적 탐지하여 표적 거리를 추출한다^[2]. 그리고 획득한 한 PRI(pulse repetition interval) 내의 레이더

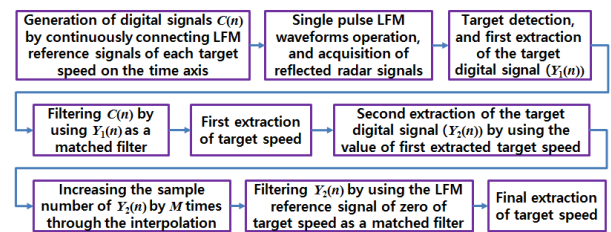


그림 3. 단일 LFM 펄스에 의한 표적 속도 탐지의 흐름
Fig. 3. The processing flow of target velocity detection based on single LFM pulse.

반사 신호에서 표적 거리에 위치해 있는 표적 신호의 디지털 데이터 $Y_1(n)$ 을 추출한다(1차 추출). 표적 디지털 신호 데이터 $Y_1(n)$ 을 추출할 때는 표적의 도플러 속도에 의한 표적 전력 피크의 거리 셀(cell) 이동 현상(거리-도플러 결합 현상)을 고려하여 식 (5)와 같이 한 PRI의 데이터 $R(n)$ 내의 l 의 색인(index) 위치에서 데이터를 취한다.

$$\begin{aligned} Y_1(n) &= R(l), \\ n &\leftarrow [1, 2, \dots, N_p + 2K + 1], \\ l &\leftarrow [N_t - K, N_t - K + 1, \dots, N_t + N_p + K] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 N_t 는 한 PRI 샘플 내에서 탐지된 표적의 전력 피크 위치의 색인 값(한 PRI 내에서 탐지된 표적 위치), $N_p = T_p F_s$ 는 펄스폭에 해당하는 데이터 샘플 수이다. 즉, 표적의 최대 속도 V_{\max} 에 의한 $-K$ 만큼의 표적 전력 피크의 셀 이동과 최저 속도 $-V_{\max}$ 에 의한 K 만큼의 셀 이동을 고려하여 표적의 신호 데이터를 모두 가져올 수 있도록 여유롭게 취하였다. 그림 3에서 다음 과정은 $Y_1(n)$ 을 정합 필터로 해서 $C(n)$ 을 정합 필터링하여 $C(n)$ 을 펄스 압축 처리하는 과정이다. 그림 4는 $C(n)$ 을 펄스 압축 처리한 예이다. 그림 4에 대한 시뮬레이션 변수 값은 $F_s = 40$ MHz, $T_p = 200$ μ s, $\beta = 40$ MHz, $\lambda_c = 0.03$, $V_{\max} = 6,400$ m/s, 표적 속도 3,000 m/s, 그리고 표적 SNR은 43.9 dB이다. 그림 4에는 최대 피크 위치를 검은 점으로 찍어서 거리 색인 위치 X 가 표현되어 있다. 그러면 X 값을 이용하여 식 (6)과 같이 최대 피크 위치에 해당하는 LFM 파형의 도플러 속도를 확인($C(n)$ 에 대한 식 (4)에서 도플러 속도의 색인 값 k 를 이용)하여 1차로 표적 속도 v_1 을 추출할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{\max} &= \text{round}(X/(N_p + 4K)), \quad k = -(3K - I_{\max}), \\ v_1 &= k\Delta v/3 \end{aligned} \quad (6)$$

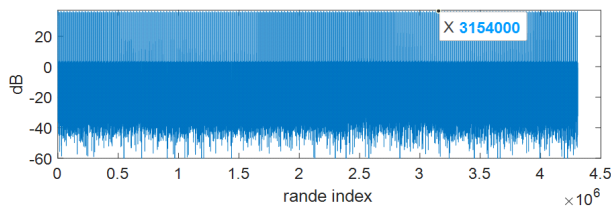


그림 4. $C(n)$ 의 펄스 압축 결과 예

Fig. 4. An example of pulse compression result for $C(n)$.

여기서 $\text{round}(x)$ 는 x 를 반올림한 정수값이다. 그림 4에서 $X=3,154,000$, $K=86$, 그리고 $\Delta v=74.95$ m/s임을 이용하면, $v_1=2,998$ m/s로 1차 표적 속도 값이 구해진다. 이 값은 실제 표적 속도 3,000 m/s에 비해 2 m/s의 오차가 있다. 1차 표적 속도 값 추출에서 어떤 경우에는 최대 37.48 m/s (Δv 의 반)까지 측정오차가 날 수 있다. 이런 표적 속도 측정 오차를 줄이기 위해서 보간 기법을 이용할 것이다. 그림 3에서 1차 표적 속도 추출 값을 이용한 표적 디지털 신호의 2차 추출 과정은 한 PRI 내의 표적 피크 셀 위치와 표적 속도에 의한 거리 셀 이동을 고려하여 레이다 반사 신호에서 표적의 신호 데이터가 있는 영역 부분만을 정확하게 취하는 과정이다. 식 (7)은 식 (6)에서 구한 $-(3K - I_{\max})$ 의 값을 이용한 $Y_2(n)$ 획득을 표현했다.

$$\begin{aligned} q &= \text{round}(-(3K - I_{\max})/3), \quad Y_2(n) = R(l), \\ n &\leftarrow [1, 2, \dots, N_p], \\ l &\leftarrow [N_t + q, N_t + q + 1, \dots, N_t + q + N_p - 1] \end{aligned} \quad (7)$$

이렇게 2차로 취한 표적 신호 데이터 $Y_2(n)$ 을 보간 기법으로 M 배 샘플 수를 증가시킴으로써 탐지 속도 해상도를 증가시킨다. 마찬가지로 M 배 샘플 수를 증가시킨 도플러 속도 0인 LFM 파형 신호 데이터를 정합 필터로 사용하여 M 배 샘플 수를 증가시킨 $Y_2(n)$ 을 정합 필터링 처리를 하여 최종적으로 탐지 속도 해상도가 개선된 표적 속도를 추출하게 된다. 그림 5는 $Y_2(n)$ 추출과 보간법을 통해 개선된 탐지 속도 해상도로 속도를 추출하는 중간 과정의 예이다. 그림 5는 그림 4와 같은 시뮬레이션 변수 상황에서 $M=80$ 배로 보간 후에 펄스 압축하고, 그 펄스 압축 전력 값 결과의 데이터 순서를 $L/2$ 만큼 순환 이동(circularly shifting)하여 최대 전력 피크 위치를 표시한 그림이다. 식 (3)을 이용하면 개선된 속도 탐지 해상도 $\Delta v_M = 0.9369$ m/s이다. 여기서 L 은 그림 5와 같은 펄스 압축 결과의 총 데이터 길이를 나타낸다. 그림 5의 경우의 예는 $L=1,048,576$ 이며, 만약 표적 속도가 0이면 표적 전력 피크는 그림 5의 결과, 상황에서 $L/2=524,288$ 의 색인 위치에 존재하게 된다. 즉, 표적 전력 피크의 색인 값이 $L/2$ 에서 얼마나 이동하였는지의 값으로 표적의 속도를 측정할 수 있다. 그림 5의 경우는 $L/2 - 521,086 = 3,202$ 셀 만큼 전력 피크가 이동하였으며, 속도 $v_2 = 3,202 \times \Delta v_M$ 인

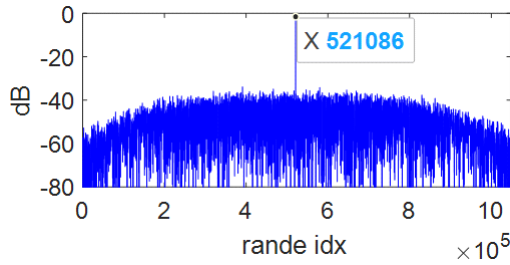


그림 5. 해상도가 증가된 2차 표적 속도 탐지 결과 예
Fig. 5. An example of secondary target velocity detection results with increased resolution.

2,999.8 m/s로 최종적인 표적 속도 값이 추출된다. 실제 표적 속도가 3,000 m/s이므로 1차로 탐지했던 속도 2,998 m/s에 비해 2차의 최종적인 속도 v_2 의 측정 오차가 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

이 장에서는 시뮬레이션을 통해 제안 방법의 기능과 성능을 확인한다. 먼저 그림 6은 다양한 표적 속도에서 제안한 방법으로 표적을 탐지한 결과를 보여준다. 시뮬레이션 조건은 $F_s=40$ MHz, $200 \mu s$, $\beta=40$ MHz, $\lambda_c=0.03$, $V_{\max}=6,400$ m/s, $M=80$ 이다. 그리고 표적 SNR 47.3 dB 및 0 m/s에서 6,400 m/s까지 37 m/s 간격으로 총 173가지의 표적 속도에서 표적 속도를 탐지해 보았다. 그림 6의 x 축은 실제 표적 속도 v_t 를 나타내며, y 축은 제안 방법으로 추정한 속도 v_e 와 실제 표적 속도 v_t 와의 차이 값의 절대치로서 속도 값 추정 오차를 나타낸다. 그림 6에서 보듯이 1차 속도 값 추정에서보다 2차 속도 값 추정에서 추정 오차가 상당히 줄어든 것을 볼 수 있으며, 2차의 최종적인 속도 값 추정에서 추정 오차의 절대치는 1.14 m/s 이하를 유지하는 것을 볼 수 있다(그림 6에서 $\Delta v_M=0.9369$ m/s임).

그림 6에서 1차 속도 추정치의 평균제곱근오차는 21.81 m/s이며, 최종적인(2차) 속도 추정치의 평균제곱근오차는 0.51 m/s이다.

그림 7은 SNR에 따른 표적 속도 탐지 성능을 나타낸다. 그림 7의 시뮬레이션 조건은 표적의 속도와 SNR을

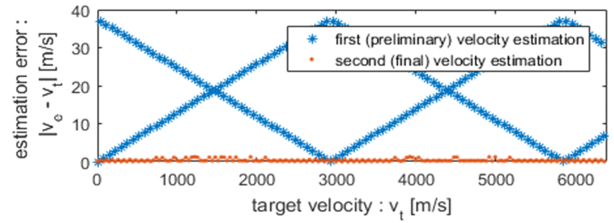
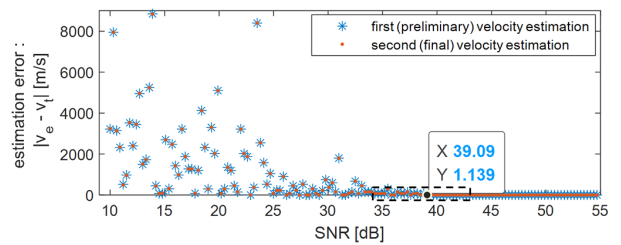
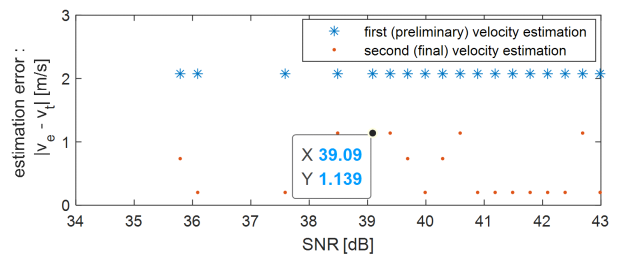


그림 6. 여러 표적 속도에서 속도 탐지 결과
Fig. 6. Results of velocity detection in various target velocities.



(a) SNR에 따른 속도 추정 값 오차
(a) Velocity estimation error according to SNR



(b) 그림 (a)의 점선 사각형 영역을 확대한 그림
(b) Figure of enlarging the dotted rectangular region of (a)

그림 7. SNR에 따른 표적 속도 탐지 결과
Fig. 7. Target velocity detection results according to SNR.

제외하면 그림 6과 같다. 그림 7에서 실제 표적 속도는 3,000 m/s이며, x 축은 표적의 SNR, y 축은 제안 방법으로 추정한 속도 v_e 와 실제 표적 속도 v_t 와의 차이 값의 절대치로서 속도 값 추정 오차를 나타낸다. 그림 7(a)는 표적 SNR 10 dB에서 55 dB까지 일 때의 표적 속도 추정 오차를 나타내며, 추정 오차가 적으면서 계속 안정적으로 추출되기 시작하는 지점을 검은 점으로 표시하고, 그 지점의 SNR과 추정 오차를 표시하였다. 그림 7(a)의 점선 사각형 영역을 확대하여 그림 7(b)에 나타내었다. 그림 7에

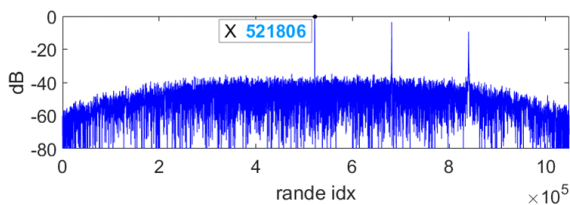
서 보면 표적 SNR이 25 dB 이하인 지점은 표적 속도 추정 오차가 크며, 표적 속도 추정이 안정적이지 않다. 표적 SNR이 25 dB 이상이 되면 표적 속도 추정 오차가 (어떤 한 지점에서 오차가 1,800 m/s인 것을 제외하면) 450 m/s 이하로 계속 떨어진다. 표적 SNR이 31 dB 이상이 되면 표적 속도 추정 오차가 (어떤 두 지점에서 오차가 400 m/s 정도인 것을 제외하면) 73 m/s 이하로 계속 떨어진다. 표적 SNR이 34 dB 이상이 되면 표적 속도 추정 오차가 73 m/s 이하를 계속 유지한다. 그리고 표적 SNR이 39 dB 이상이 되면 표적 속도 추정 오차가 1.14 m/s 이하를 계속 유지한다. 제안한 방법의 특성상 일단 1차 속도 추정이 잘 되어 1차 속도 추정 오차가 $\Delta v = 74.95$ m/s보다 작으면 2차 속도 추정 오차는 1.14 m/s 이하가 됨을 확인하였다. 그림 7에서 보듯이 안정적인 표적 속도 탐지 성능을 보장하기 위해서는 상당히 높은 SNR을 요구한다. 그러나 높은 SNR (39 dB 이상)이 보장되면 표적 속도 탐지 해상도는 아주 좋다.

그림 8은 표적이 밀집되어 표적 신호들이 서로 영향을 미칠 때의 상황을 시뮬레이션하여 표적 속도 탐지 성능을 확인한 결과를 나타낸다. 그림 8(a)의 시뮬레이션 조건

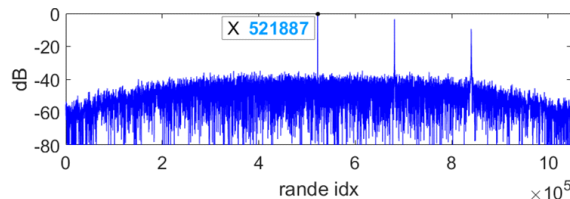
은 표적 SNR, 표적 속도 및 표적의 개수가 3개이며, 서로 밀집되어 있다는 것 외에는 그림 6과 같다. 그림 8(a)는 표적 3개가 파형 펄스폭의 거리 영역 안에 밀집해 존재하여 표적 신호의 한 펄스폭 안에 3개의 표적 신호가 섞여 들어 있는 경우이다. 3개 표적의 속도는 각각 2,250 m/s, 3,000 m/s, 3,750 m/s이며, 표적의 SNR은 각각 43.9 dB, 42.0 dB, 36.0 dB이다. 그림 8(a)의 결과는 속도가 2,250 m/s이고, SNR이 43.9 dB인 표적을 탐지하고, 표적 속도를 추출한 결과를 그림 5와 같은 형식으로 나타낸 것이다. 탐지된 표적 속도는 $(L/2 - 5,218,206)\Delta v_M$ 으로서 2,325.4 m/s이다. 표적의 SNR이 충분하지만 밀집된 다른 표적 신호에 영향을 받아서 표적 속도 추정 오차가 커졌다(75.4 m/s). 표적 속도를 추출하는데 쓰이는 펄스폭 영역의 표적 신호에 SNR이 1.9 dB 밖에 차이가 나지 않는 다른 표적 신호가 같이 섞여 있다. 그림 8(b)의 시뮬레이션 조건은 표적 SNR을 제외하고는 그림 8(a)와 같다. 그림 8(b)에서 표적 SNR은 각각 50.0 dB, 42.0 dB, 36.0 dB이다. 그림 8(b)의 결과는 속도가 2,250 m/s이고, SNR이 50.0 dB인 표적을 탐지 및 속도를 추출한 결과를 그림 8(a)처럼 나타낸 것으로 탐지된 표적 속도는 2,249.5 m/s이다. 펄스폭 영역 안에 다른 표적 신호가 섞여 있지만 약 8 dB 이상의 차이로 탐지하고자 하는 표적 신호의 전력이 다른 신호의 전력보다 높으니 제안한 방법의 정상적인 성능으로 표적 속도가 탐지되었다.

V. 결 론

레이다에서 단일 펄스 LFM 파형을 운영하여 획득한 단일 펄스의 LFM 레이다 반사 신호에서 표적의 속도를 탐지하는 방법을 제시하였다. 제안한 방법으로 표적 속도를 탐지하기 위한 처리 과정의 흐름을 보였으며, 처리 흐름에서 표적 거리 탐지를 위한 정합 필터링 처리 외에 추가적인 2번의 정합 필터링 처리를 하여 표적 속도를 추출하였다. 제안 방법은 표적이 저속 영역에 있는지 고속 영역에 있는지 잘 탐지했으며, 다만 속도 탐지 오차는 본 논문에서 정의한 속도 탐지 해상도에 의해 좌우되었다. 본 논문에서 정의한 속도 탐지 해상도는 펄스 폭 등의 파형 설계 및 샘플링 주파수에 의해 좌우되며, 파형 설계를 통



(a) 탐지 표적과 다른 표적과의 SNR 차이가 크지 않음
(a) SNR difference between detected target and others is not large



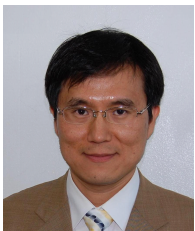
(b) 탐지 표적과 다른 표적과의 SNR 차이가 8 dB 이상임
(b) SNR difference between detected target and others is over 8 dB

그림 8. 밀집한 표적들의 환경에서 표적 속도 탐지 결과
Fig. 8. Target velocity detection results under the condition of densely located targets.

해 속도 탐지 해상도를 높이는 것은 제한이 따르기 때문에 본 논문에서는 LFM 파형의 거리-도플러 결합 현상을 기반으로 보간 기법을 이용해 표적 속도 탐지 해상도를 높였다. 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 표적 속도 탐지 기능과 속도 추정 성능을 확인하였다. 제안한 방법이 최상의 성능을 보이려면 다소 높은 SNR(39 dB 이상)을 요구하였다. 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 1차 표적 속도 추출에서 파형에 의해 결정되는 속도 탐지 해상도 이하의 오차로 표적 속도를 안정적으로 탐지한다면 최종적인 2차 표적 속도 추출에서 적은 오차로 표적 속도를 탐지함을 확인하였다. 제안한 알고리즘의 개선을 위해 낮은 SNR에서도 1차 표적 속도 추출이 안정적으로 이루어지는 방법이 연구되어야 할 것이다. 제안한 방법은 짧은 드웰 시간으로 표적의 거리와 속도를 탐지할 수 있는 파형의 설계를 가능하게 하기 때문에 제한된 시간에 많은 기능을 수행하는 다기능 레이더에 표적 SNR에 따라 알고리즘을 단계적으로 적용하면 이용될 수 있다. 물론 응용 분야마다 단계적 알고리즘 적용 방법이 연구되어야 한다. 그리고 제안한 알고리즘의 현 상황에서 적용하기 적합한 대상 표적은 장거리에서 움직이는 RCS(radar cross sections)가 높은 표적(예를 들면, 장거리 탄도탄)이다. 장거리 표적은 넓은 송신 펄스폭을 원하고, 넓은 송신 펄스폭은 높은 SNR과 좋은 속도 탐지 해상도를 얻게 한다.

김 태 형 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5296-2389>



1999년 3월: 부산대학교 전자공학과 (공학 석사)

2007년 3월: 부산대학교 전자공학과 (공학 박사)

2010년 11월: 국방과학연구소 연구원

2010년 12월~현재: LIG넥스원(주) 레이더연구소 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 시스템, 패턴인식 등

References

- [1] E. Yang, H. Lee, and J. Song, "Maximum likelihood based Doppler estimation and target detection with pulse code modulated waveform," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 12, pp. 1275-1283, Dec. 2014.
- [2] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed. New York, NY, McGraw-Hill, 2008.
- [3] R. Kadlimatti, A. T. Fam, "Doppler detection for linear FM waveform using extended matched filter," in *2016 IEEE Radar Conference(RadarConf)*, Philadelphia, PA, May 2016, pp. 1-5.
- [4] F. Xue, Q. Chen, and Y. Zhang, "A Doppler frequency estimation algorithm based on band mismatch," *IEEE International Conference on Orange Technologies*, Xian, Sep. 2014, pp. 77-80.
- [5] Y. P. Cheng, J. Y. Nieh, "Precise range and Doppler estimation of multi-nonstationary targets by LFM pulse-Doppler radars," in *2018 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications(ICRAMET)*, Serpong, Nov. 2018, pp. 21-26.

박 준 현 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2750-6688>



1996년 2월: 홍익대학교 전자공학과 (공학 석사)

1996년 3월~현재: LIG넥스원(주) 레이더연구소 수석연구원

[주 관심분야] 능동 위상 배열 레이더, 항공기 레이더, 레이더 신호처리 등

박 준 태 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7895-1792>



2011년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)

2011년 3월~현재: LIG넥스원(주) 레이더 연구소 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 시스템, 능동 위상 배열 레이더 등

유 성 현 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0680-2496>



2005년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)

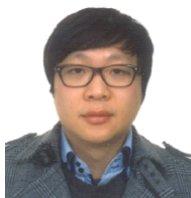
2005년 2월~2008년 3월: LG전자 MC연구소

2008년 4월~현재: LIG넥스원(주) 레이더 연구소 수석연구원

[주 관심분야] 능동위상배열 다기능레이더 시스템 설계/분석, 레이더 모델링&시뮬레이션

박 성 호 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5368-3242>



2006년 3월: 경상대학교 제어계측공학과 (공학사)

2008년 8월: 광주과학기술원 정보통신공학과 (공학석사)

2008년 9월~현재: LIG넥스원 (주) 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더시

스템 M&S 등

강 연 덕 [LIG넥스원/연구위원]

<https://orcid.org/0000-0003-0527-3641>



1993년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)

1996년 2월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학석사)

2000년 8월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학박사)

2000년 9월~현재: LIG넥스원(주) 레이더

연구소 연구위원

[주 관심분야] 레이더 시스템, 초고주파 소자, 전자파 해석 등