

계단 주파수 레이더에서 이동표적의 고해상도 거리 추정을 위한 코히어런트 펄스열 기반의 속도 추정 및 보상

Coherent Pulse Train Based Velocity Estimation and Compensation for High Resolution Range Profile of Moving Target in Stepped Frequency Radar

심재훈*, 배건성**★

Jae-Hun Sim*, Keun-Sung Bae**★

Abstract

A Stepped Frequency Radar(SFR) is a method of achieving high range resolution by gradually increasing the frequency of a transmitted pulse to create a wide synthetic bandwidth. However, in the case of moving target, accurate range estimation can not be performed due to the range-Doppler coupling phenomenon, so it is necessary to compensate through accurate velocity estimation. In this paper, we propose a stepped frequency radar waveform with a Coherent Pulse Train(CPT), velocity estimation results according to parameters using this method and VMD(Velocity Measurement Data) were compared and analyzed by numerical simulations.

요약

계단 주파수 레이더(Stepped Frequency Radar: SFR)는 송신 펄스의 주파수를 점진적으로 증가시켜 넓은 합성 대역폭을 만들어 높은 거리 해상도를 얻는 방식이다. 그런데 이동표적의 경우 거리-도플러 결합(range-Doppler coupling) 현상으로 정확한 거리 추정을 할 수 없게 되므로 정확한 속도 추정을 통한 보상이 필요하다. 본 논문에서는 코히어런트 펄스열(Coherent Pulse Train: CPT)을 갖는 계단 주파수 레이더 파형을 제안하고, 이를 이용한 속도 추정 및 파라미터에 따른 결과를 기존의 VMD(Velocity Measurement Data) 방식과 시뮬레이션을 통해 비교하고 분석하였다.

Key words : Stepped Frequency Radar, Moving Target, range-Doppler coupling, CPT, VMD

* Hanwha Systems Co., Ltd.

** School of Electronics Engineering, Kyungpook National University

★ Corresponding author

E-mail: ksbae@ee.knu.ac.kr, Tel: +82-53-950-5527

※ Acknowledgment

Manuscript received June. 11, 2018; revised June. 22, 2018 ; accepted June. 25, 2018

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.

I. 서론

계단 주파수 레이더는 N_{SFR} 개 펄스의 송신 주파수를 일정한 크기 Δf 간격으로 단계적으로 증가시켜 넓은 합성대역폭(synthetic bandwidth) 신호를 생성함으로써 표적에 대한 수신신호 처리 시 고해상도의 거리 추정이 가능하다.[1-4,6-9] 그러나 이동표적의 경우 시선 속도(radial velocity)에 의한 도플러 주파수 및 위상의 비선형적 특성으로 인해 거리-도플러 결합 현상이 발생하게 되어 거리 추정 시에 상당한 오차가 발생하게 된다.[1,2,7,8] 따라서 이동표적의 속도 추정을 통한 보상을 위해 수신신호로부터 도플러 영향으로 인한 비선형 위상 특성을 제거하고 도플러 주파수에 선형적인 위상 특성을 추출하는 방법이 제안되었다.[3] 수신신호 처리를 통해 얻은 표적의 레인지 빈(range bin) 샘플 값 $V(m)$ 와 수신신호를 일정한 값으로 지연시킨 신호, $V^*(m+\alpha)$ 와의 곱을 통해 도플러 주파수에 선형적인 위상 특성을 갖는 VMD(Velocity Measurement Data)를 생성하고, 이 신호를 역 푸리에 변환(Inverse Fast Fourier Transform: IFFT)하여 속도를 추정하는 방식이다. 이 VMD 방식은 계산량도 많을뿐더러, 이동표적의 속도 추정 시 송신 주파수 f_0 와는 무관하고 Δf 의 영향을 받으므로 일반적으로 탐지 가능한 최대 속도 범위가 너무 넓어지기 때문에 N -point IFFT로 추정된 속도의 해상도가 저하된다는 단점이 있다.

본 논문에서는 이동표적의 속도 추정 시 속도 추정 정확도를 가지면서 고해상도의 거리 추정이 가능한 코히어런트 펄스열을 갖는 계단 주파수 레이더 파형을 제안한다. 이 방식은 코히어런트 펄스열(CPT)을 계단 주파수 파형의 앞부분에 전송하는 방식으로, 수신신호가 도플러 주파수에 선형적인 위상 특성을 갖게 되므로 먼저 짧은 펄스열을 이용하여 이동표적의 속도를 추정하고, 추정된 속도 값을 이용하여 수신신호 처리가 된 계단 주파수 파형의 거리-도플러 결합 현상을 보상함으로써 이동표적의 정확한 고해상도의 거리 추정을 가능하게 한다. 기존에 제안되었던 VMD 방식과 본 논문에서 제안한 CPT 방식에서 속도 추정 특성 등을 시뮬레이션을 통해 보이고, 제안한 방법의 타당성을 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. I장의 서론에 이어, II장에서는 코히어런트 펄스열을 갖는 SFR에서 송수신 신호 모델링을 통한 이동표적의 속도 추정 관련 수식 유도, 속도 추정 및 도플러 속도 보상 방법을 설명하고, III장에서는 시뮬레이션을 통해 기존의 VMD 방식과 본문에서 제안한 CPT 방식의 속도 관련 파라미터 값 추정 결과를 제시하고, 이동표적에 대한 도플러 속도 보상 적용 전/후의 거리 추정 결과를 비교하였으며, IV장에서는 결론을 맺는다.

II. 코히어런트 펄스열을 갖는 SFR

1. 코히어런트 펄스열을 이용한 속도 추정

코히어런트 펄스열을 갖는 계단 주파수 레이더는 N_{CPT} 개의 코히어런트 펄스열과 N_{SFR} 개의 계단 주파수 파형 펄스열로 구성되며, 이동표적에 대한 속도 추정 시 도플러 주파수에 선형적인 위상 특성을 얻을 수 있는 초기 코히어런트 펄스열을 이용한다. 그림 1은 코히어런트 펄스열을 갖는 계단 주파수 파형의 개념도를 보인 것이다.

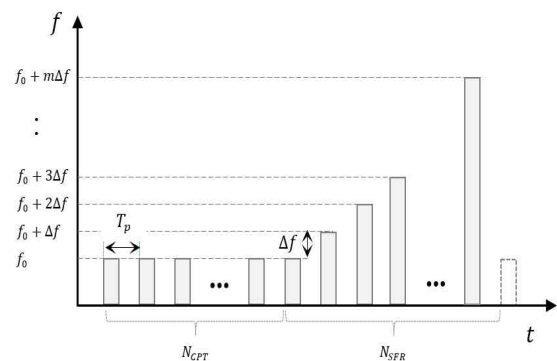


Fig. 1. Stepped Frequency Waveform with CPT
그림 1. 코히어런트 펄스열을 갖는 계단 주파수 파형

여기서 Δf 는 송신 주파수 증가분, T_p 는 펄스 반복 주기(Pulse Repetition Interval: PRI)이다.

코히어런트 펄스열을 갖는 계단 주파수 레이더 신호에서 코히어런트 펄스열의 송신신호는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$x_n(t) = \begin{cases} A e^{j2\pi f_0 t}, & nT_p \leq t \leq nT_p + \tau \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 f_0 는 펄스의 송신 주파수, T_p 는 펄스 반복 주기, n 은 송신 펄스의 번호, τ 는 송신 펄스폭이다. ($n=0, 1, \dots, N_{CPT}-1$)

레이더가 위치한 곳으로부터 거리 R 만큼 떨어진 위치에 있는 정지된 표적으로부터 반사된 수신 신호는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_n(t) = \begin{cases} B e^{j2\pi f_0(t - \frac{2R}{c})}, & nT_p + \frac{2R}{c} \leq t \leq nT_p + \frac{2R}{c} + \tau \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 c 는 전파의 속도($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)이다.

레이더 수신기에서 수신된 신호의 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio: SNR)를 최대로 하기 위한 정합필터(matched filter)에 사용되는 기준 신호는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$r_n(t) = C e^{j2\pi f_0 t}, nT_p \leq t \leq (n+1)T_p \quad (3)$$

따라서 수신기에서 처리되는 신호는 표적으로부터 반사된 수신신호 $y_n(t)$ 와 기준신호 $r_n(t)$ 의 complex conjugate 곱으로 표현할 수 있으며 식 (4)와 같다.

$$v_n(t) = y_n(t) r_n^*(t) \quad (4)$$

$$= \begin{cases} D e^{-j2\pi f_0 \frac{2R}{c}}, & nT_p + \frac{2R}{c} \leq t \leq nT_p + \frac{2R}{c} + \tau \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

일정한 속도를 갖는 이동표적의 속도와 거리 관계식은 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = R_0 - vt \quad (5)$$

여기서 R_0 는 초기 표적거리, v 는 표적의 이동속도, t 는 시간을 나타낸다. ($v > 0$: 레이더로 접근하는 표적, $v < 0$: 레이더로부터 멀어지는 표적)

식 (4) 및 식 (5)를 이용하여 코히어런트 펄스열을 갖는 SFR에서 수신신호의 처리 후에 얻어지는 N_{CPT} 개의 표적 레인지 bin의 샘플 신호 $V(n)$ 은 식 (6)과 같이 표현된다.[4]

$$V(n) = e^{-j2\pi f_0 \frac{2R}{c}} = e^{-j2\pi f_0 \frac{2}{c}(R_0 - vt)} \Big|_{t=nT_p} \quad (6)$$

$$= e^{-j2\pi f_0 \frac{2R_0}{c}} \cdot e^{j2\pi f_0 \frac{2v}{c} n T_p}$$

$$= e^{-j\phi} \cdot e^{j2\pi f_d n T_p}, \quad 0 \leq n \leq N_{CPT}-1$$

여기서 f_d 는 이동표적에 의해 발생하는 도플러 주파수이며, ϕ 는 상수 값이다.

식 (6)에서 도플러 주파수 f_d 는 $V(n)$ 의 푸리에 변환을 통해 구할 수 있는데, 수식 간편화를 위해 $M = N_{CPT}$ 라고 두면 N -point DFT를 구하는 과정은 식 (7)~(9)와 같이 유도된다.

$$\vec{V}(e^{jw}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} V(n) e^{-jwn} \quad (7)$$

$$= \sum_{n=0}^{M-1} e^{-j\phi} \cdot e^{j2\pi f_d n T_p} e^{-jwn}$$

$$= e^{-j\phi} \cdot \sum_{n=0}^{M-1} e^{-jn(w - 2\pi f_d T_p)}$$

$$= e^{-j\phi} \cdot \frac{1 - e^{-jM(w - 2\pi f_d T_p)}}{1 - e^{-j(w - 2\pi f_d T_p)}}$$

$$\vec{V}(k) = V(e^{jw}) \Big|_{w = \frac{2\pi k}{N}}, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (8)$$

$$= e^{-j\phi} \cdot \frac{1 - e^{-jM(w - 2\pi f_d T_p)}}{1 - e^{-j(w - 2\pi f_d T_p)}} \Big|_{w = \frac{2\pi k}{N}, k_d = f_d T_p N}$$

$$= e^{-j\phi} \cdot \frac{1 - e^{-jM \frac{2\pi}{N}(k - k_d)}}{1 - e^{-j \frac{2\pi}{N}(k - k_d)}}$$

$$= e^{-j\phi} e^{-j \frac{\pi}{N}(k - k_d)(M-1)} \cdot \frac{\sin \frac{M\pi}{N}(k - k_d)}{\sin \frac{\pi}{N}(k - k_d)}$$

$$\therefore |\vec{V}(k)| = \left| \frac{\sin \frac{M\pi}{N}(k - k_d)}{\sin \frac{\pi}{N}(k - k_d)} \right|, \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (9)$$

여기서 k 는 DFT 인덱스(index)이며, k_d 는 DFT 최댓값의 인덱스로 이를 이용하여 이동표적의 도플러 주파수 및 속도 값을 구할 수 있다.

2. 신호의 파라미터에 따른 속도 추정 영향 분석

코히어런트 펄스열을 갖는 SFR에서 송신 주파수가 f_0 일 때 이동표적의 도플러 주파수(f_d), 속도(v) 및 추정 가능한 속도 최댓값(V_{max})의 관계는 식 (10)과 같다.[5]

$$f_d = \frac{2v}{c} f_0 \rightarrow v = \frac{cf_d}{2f_0} \tag{10.1}$$

$$f_{d_{max}} = \frac{F_p}{2} \leftarrow F_p = \frac{1}{T_p} \tag{10.2}$$

$$V_{max} = \frac{cf_{d_{max}}}{2f_0} = \frac{cF_p}{4f_0} \tag{10.3}$$

여기서 F_p 는 펄스 반복 주파수(Pulse Repetition Frequency: PRF)를 의미한다.

추정 가능한 도플러 주파수 최댓값은 식 (10.2)에서와 같이 F_p 에 의해 결정되며, 코히어런트 펄스열을 이용한 CPT 방식에서의 추정 가능한 속도 최댓값은 식 (10.3)에서와 같이 $f_{d_{max}}$ 와 f_0 에 의해 결정된다. 반면에 VMD 방식에서는 SFR의 $V(n)$ 으로부터 도플러 주파수에 선형적인 위상 특성을 갖는 성분을 추출하며 f_0 가 아닌 $2\alpha\Delta f$ 에 의해 결정되므로 추정 가능한 속도 최댓값은 식 (11)로 주어지며, $\alpha = \frac{N_{SFR}}{2}$ 값을 취한다.[9]

$$V_{max(VMD)} = \frac{cf_{d_{max}}}{4\alpha\Delta f} = \frac{cF_p}{8\alpha\Delta f} \tag{11}$$

일반적으로 SFR에서 f_0 는 수십 GHz인데 비해 Δf 는 수 MHz 정도의 값이므로 N -point DFT를 이용하여 속도를 추정할 경우, 속도 해상도는 식 (12)로 표현되는데, 식 (10.3)과 식 (11)을 비교하면 $V_{max(VMD)} \gg V_{max}$ 가 되어 CPT 방식이 VMD 방식에 비해 월등히 우수한 속도 해상도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

$$\Delta V_{res} = \frac{2V_{max}}{N} \tag{12.1}$$

$$\Delta V_{res(VMD)} = \frac{2V_{max(VMD)}}{N} \tag{12.2}$$

CPT 방식을 이용한 이동표적에 대한 추정 가능 최대 속도, 속도 해상도, 도플러 주파수 및 속도 추정 값 등을 구하는 과정을 요약하면 그림 2와 같다.

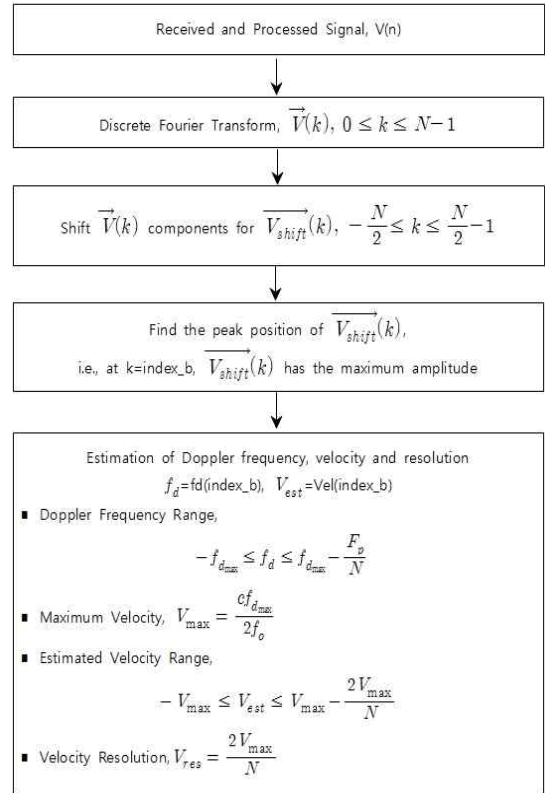


Fig. 2. Velocity estimation procedure for a moving target using CPT method

그림 2. CPT 방식을 사용한 이동표적의 속도 추정 과정

그림 3은 SFR에서 CPT 방식 기반으로 이동표적의 속도 보상 및 정확한 거리 추정 과정을 보인 것이다.

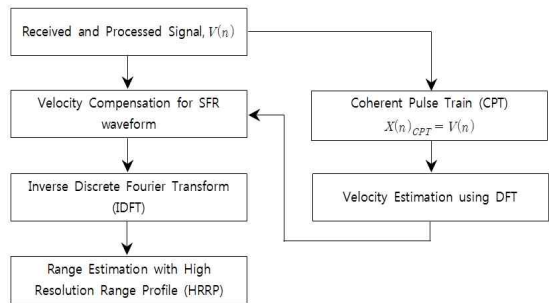


Fig. 3. Range estimation procedure for a moving target using CPT method

그림 3. CPT 방식을 사용한 이동표적의 거리 추정 과정

SFR 수신기에서 초기 코히어런트 펄스열에 CPT 방식을 적용하여 이동표적의 속도를 추정하고,

추정된 속도를 이용하여 계단 주파수 신호에 내재된 도플러 속도를 보상함으로써 거리-도플러 결합이 제거된 광대역 합성대역폭을 만듦으로써 고해상도의 정확한 거리 추정이 가능하다.

III. 실험 및 검토

이동표적에 대한 속도 추정 시 기존의 VMD 방식으로 처리한 속도 추정결과와 본 논문에서 제안한 코히어런트 펄스열을 이용한 CPT 방식으로 처리한 속도 추정결과를 시뮬레이션을 통해 확인하고 최대 속도 범위, 속도 해상도 및 속도 추정 정확도 등의 결과를 비교하였다. 또한 CPT 방식에서 송신주파수 f_o 와 펄스 반복 주파수 F_p 값의 변화에 따른 추정 가능한 최대 속도 범위 V_{max} 를 시뮬레이션을 통해 확인하고 검증하였다.

표 1은 실험에 사용된 파라미터 값을 나타내었다. N_{SFR} 개의 계단 주파수 파형을 갖는 SFR을 가정하고, VMD 방식은 계단 주파수 파형의 N_{SFR} 개 펄스 신호가 모두 속도 추정에 사용되며 CPT 방식에서는 부가적인 8개(N_{CPT})의 코히어런트 펄스열을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 1. SFR parameter values used in the experiments
표 1. 실험에 사용된 SFR 파라미터 값

| Parameters | VMD | CPT |
|---|------------|------------|
| Carrier Frequency (f_o) | 36 GHz | 36 GHz |
| Frequency Step Size (Δf) | 1 MHz | 1 MHz |
| Number of Pulses for SFR (N_{SFR}) | 256 | 256 |
| Pulse Repetition Interval (T_p) | 10 μ s | 10 μ s |
| Pulse Repetition Frequency (F_p) | 100 kHz | 100 kHz |
| Target Range (R) | 250 m | 250 m |
| Target Velocity (v) | +50 m/s | +50 m/s |
| N -point IFFT (N) | 2048 | 2048 |
| Delayed Value (α) for VMD | 128 | - |
| Coherent Pulse Train Length (N_{CPT}) | - | 8 |

실험에 사용된 VMD 및 CPT 각각의 파라미터는 주로 차량용 레이더에서 응용될 수 있는 파라미터 값들을 사용하였다. 예를 들면, 레이더로부터 이격된 표적의 거리는 250 m, 표적의 속도는 +50 m/s (= 180 km/h), 레인지 bin의 크기는 150 m ($R_{bin} = \frac{c}{2\Delta f}$) 등으로 각각 설정하였다.

그림 4는 CPT 방식에서 송신 주파수 f_o 및 펄스 반복 주파수 F_p 값의 변화에 따른 최대 추정 속도 V_{max} 의 관계를 보인 것이다. 펄스 반복 주파수 f_o 가 100 kHz, 송신 주파수 f_o 가 각각 24 GHz, 30 GHz, 36 GHz이면, 탐지 가능한 최대 속도 범위는 각각 312.5 m/s, 250 m/s, 208.3 m/s로 계산됨을 확인할 수 있다. 즉, CPT 방식에서는 추정 가능 최대 속도 범위가 Δf 에 큰 영향을 받는 VMD 방식과는 달리 F_p 와 f_o 를 이용하여 사용 목적에 적합한 최대 속도 범위의 설정이 용이함을 알 수 있다.

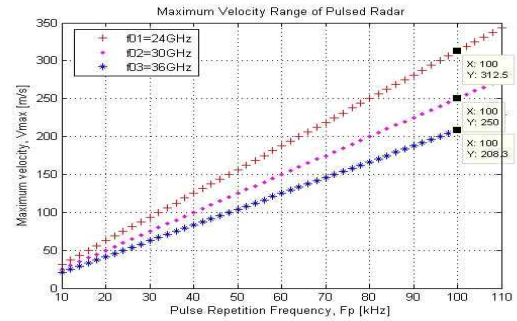
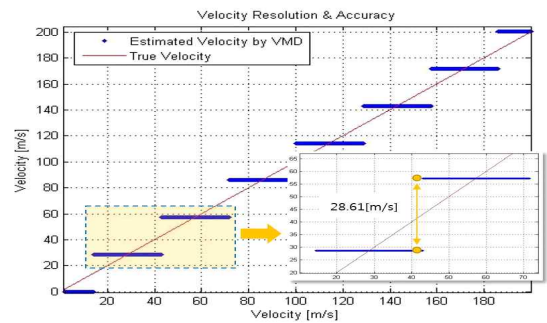
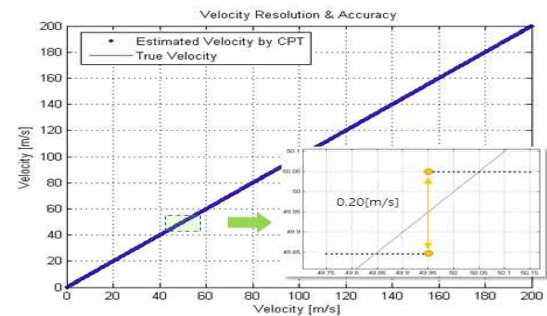


Fig. 4. Maximum velocity range of pulsed radar with CPT
그림 4. 코히어런트 펄스열을 갖는 펄스레이더의 최대 속도

VMD와 CPT 방식의 속도 해상도를 비교한 결과는 그림 5와 같다.



(a)



(b)

Fig. 5. Comparison of velocity resolution for VMD and CPT method (a) VMD (b) CPT

그림 5. VMD 방식과 CPT 방식의 속도 해상도 비교 (a) VMD (b) CPT

그림 5(a)의 VMD 방식에서는 이동표적의 속도 범위가 0~200m/s일 때 속도 해상도는 약 28.61m/s가 된다. 반면에 그림 5(b)의 CPT 방식에서는 속도 해상도가 0.2m/s로 아주 우수한 특성을 보임을 볼 수 있다.

그림 6에 두 방식의 속도 추정 결과를 각각 나타내었다.

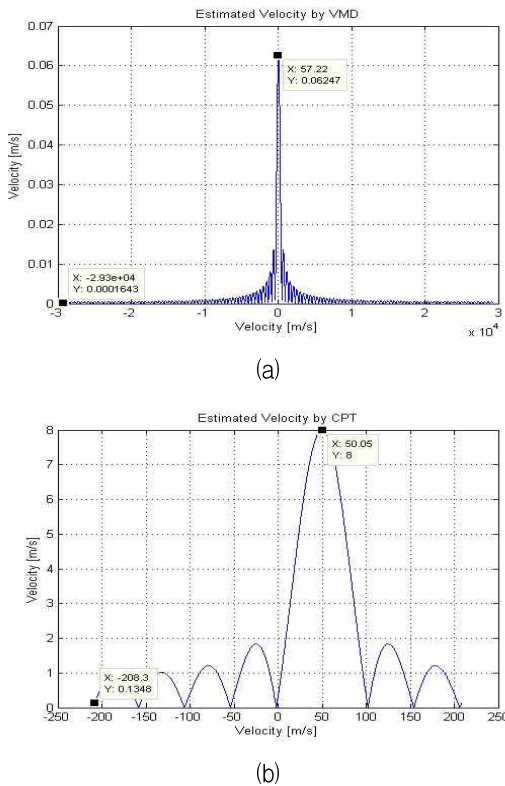


Fig. 6. Comparison of estimated velocity for VMD and CPT method (a) VMD (b) CPT

그림 6. VMD와 CPT의 속도 추정 값 비교

그림 6(a)는 이동표적의 속도가 +50m/s 일 때 VMD 방식으로 속도를 추정한 결과이다. 이때 x-축의 최대 속도 추정 범위는 약 ±29,300m/s, 속도 추정 값은 약 57.22m/s 이다. 그림 6(b)는 동일 조건에서 CPT 방식으로 추정한 결과이다. 최대 속도 범위는 약 ±208.3m/s, 속도 추정 값은 약 50.05m/s 이다.

시뮬레이션 결과에서와 같이 CPT 방식이 VMD 방식에 비해 상대적으로 높은 속도 정확도를 얻을

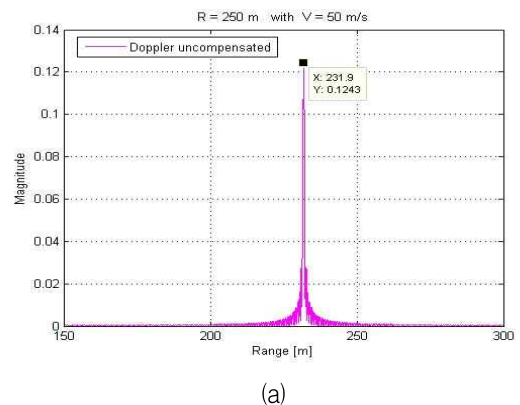
수 있음을 확인하였다. 이동표적의 속도 추정 시 VMD 및 CPT 방식을 각각 사용하여 실험한 속도 파라미터 추정 결과를 요약하면 표 2와 같다.

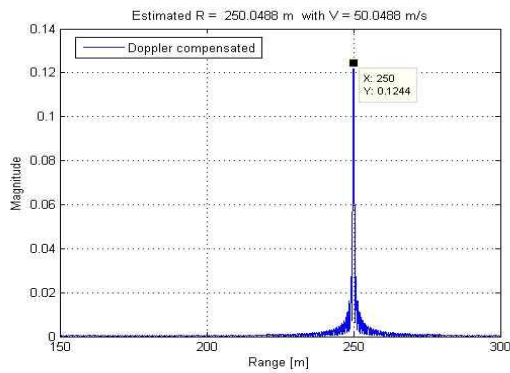
Table 2. Velocity estimation results of VMD and CPT
표 2. VMD와 CPT의 속도 추정 실험결과

| Parameters | VMD | CPT |
|---------------------------------------|------------|------------|
| Max. Doppler Frequency, $f_{d_{max}}$ | 50kHz | 50kHz |
| Max. Velocity, V_{max} | 29,297 m/s | 208.33 m/s |
| Velocity Resolution, V_{res} | 28.61 m/s | 0.20 m/s |
| Estimated Velocity, V_{est} | 57.22 m/s | 50.05 m/s |

실험 결과에서와 같이 두 방식은 속도 해상도, 최대 속도 범위 및 속도 추정 값에서 큰 차이를 보였다. 그 이유는 VMD 방식은 수신신호 $V(m)$ 와 수신신호를 일정한 값으로 지연시킨 $V^*(m+\alpha)$ 와의 곱을 통해 얻어지는 도플러 주파수에 선형 위상특성을 갖는 $2\alpha\Delta f$ 를 구하고 이 값에 의해 최대 속도, 속도 해상도 및 속도 추정 값 등을 구하는 반면에 CPT 방식은 그림 2와 같이 수신신호의 코히어런트 펄스열에서 최대값 인덱스를 구하고 그 구해진 값을 속도 범위 영역에 매핑하여 속도를 추정하며 펄스 반복 주파수 F_p 및 송신주파수 f_0 에 의해 속도 파라미터 값이 결정되기 때문이다.

그림 7은 SFR에서 이동표적의 거리 추정 결과와 CPT 방식으로 속도 보상을 한 후의 거리 추정 결과를 보인 것이다. 그림 7(a)에서는 도플러-거리 결합으로 거리 추정 결과가 모호해지는 현상을 보이는 반면에, CPT 기반으로 속도 보상을 적용한 그림 7(b)에서는 이동표적에 대해 고해상도를 갖는 정확한 거리 추정이 이루어짐을 볼 수 있다.





(b)

Fig. 7. Results of estimated range of a moving target (a) Before velocity compensation (b) After velocity compensation with CPT method

그림 7. 이동표적의 거리 추정 결과 (a) 속도 보상 적용 전, (b) CPT 기반의 속도 보상 적용 후

IV. 결론

SFR 레이더에서 이동표적의 속도 추정을 통해 고해상도의 정확한 거리 추정이 용이한 초기 코히어런트 펄스열을 갖는 계단 주파수 파형을 제안하였다. 제안한 CPT 방식을 이용한 속도 추정 과정을 유도하고, 그 특성을 기존의 VMD 방식과 비교하여 그 우수성을 실험을 통해 검증하였다. 또한 CPT 방식의 속도 추정 및 보상을 통해 거리-도플러 결합 영향을 제거하고, 이동표적의 정확한 거리 검출이 가능함을 보였다.

References

[1] Yimin Liu, Tianyao Huang, Huadong Meng, XiqinWang, "Fundamental Limits of HRR Profiling and Velocity Compensation for Stepped-Frequency Waveforms," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 62, No.17, pp. 4490-4504, 2014.DOI:10.1109/TSP.2014.2337279

[2] Gang Li, "Range and Velocity Estimation of Moving Targets Using Multiple Stepped frequency Pulse Trains," *Sensors* 2008, pp. 1343-1350, 2008.DOI:10.3390/s8021343

[3] Teruyuki Hara, Takashi Sekiguchi, "Doppler Frequency Tolerant Synthetic Bandwidth Radar," *2006 International Radar Symposium*, 2006.

[4] Donald R. Wehner, "*High Resolution Radar*," Artech House, MA, 1987.

[5] Mark A. Richards, "Fundamentals of Radar Signal Processing," Second Edition, McGraw-Hill, New York, 2014.

[6] Venceslav Kafedziski, "Implementation of a High Resolution Stepped Frequency Radar on a USRP," *TELSIKS* 2017, pp.236-239, 2017.DOI:10.1109/TELSIKS.2017.8246271

[7] Thomas Feuillen, Achraf Mallat and Luc Vandendorpe, "Stepped Frequency Radar for Automotive Application: Range-Doppler Coupling and Distortions Analysis," *Milcom 2016 Track 1, -Waveforms and Signal Processing*, 2016.

[8] Caiyong Lin, Qinglong Bao, Dinghe Wang, Ruiqi Tian, Zengping Chen, "Target Detecting Method for Passive Bistatic Radar Using Stepped-Frequency Radar as the Transmitter," *Proceedings of the 13th European Radar Conference, London, UK*, pp.294-297, 2016.

[9] J. H. Sim and K. S. Bae, "A Study on the Method of Moving Target Velocity Estimation through Doppler Analysis in Stepped Frequency Radar," *2017 IEIE Academic Symposium*, pp. 21-22, 2017.

BIOGRAPHY

Jae-Hun Sim (Member)



2002 : BS degree in Electronics Engineering, Kumoh National Institute of Technology.
2009 : MS degree in Electronics Engineering, Kyungpook National University.
2015~ : Research Engineer, Hanwha Systems.

Keun-Sung Bae (Member)



1977 : BS degree in Electronics Engineering, Seoul National University.
1979 : MS degree in Electrical Engineering, KAIST.
1989 : PhD degree in Electrical Engineering, University of Florida.
1979~ : Professor, School of Electronics Engineering, Kyungpook National University.