

도플러 프로파일 생성을 위한 펄스 반복주파수 지터 보상 성능분석에 대한 연구

이정원^{*,1)} · 황규영¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제3기술연구본부

A Study on the Performance Analysis of Pulse Repetition Frequency Jitter Compensation for Generating Doppler Profile

Jung-Won Lee^{*,1)} · Kyu Young Hwang¹⁾

¹⁾ The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 10 January 2020 / Revised 14 April 2020 / Accepted 24 April 2020)

Abstract

This paper proposes a method on the performance analysis of pulse repetition frequency jitter compensation for generating Doppler profile. Exact phase compensation of each pulse is required to obtain Doppler profiles under pulse repetition frequency jitter. Three parameters such as velocity, pulse repetition frequency, and carrier frequency are examined to cause errors when conducting the pulse repetition frequency jitter compensation, then assuming well-focused Doppler profiles reflect well-conducted pulse repetition frequency jitter compensation, the proposed method in this paper utilizes the contrast to measure how well Doppler profile is generated. These are validated by electromagnetic computation data and computer simulation. Then, it is concluded which parameter is important on the performance analysis of pulse repetition frequency jitter compensation by using the contrast.

Key Words : RADAR(레이더), Pulse Repetition Frequency Jitter(펄스 반복주파수 지터), Doppler Profile(도플러 프로파일), Contrast(대조)

1. 서론

레이더(RADAR)는 전자기파 신호를 송신하고 반사되어 되돌아오는 신호의 크기와 위상을 이용하여 대상 표적의 거리, 각도, 레이더 반사성(RADAR reflectivity)

등을 측정한다. 대상 표적의 탐지는 레이더에서 수신된 반사 신호를 기반으로 하며, 대상 표적으로부터 야기된 반사 신호인지를 판단하기 위한 파워 문턱값(Threshold)을 결정하기 위해 일반적으로 일정 오경보율(CFAR; Constant False Alarm Rate)이 사용된다^{1,2)}. 이러한 탐지 기술을 통하여 목표로 하는 표적을 탐지 및 추적하거나 상황 인지를 하게 된다. 만약 이러한 표적과 그 표적을 둘러싼 상황에 대한 정보를 잘 분

* Corresponding author, E-mail: jungwonlee@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

석할 수 있다면 탐지와 추적에 대한 수행을 더 수월하게 할 수 있게 된다³⁴⁾.

다양한 대함 및 대공 미사일에 대항하는 함정 및 항공기들의 공격 및 방어를 위하여 가장 기본이 되는 것이 어떤 레이더 신호 파형을 사용할 것인지 결정하는 것이다. 레이더 신호의 형태는 크게 지속파(CW; Continuous Wave)와 펄스로 구분할 수 있으며, 펄스 신호는 펄스 반복주기(PRI; Pulse Repetition Interval) 특성에 따라 고정, 스테거, 랜덤(Random) 등으로 구분할 수 있다. 고정 펄스 반복주기는 매번 발생시키는 펄스 반복주기의 값이 변화하지 않고 동일하게 유지되는 펄스 신호이다. 스테거 펄스 반복주기는 일정 주기로 몇 개의 고정 펄스 반복주기가 펄스 단위로 변경시키는 펄스 신호이다. 랜덤 펄스 반복주기는 정해진 특정 기준 펄스 반복주기를 기준으로 정해진 변화폭 내에서 임의로 펄스 반복주기가 변하는 펄스 신호이다. 펄스 반복주파수 지터(PRF jitter; Pulse Repetition Frequency jitter)라고 불리는 이 방식은 펄스의 반복률을 불규칙하게 변화하는 것으로 상대가 펄스주기를 예측하기 어렵기 때문에 전자전 환경에서 많이 사용되는 방법이다⁵⁾.

펄스 반복주파수 지터 신호를 이용하는 시스템의 경우, 상대로 하여금 레이더 신호 파형의 펄스 반복주기 예측을 어렵게 할 수 있는 장점이 있는 반면, 도플러 프로파일을 얻는데 어려움이 있다. 도플러 정보는 레이더와 표적 사이의 상대 속도 및 표적의 개수 등에 대한 정보를 제공한다. 따라서 펄스 반복주파수 지터를 사용하면서 도플러 프로파일을 획득할 수 있다면, 표적과 그 표적을 둘러싼 상황에 대한 정보를 잘 분석할 수 있도록 하여 탐지와 추적에 대한 수행을 더 수월하게 할 수 있게 해준다.

펄스 반복주파수 지터 신호를 수신하여 도플러 프로파일을 얻기 위해서는 정확한 정보를 이용하여 위상을 보정해 주는 것이 중요하다^{16,7)}. 각 펄스의 펄스 반복주파수 등의 값이 어긋나는 만큼 위상 오차가 발생하게 되며, 위상 오차가 존재할 경우 도플러 프로파일이 퍼지는 현상이 발생하여 도플러 정보 획득에 어려움을 야기하게 된다. 이와 같이 펄스 반복주파수 지터 신호를 수신하여 도플러 프로파일을 얻기 위해서는 정확한 위상을 보정해 주는 것이 중요한데, 일정하지 않은 펄스 반복주파수와 관련된 기존 연구들은 펄스 반복 주기를 스테거 또는 랜덤 형식으로 하면서 특정 함수를 보상항으로 추가함으로써 도플러 모호성

또는 거리 모호성을 극복하기 위한 관점에서 연구가 진행되었다^{8,9)}. 현재까지 펄스 반복주파수 지터를 운용하는 시스템에서 펄스 반복주파수 지터 보상에 영향을 줄 수 있는 파라미터 별로 분석한 연구는 되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서는 펄스 반복주파수 지터를 운용하는 시스템에서 펄스 반복주파수 지터 보상에 영향을 줄 수 있는 파라미터를 확인하고, 각 파라미터의 오차에 따른 영향을 시뮬레이션을 통하여 살펴보고자 한다. 각 파라미터의 오차가 도플러 프로파일 생성에 영향을 얼마나 주었는지에 대한 정도를 도플러 프로파일의 퍼진 정도로 측정하며, 이를 위하여 컨트라스트(Contrast)를 사용하여 판단하도록 한다¹⁰⁾. 최종적으로 도플러 프로파일과 컨트라스트 값을 비교하여 레이더 시스템의 펄스 반복주파수 지터 보상 성능 분석을 위한 적절한 컨트라스트 값을 도출하도록 한다.

먼저 2장에서는 펄스 반복주파수 지터 보상에 영향을 줄 수 있는 파라미터를 선정하고, 펄스 반복주파수 지터 보상 정도를 계산하기 위한 측정 수단으로 컨트라스트를 소개한다. 3장에서 보상에 영향을 주는 파라미터들을 분석하기 위한 시뮬레이션을 위한 설정을 소개하고 4장에서는 선별된 파라미터에 따른 펄스 반복주파수 지터 보상에 대한 영향을 분석하고 5장에서 결론을 맺는다.

2. 펄스 반복주파수 지터 보상에 영향을 줄 수 있는 파라미터 선별 및 보상 정도 측정

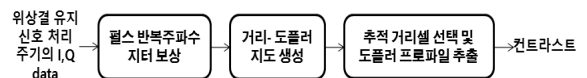


Fig. 1. Block diagram for the performance analysis of pulse repetition frequency jitter compensation

Fig. 1은 펄스 반복주파수 지터 보상의 성능분석을 위한 블록 다이어그램을 보여준다. 1 위상결 유지 신호 처리 주기(CPI; Coherent Processing Interval)의 I, Q 데이터를 받으면 각 펄스 별로 펄스 반복주파수 지터에 대한 보상을 실시한다. 이에 대한 상세내용은 2.1절에 설명되어 있다. 그 다음 거리-도플러 지도(Range-Doppler Map)를 생성한 후, 일정 오경보율을 이용하여 추적 거리셀을 찾아낸다. 해당 거리 셀에서의 도플러

프로파일이 얼마나 잘 생성되었는지, 즉, 펄스 반복주파수 지터 보상이 얼마나 잘 되었는지를 컨트라스트를 이용하여 측정한다. 이러한 측정에 대한 구체적인 설명은 2.2절에 나타내었다.

2.1 펄스 반복주파수 지터 보상에 영향을 줄 수 있는 파라미터 선별

본 절에서는 도플러 프로파일 생성을 위한 펄스 반복주파수 지터 보상에 영향을 줄 수 있는 파라미터를 선별하도록 한다. 레이더에서 표적으로 다음과 같은 펄스 신호를 송신한다고 가정한다.

$$s(t) = A_0 e^{j\theta} \times \text{rect}\left(\frac{t}{\tau}\right) \quad (1)$$

여기에서 $s(t)$ 는 시간 t 에서 송신 신호, A_0 는 신호의 크기, θ 는 송신 신호의 위상, τ 는 펄스 지속시간, rect 는 $t - \frac{\tau}{2} \leq t \leq t + \frac{\tau}{2}$ 의 경우에 1이고 나머지 경우에는 0을 출력하는 함수이다. 그리고 산란점으로부터 반사되어 입력되어 들어오는 수신 신호는 다음과 같다.

$$r_0(t) = A e^{j\theta} e^{-j2\pi f_0 d_0} \times \text{rect}\left(\frac{t-d_0}{\tau}\right) \quad (2)$$

여기에서 A 는 반사된 신호의 크기이고 f_0 는 송신 주파수, d_0 는 레이더와 산란점 사이의 시간 지연이다. 편위상 rect 를 생략하고 식 (2)를 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_1(t) &= A e^{j\theta} e^{-j2\pi f_0 \frac{2R}{C}} \\ &= A e^{j\theta} e^{-j2\pi f_0 \frac{2(R_0+vt)}{C}} \\ &= A e^{j\theta} e^{-j4\pi f_0 \frac{R_0}{C}} e^{-j4\pi f_0 \frac{vt}{C}} \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 R_0 는 레이더와 산란점 사이의 최초 거리, C 는 빛의 속도, v 는 시선각 속도를 의미한다. 식 (3)의 첫 번째 지수함수 성분은 송신 신호의 초기 위상 성분, 두 번째 지수함수 성분은 레이더와 산란점 사이의 최초 시점에서의 거리에 의한 위상 성분이며, 마지막 지수함수 성분은 레이더와 산란점의 위치 변화로 인하여 발생하는 위상 변화 성분이다. 펄스 도플러 레이더에서는 마지막 지수함수 성분을 이용하여 도플러

정보를 추출하게 된다. 펄스 반복주파수 지터에 대한 수식을 유도하기 위해 식 (3)을 샘플링된 식으로 변환하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_2(m) &= A e^{j\theta} e^{-j2\pi f_0 \frac{2(R_0 - vmPRI_{ref})}{C}} \\ &= A e^{j\theta} e^{-j4\pi f_0 \frac{R_0}{C}} e^{j2\pi (f_0 \frac{2v}{C}) m PRI_{ref}} \\ &= A e^{j\theta} e^{-j4\pi f_0 \frac{R_0}{C}} e^{j2\pi f_d m PRI_{ref}} \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 m 은 위상결 유지 처리 주기 동안 M 펄스가 있다고 가정할 때 m 번째 펄스의 인덱스를 나타내며 ($0 \leq m \leq M-1$), PRI_{ref} 는 기준 펄스 반복주기, f_d 는 도플러 주파수를 나타낸다. 만약 펄스 반복주기가 일정하다면, 고속 푸리에 변환(FFT; Fast Fourier Transform)을 이용하여 도플러 프로파일을 얻는데 어려움이 없다. 하지만, 펄스 반복주파수 지터를 운용한다면, 즉, 식 (4)에서 매 펄스마다 고정된 PRI_{ref} 가 아니라 랜덤하게 변하는 펄스 반복주기를 갖는다면 고속 푸리에 변환을 이용하여 도플러 프로파일을 얻기 위해서는 펄스 반복주파수 지터에 의하여 각 펄스마다 펄스 반복주기 차이로 생긴 오차를 보상해야 하며, 펄스 반복주파수 지터가 존재하는 식은 다음과 같이 바뀐다.

$$r_3(m) = A e^{j\theta} e^{-j2\pi f_0 \frac{2(R_0 - v \sum_{k=0}^{m-1} PRI_k)}{C}} \quad (5)$$

여기에서 PRI_k 는 k 번째 펄스의 펄스 반복주기를 의미한다. 본 논문에서는 펄스 반복주파수 지터 보상을 하기 위해 도플러 파형 생성만을 고려하여 수신 신호에 식 (6)와 같이 보상 성분을 적용하여 식 (7)처럼 보상하는 과정을 거쳤다. 즉, 각 펄스 반복 주기에 해당하는 시간 동안 상대 속도에 의하여 움직이는 거리와 관련된 위상값을 보상함으로써 도플러 프로파일에 피크가 나타날 수 있도록 하였다.

$$\widetilde{R}_m = \widetilde{v} \times \left\{ m \times PRI_{ref} - \sum_{k=0}^{m-1} PRI_k \right\} \quad (6)$$

$$r_4(m) = r_3(m) e^{-j4\pi f_0 \frac{\widetilde{R}_m}{C}} \quad (7)$$

여기에서 \tilde{v} 는 시스템에 의해 추정된 시선각 속도를 의미한다. PRR_{ref} 는 제로 도플러에 피크가 생성되는 것을 펄스 반복주파수에 해당하는 주파수에 피크가 생성되도록 하는 역할을 한다. 식 (7)에 식 (6)를 대입하여 정리하면 최종 보상 신호에 대한 식은 다음과 같다.

$$r_4(m) = A e^{j\theta} e^{-j2\pi f_0 \frac{2(R_0 - v \sum_{k=0}^{m-1} PRR_k - \tilde{R}_m)}{C}} \quad (8)$$

$$= A e^{j\theta} e^{-j2\pi f_0 \frac{2(R_0 - (v - \tilde{v}) \sum_{k=0}^{m-1} PRR_k - \tilde{v} m PRR_{ref})}{C}}$$

식 (6) 및 (7)의 보상을 위한 위상정보에서 알 수 있듯이 도플러 프로파일 생성을 위한 펄스 반복주파수 지터 보상에 영향을 줄 수 있는 파라미터는 3가지 존재하는 것을 볼 수 있다. 식 (6)에서 추정된 속도 오차와 각 펄스 반복주기, 식 (7)에서 송신 중심 주파수 오차가 펄스 반복주파수 지터 보상에 영향을 주는 파라미터임을 확인할 수 있다. 3장에서는 이 3가지 파라미터가 어떤 영향을 미치는지 살펴볼 것이다.

2.2 펄스 반복주파수 지터 보상 정도 측정

1차원 신호에 대하여 신호의 퍼진 정도를 측정하기 위한 방법은 여러 가지가 존재하는데, 본 논문에서는 컨트라스트를 사용하였다^[10].

$$Contrast = \frac{\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N |A_i - \mu|^2}}{\mu} \quad (9)$$

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N A_i$$

여기에서 N 은 도플러 프로파일의 셀 개수이며, A_i 는 i 번째 셀의 파워(데시벨)를 의미한다. 컨트라스트는 표준편차와 평균의 비율로 이해할 수 있으며, 피크의 날카로운 정도를 측정하는 역할을 한다.

3. 시뮬레이션 설정

본 논문에서는 간결성을 위해 시선각 방향으로 움직이면서 하나의 산란점으로 구성된 하나의 표적을

가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표적의 초기 거리는 $R1 = 5$ km로 가정하였다. 시선각 속도는 $V0 = 0$ m/s, $V1 = 260$ m/s와 $V2 = 1050$ m/s를 적용하였다. 중심 주파수가 15 GHz인 Ku 밴드 대역을 가정하였으며, 신호 대 잡음비는 35 dB를 설정하였다. 본 논문에서는 펄스 압축을 위해 선형 주파수 모듈레이션(linear frequency modulation)을 사용하였으며, 주파수 대역폭은 4 MHz이다. 빠른 시간축(Fast Time)의 신호처리 샘플링 주기는 6.7 MHz이다. 펄스 반복 주파수는 10 kHz이고 적분 기간 변동이 없는 경우에는 위상결 유지 처리 주기 동안 100개의 펄스를 사용하였다. 펄스 반복주파수 지터는 20 %와 40 %를 적용하였다. 도플러 프로파일 생성 시 চে브레브 윈도우를 사용하였다. 컨트라스트 계산 시, 50회 시험의 결과들을 평균하였다.

Fig. 2와 3은 각각 펄스 반복주파수 지터 보상을 하지 않았을 경우와 정확한 파라미터 값으로 보상을 했을 때의 거리-도플러 지도를 보여준다. 각 펄스 반복주기 차이로 생긴 위상 오차를 보상하지 않으면 Fig. 2처럼 도플러 프로파일이 완전히 도플러 축으로 퍼지는 것을 볼 수 있으며, 오차의 보상을 정확히 할 경우 Fig. 3처럼 도플러 프로파일이 퍼지지 않고 특정주파수에 잘 모이는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2와 3 경우의 표적이 존재하는 거리셀의 도플러 프로파일의 컨트라스트

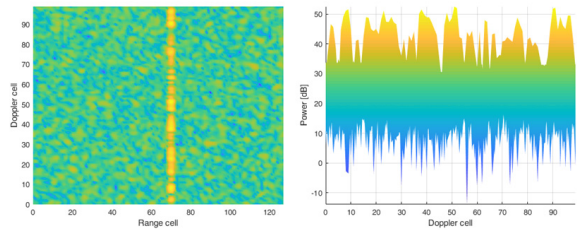


Fig. 2. Range-Doppler map without PRF jitter compensation

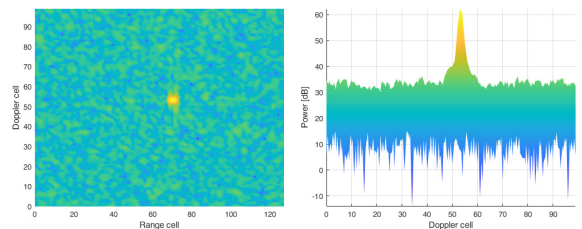


Fig. 3. Range-Doppler map with perfect PRF jitter compensation

트 값은 각각 0.1313와 0.3332이었다. 도플러 프로파일이 잘 모아질수록 컨트라스트 값은 커지고, 반대의 경우에는 값이 작아지는 것을 확인할 수 있다. 사전 시험들을 통하여 도플러 프로파일의 형태를 관찰한 결과, 오차의 보상이 부정확해질수록 피크 모양이 유지가 안 되면서 점점 도플러 축으로 퍼지는 경우들의 컨트라스트 값을 확인하였으며, 컨트라스트가 0.27 이상일 때 도플러 프로파일 생성에 문제가 없을 것이라는 결론을 내렸다. 단, 이 기준과 값은 본 논문의 시뮬레이션 설정에 따른 결과임에 유념해야 한다. 다음 절부터는 각 파라미터 별로 펄스 반복주파수 지터 보상에 어떻게 영향을 주는지 도플러 프로파일의 모양과 컨트라스트 값을 기준으로 살펴보도록 한다.

4. 파라미터에 따른 펄스 반복주파수 지터 보상에 대한 영향

4.1 추정 속도 오차

실제 상대 속도와 추정 상대 속도의 오차를 10 m/s 부터 50 m/s까지 10 m/s 간격으로 시험하였으며, 표적과의 상대속도가 0 m/s, 260 m/s, 1050 m/s인 세 가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 4는 펄스 반복주파수 지터 보상을 하는 과정에서 추정된 상대속도의 오차가 매 펄스마다 일정하게 존재할 경우에 대하여 오차의 정도에 따른 컨트라스트 결과를 나타낸다. Fig. 1의 경우의 컨트라스트 값 및 보상의 잘된 정도를 판단하는 기준인 0.27을 참고치로 그림에 같이 표기하였다(x축에 수평하게 표시됨). 추정 상대속도 오차가 커질수록 컨트라스트 값이 작아지는 것을 볼 수 있다. 펄스 반복주파수 지터 20 %일 때보다 40 %일 때 컨트라스트 값이 더 작으며, 작아지는 폭 또한 더 큰 것을 볼 수 있다. 표적과의 상대속도가 0 m/s, 260 m/s, 1050 m/s 인 경우를 비교하면 서로 거의 차이가 없음을 볼 수 있다. Fig. 5와 6은 상대속도가 1050 m/s, 펄스 반복주파수 지터가 20 %일 때 추정 상대속도 오차가 각각 30 m/s일 경우와 40 m/s인 경우의 거리-도플러 지도의 예시들을 보여준다. Fig. 3과 비교할 때 확실히 도플러 프로파일이 퍼지는 것을 확인할 수 있으며, 속도 오차가 30 m/s일 때보다 40 m/s인 경우가 도플러 프로파일이 더 퍼지는 것을 확인할 수 있다. 이 경우의 컨트라스트 값은 각각 0.2768와 0.2610이었다.

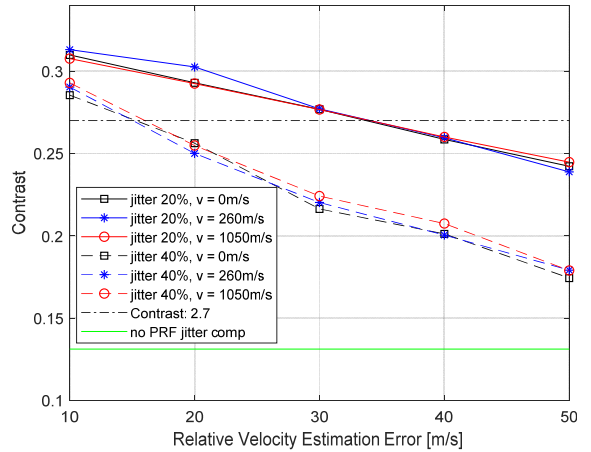


Fig. 4. Contrasts for Doppler profile according to compensation error caused by velocity offset (relative velocity: 0 m/s(black), 260 m/s(blue) and 1050 m/s(red))

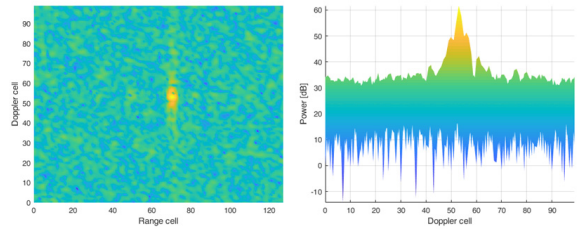


Fig. 5. Range-Doppler map when applying PRF jitter compensation with velocity offset 30 m/s (relative velocity 1050 m/s, PRF jitter 20 %)

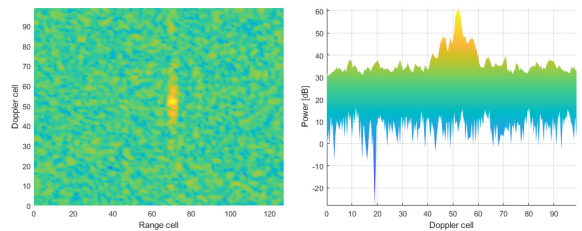


Fig. 6. Range-Doppler map when applying PRF jitter compensation with velocity offset 40 m/s (relative velocity 1050 m/s, PRF jitter 20 %)

4.2 펄스 반복주파수 오차

하드웨어에서 송신된 펄스 반복주파수와 주파수 합성기에서 의도된 펄스 반복주파수 사이에 오차가 생

졌을 경우에 대한 영향을 확인하고자 시뮬레이션을 진행하였다. 본 논문에서는 펄스 반복주파수 오차를 만들기 위하여, 기준 펄스 반복 주파수인 10 kHz를 이용하고자 ± 10 kHz 범위에서 동일 분포(uniform distribution)를 갖는 확률분포함수에서 임의로 하나의 값을 추출하고, 이 값에 오차 비율을 곱함으로써 펄스 반복주파수 오차를 생성하였다. 이를 매 펄스마다 생성하여 펄스 반복주파수 지터 보상 시 적용하였다. Fig. 7은 표적과의 상대속도가 각각 0 m/s, 260 m/s, 1050 m/s인 경우에 대하여 펄스 반복주파수 오차 비율을 0.5 %부터 3 %까지 0.5 % 간격으로 시뮬레이션을 한 결과를 보여준다. 상대속도가 0 m/s 일 때는 식 (8)에서 유추할 수 있듯이 펄스 반복주파수 오차와 상관없이 제로 도플러 성분에만 신호가 잘 생성되어 컨트라스트 값이 높다. 값이 약간씩 변동이 있는 것은 가운시안 분포를 갖는 노이즈가 매 시뮬레이션마다 다르게 생성되기 때문이다. 상대속도가 있을 경우에는 오차 비율이 커질수록 컨트라스트가 작아지는 것을 볼 수 있으며, 표적과의 상대속도가 260 m/s일 때보다 1050 m/s일 때 컨트라스트가 더 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 펄스 반복주파수 지터 20 %일 때보다 40 %일 때 컨트라스트 값이 약간 더 작은 경향을 보인다. Fig. 8과 Fig. 9는 표적과의 상대속도가 1050 m/s, 펄

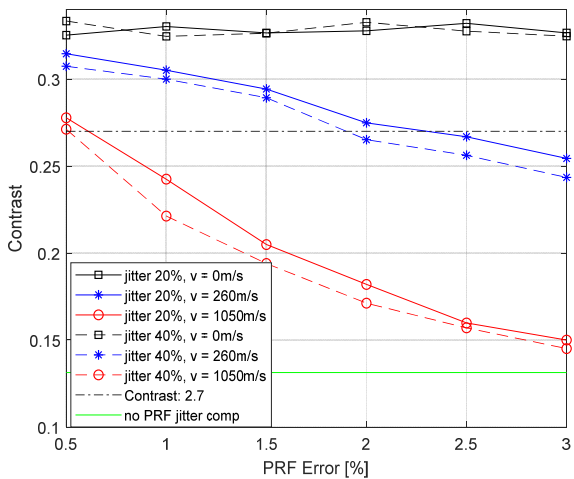


Fig. 7. Contrasts for Doppler profile according to compensation error caused by PRF difference between real PRF and intended PRF(relative velocity: 0 m/s(black), 260 m/s(blue) and 1050 m/s (red))

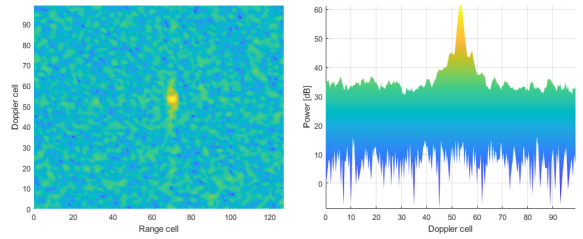


Fig. 8. Range-Doppler map when applying PRF jitter compensation with PRF error 0.5%(relative velocity 1050 m/s, PRF jitter 20 %)

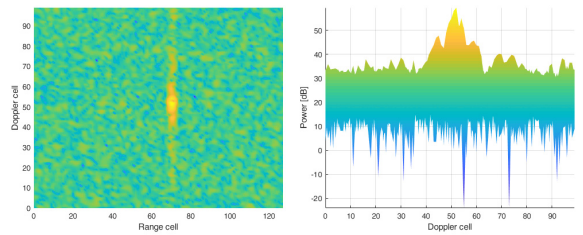


Fig. 9. Range-Doppler map when applying PRF jitter compensation with PRF error 1 %(relative velocity 1050 m/s, PRF jitter 20 %)

스 반복주파수 지터가 20 %일 때 펄스 반복주파수 오차 비율이 각각 0.5 %와 1 %인 경우에 대한 거리-도플러 지도 예시이다. 표적이 존재하는 거리셀에 대하여 각각의 컨트라스트는 0.2898과 0.2461이었다. 펄스 반복주파수 오차 비율이 0.5 %인 경우에는 도플러 축으로 부엽 레벨이 높지 않고 도플러 프로파일이 특정주파수에 모인다고 볼 수 있으나 오차 비율이 1 %인 경우에는 부엽도 상당히 높은 편이면서 도플러 프로파일이 잘 모이지 않는 것을 확인할 수 있다.

4.3 송신 중심 주파수 오차

하드웨어에서 송신된 중심 주파수와 주파수 합성기에서 의도된 중심 주파수 사이에 매 펄스마다 일정하게 오차가 존재할 경우에 대한 영향을 확인하고자 시뮬레이션을 진행하였으며, 표적과의 상대속도가 0 m/s, 260 m/s, 1050 m/s인 세 가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 하였다. Fig. 10은 펄스 반복주파수 지터 보상하는 과정에서 송신 중심 주파수 오차 정도에 따른 컨트라스트 결과를 표적과의 상대속도가 0 m/s, 260 m/s, 1050 m/s인 경우에 대하여 각각 나타낸다. 4.2절에서 처럼, 송신 중심 주파수 오차와 상관없이 제로 도플러

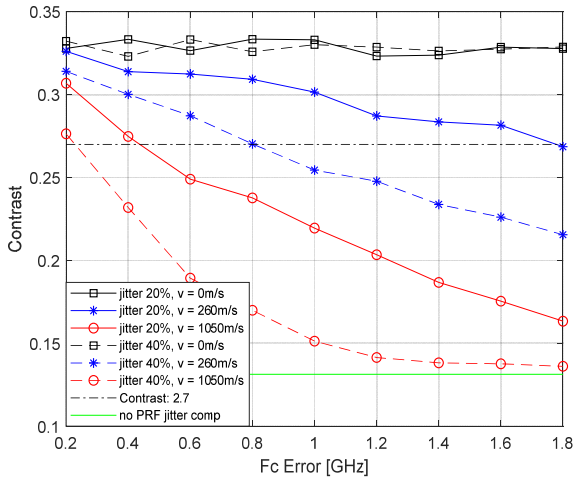


Fig. 10. Contrasts for Doppler profile according to compensation error caused by carrier frequency offset(relative velocity: 0 m/s (black), 260 m/s(blue) and 1050 m/s(red))

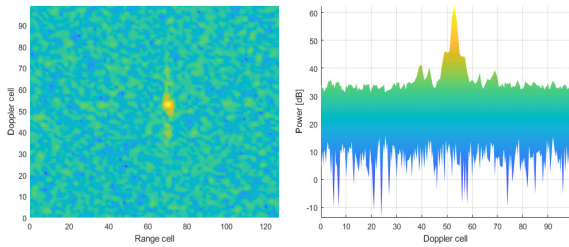


Fig. 11. Range-Doppler map when applying PRF jitter compensation with carrier frequency offset 0.4 GHz(relative velocity 1050 m/s, PRF jitter 20 %)

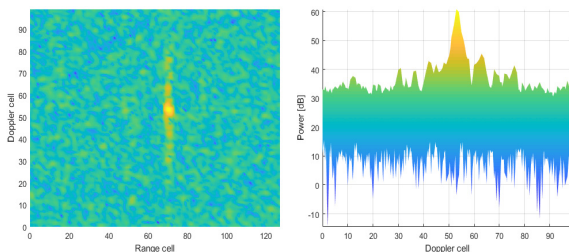


Fig. 12. Range-Doppler map when applying PRF jitter compensation with carrier frequency offset 0.6 GHz(relative velocity 1050 m/s, PRF jitter 20 %)

성분에만 신호가 잘 생성되어 컨트라스트 값이 높다. 그 외 상대속도에서는 송신 중심 주파수 오차가 커질수록 컨트라스트가 작아지는 경향을 볼 수 있다. 또한 표적과의 상대속도가 클수록 같은 송신 중심 주파수 오차에 컨트라스트 값이 작은 것을 확인할 수 있다. 펄스 반복주파수 지터 20 %일 때보다 40 %일 때 컨트라스트 값이 더 작다. Fig. 11 및 12는 표적과의 상대속도가 1050 m/s, 펄스 반복주파수 지터가 20 %일 때 송신 중심 주파수 오차가 각각 0.4 GHz, 0.6 GHz 인 경우에 대한 거리-도플러 지도 예시이다. 표적이 존재하는 거리셀에 대하여 각각의 컨트라스트는 0.2753 과 0.2489이었다. 송신 중심 주파수 오차가 0.4 GHz인 경우보다 0.6 GHz인 경우에 도플러 축으로 부엽 레벨이 높아지는 것을 볼 수 있으며, 도플러 프로파일이 특정주파수에 잘 모이지 않는 것을 확인할 수 있다.

4.4 결과 분석

Table 1은 본 논문에서 설정한 시뮬레이션 설정 환경에서 각 파라미터 별 성능 분석을 바탕으로 결정한 규격 기준을 보여주고 있다. 3장에서 언급한대로 컨트라스트가 0.27 이상일 때 도플러 프로파일 생성에 문제가 없을 것이라는 기준을 바탕으로 결정한 규격이다. 상대속도가 0 m/s일 때에는 펄스 반복주파수 및 송신 중심주파수 오차만 존재 시 제로도플러가 잘 생성되므로 빈 칸으로 두었다. 추정 속도 오차는 상대속도와 상관없이 일정한 경향을 보였으며, 펄스 반복주파수 오차의 경우, 상대 속도에 따라 다른 성능 기준이 필요함을 알 수 있었다. 송신 중심주파수 오차 역시 상대 속도에 따라 다른 성능 기준이 필요하였다. 그리고 펄스 반복주파수 지터의 정도가 커질 경우, 오차 허용범위는 작아졌다. 중요한 점은 본 논문에서 내린 기준은 절대적인 것이 아니라 3장에서 언급한 시뮬레이션 설정에 따라 정한 것이며, 적용하는 시스템 설정 파라미터에 따라 달라질 수 있으므로, 해당 환경에 맞는 설정을 통하여 적절한 기준이 나올 수 있다는 점을 유념해야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 펄스 반복주파수 지터를 운용하는 시스템에서 펄스 반복주파수 지터 보상에 영향을 줄 수 있는 파라미터로서, 실제 상대 속도와 추정 상대

Table 1. Performance requirements of pulse repetition frequency jitter compensation according to PRF jitter and relative velocity

조건 파라미터	펄스 반복주파수 지터 20 %			펄스 반복주파수 지터 40 %		
	v = 0 m/s	v = 260 m/s	v = 1050 m/s	v = 0 m/s	v = 260 m/s	v = 1050 m/s
추정속도 오차 허용범위	< 30 m/s	< 30 m/s	< 30 m/s	< 10 m/s	< 10 m/s	< 10 m/s
펄스 반복주파수 오차 허용범위	-	< 2 %	< 0.5 %	-	< 1.5 %	< 0.5 %
송신 중심주파수 오차 허용범위	-	< 1.6 GHz	< 0.4 GHz	-	< 0.8 GHz	< 0.2 GHz

속도의 오차, 하드웨어에서 송신된 펄스 반복주파수와 주파수 합성기에서 의도된 펄스 반복주파수 사이에 오차, 하드웨어에서 송신된 중심 주파수와 주파수 합성기에서 의도된 중심 주파수 사이의 오차를 선정하였다. 그리고 각 파라미터의 오차에 따른 영향을 시뮬레이션을 통하여 살펴보았다. 본 논문에서는 각 파라미터의 오차가 도플러 프로파일 생성에 영향을 얼마나 주었는지에 대한 판단을 위한 척도로 도플러 프로파일의 퍼진 정도를 측정하기 위하여 컨트라스트를 제안하였으며, 추정 속도 오차, 펄스 반복주파수 오차, 송신 중심주파수 오차에 대하여 컨트라스트가 특정 기준 이상의 값을 가질 때를 기준으로 성능 규격을 설정하였다. 앞서 언급한 대로, 본 논문에서 내린 기준은 절대적인 것이 아니며, 시스템 설정 파라미터 및 환경에 따라 달라질 수 있다. 그럼에도 불구하고 본 논문에서 사용된 방법은 향후 펄스 반복주파수 지터 보상이 필요한 시스템에서 성능 분석하는데 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] M. Skolnik, "Introduction to Radar Systems," 3rd ed., McGraw-Hill, 2002.
- [2] M. A. Richards, J. A. Scheer, and W. A. Holm, "Principles of Modern Radar: Basic Principles," New York, NY, USA: Scitech, 2010.
- [3] S. Liu, M. Liu, P. Li, J. Zhao, Z. Zhu, and X. Wang, "SAR Image Denoising via Sparse Representation in Shearlet Domain based on Continuous Cycle Spinning," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 55, No. 5, pp. 2985-2992, 2017.
- [4] J. Zhang, D. Zhu, and G. Zhang, "Adaptive Compressed Sensing Radar Oriented Toward Cognitive Detection in Dynamic Sparse Target Scene," IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 60, No. 4, pp. 1718-1729, 2012.
- [5] F. Nery, "Introduction to Electronic Defense Systems," SciTech Publishing, 2006.
- [6] J. A. Scheer, and J. L. Kurtz, "Coherent Radar Performance Estimation," Boston: Artech House, 2012.
- [7] J. W. Lee and J. H. Shin, "A Study on Compensatin of PRF Jitter for Doppler Profile," KIMST Annual Conference Proceedings, No. 188, pp. 377-378, 2017.
- [8] A. W. Doerry, "Radar Doppler Processing with Nonuniform PRF," Radar Sensor Technology XXII, Vol. 10633, International Society for Optics and Photonics, 2018.
- [9] L. Vergara-Dominguez, "Analysis of the Digital MTI Filter with Random PRI," IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing), Vol. 140, No. 2, IET Digital Library, 1993.
- [10] F. Berizzi, M. Martorella, A. Cassiamano, and A. Capria, "A Contrast-based Algorithm for Synthetic Range-Profile Motion Compensation," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 46, No. 10, pp. 3053-3062, 2008.