

바이스태틱 레이더에서 Range Walk이 보상된 Squint Cross-Range 도플러 프로세싱

Range Walk Compensated Squint Cross-Range Doppler Processing in Bistatic Radar

윤재혁 · 김관수 · 양훈기* · 정용식* · 이원우** · 배경빈***

Jae-Hyuk Youn · Kwan-Soo Kim · Hoon-Gee Yang* · Yong-Seek Chung* ·
Won-Woo Lee** · Kyung-Bin Bac***

요 약

고속의 이동 표적을 탐지하는 경우, 특히 송수신부가 독립적으로 이동하는 바이스태틱 레이더의 경우 표적 신호의 레인지 워크(range walk)는 도플러 프로세싱(Doppler processing) 및 표적 탐지를 어렵게 한다. 본 논문에서는 표적 신호에 레인지 워크가 있는 경우 우선 레인지(range) 방향 인터플레이션(interpolation)을 수행해서 일정한 시간간격으로 샘플링된 표적 성분이 있는 레인지 빈(range bin)을 추출하고, 이어서 도플러 프로세싱을 통한 도플러 정보 추출 알고리즘을 제시한다. 이를 위해 바이스태틱 레이더 환경을 가정하고, 펄스 압축에 의해 레인지 프로세싱 과정을 포함한 도플러 프로세싱 과정을 이론적으로 설명한 후 시뮬레이션을 통하여 제시된 방식의 타당성을 보인다.

Abstract

Range walk has been a major problem in achieving correct Doppler processing. This frequently occurs when range variation is severe just like in a bistatic radar or in high speed target scenario. This paper presents a range walk compensated range-Doppler processing algorithm applicable to the bistatic radar. In order for the compensation, a range-domain interpolation is applied for range compressed signal so that Doppler processing is performed along the evenly time-spaced range bins that contain target returns. Under a bistatic radar scenario, the proposed algorithm including a range domain pulse compression is mathematically described. Finally, the validity of the algorithm is demonstrated by simulation results showing the superiority of a SCDP(Squint Cross-range Doppler Processing) over an uncompensated Doppler processing.

Key words : Bistatic Radar, Detection, Range Walk, Squint Cross-Range Doppler Processing, Nyquist Interpolation

I. 서 론

레이더 시스템은 탐지를 위해 요구되는 SNR(Signal-to-Noise Ratio)을 만족시키기 위해서 CPI(Cohe-

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소 기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었음.」

광운대학교 전자공학과(Department of Wireless Communications Engineering, Kwangwoon University)

*광운대학교 전자융합공학과(Department of Electronics Convergence Engineering, Kwangwoon University)

**육군사관학교 전자정보학과(Department of Electronics & Information Engineering, Korea Military Academy)

***국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20111005-117

· 교신저자 : 양훈기(e-mail : hgyang@kw.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2011년 11월 4일

rent Processing Interval) 구간에서 다수의 펄스를 수신하고, 각 PRI로부터 동일한 레인지 bin의 샘플 값을 적분한다^[1]. 그러나 표적이 고속으로 이동하거나 바이스태틱 레이더처럼 송, 수신부가 독립적으로 이동하는 경우 CPI 구간 동안 레인지 워크가 발생하게 되어 이를 고려하지 않고 CDP(Cross-range Doppler Processing)하게 되면 정확한 도플러 주파수의 추정도 어렵고 코히어런트 탐지 성능의 열화가 따른다^[2].

이러한 문제를 해결하기 위하여 가속도가 있는 표적 신호와 순간적인 간섭신호의 구별을 가능하게 하는 Wigner-Ville 분포를 이용하여 표적의 순간 도플러 주파수를 검출하는 기법^[3], 코릴레이션에 의한 range-alignment 방법^[4], 이미지 프로세싱의 한 기법인 Hough 변환을 이용하여 다차원 데이터 맵으로부터 탐지 및 추적 성능을 향상하는 기법^{[5],[6]}, adaptive chirplet 변환을 이용하여 탐지 성능을 높이는 연구^[7] 등이 진행되었다.

본 논문에서는 바이스태틱 레이더 환경에서 고속 표적에 의해 레인지 워크가 발생하는 경우, 특히 SNR이 낮아 펄스 에너지로 레인지 워크 보상이 안 되는 경우 레인지 bin 데이터를 alignment하지 않고 레인지 방향 인터플레이션을 통하여 고속으로 도플러 주파수를 추정하는 기법을 제시한다.

II. 바이스태틱 레이더의 레인지-도플러 프로세싱

송신기와 표적까지의 거리가 R_t , 수신기와 표적까지의 거리가 R_r 인 바이스태틱 레이더 시스템에서 송신 레이더는 표적 및 수신 레이더에 동시에 펄스를 송신하며, 수신 레이더는 LOS 성분과 표적에 산란된 신호를 수신하게 된다. 수신 레이더는 펄스 압축 과정을 거쳐서 상대적으로 진폭이 큰 LOS 성분을 검출하고, 이 신호가 레인지 bin의 기준이 되어 표적으로부터 산란된 신호에 대해 펄스 압축을 진행한다.

송신 펄스로 LFM(Linear Frequency Modulation) 신호를 송신하는 경우, 첫 번째 펄스가 표적에 산란되어 수신되는 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r_1(t) = \frac{1}{R_t R_r} \text{rect}\left(\frac{t - \frac{R(t)}{c}}{\tau_0}\right) \times \exp\left[j2\pi f_d \left(t - \frac{R(t)}{c}\right) + \pi\alpha \left(t - \frac{R(t)}{c}\right)^2\right] \quad (1)$$

여기서 $R(t) = R_0 - vt$ 로서 R_0 는 최초 표적의 $R_t + R_r$ 값이며, v 는 CPI 동안 일정하다고 가정하자. 식 (1)의 수신 신호는 직교 수신기(quadrature receiver)를 통과하여 기저 대역 신호로 변환되고 이어서 정합 필터(matched filter)를 통과함으로써 펄스 압축된다. 정합 필터의 임펄스 응답 $h(t)$ 는 $h(t) = \text{rect}(t/\tau_0) \exp[-j\pi\alpha t^2]$ 이므로 정합 필터의 출력은 다음과 같다^[8].

$$s(t) = r_1(t) * h(t) \approx \frac{\tau_0}{R_t R_r} \exp[j2\pi f_d R_0] \exp[-j2\pi f_d t] \times \text{sinc}\left(\alpha\tau_0 \left(t - \frac{R(t)}{c}\right)\right) \quad (2)$$

여기서 f_d 는 $f_d = f_c \cdot v/c$ 로 표현되는 도플러 주파수이다. 레인지 워크가 무시될 정도의 환경에서는 펄스 압축된 신호의 피크 위치가 각 PRI에서 동일한 레인지 bin에 위치하게 되어 레인지 bin에서 샘플된 신호의 진폭 성분(식 (2)에서 $\text{sinc}(\)$ 함수)은 상수로 가정할 수 있다. 그러므로 식 (2)를 cross-range 방향으로 푸리에 변환, 즉 도플러 프로세싱을 하면 $\text{sinc}(\beta(f - f_d))$ 가 되어 도플러 주파수 f_d 를 추정할 수 있다. 여기서 β 는 CPI 구간에 따라 정의되는 상수로 CPI 구간이 무한정 큰 경우, 도플러 프로세싱 결과는 (상수) $\times \delta(f - f_d)$ 가 된다.

III. 레인지 워크 보상 알고리즘

수신 신호에 레인지 워크가 발생하게 되면 동일한 레인지 bin의 샘플 값의 진폭 즉, 식 (2)의 $\text{sinc}(\)$ 함수가 상수가 아니며 또한 표적 성분이 포함되지 않은 레인지 bin이 존재해서 f_d 검출이 어렵다. 이를 해결하기 위해 제안하는 레인지 워크 보상 알고리즘은 다음과 같다.

첫째로 레인지 워크 범위를 구한다. 이를 위해서는 각각의 레인지 bin에 대해서 cross-range 방향으로 푸리에 변환을 하고, 각 푸리에 변환의 최댓값으로

부터 에너지가 큰 영역을 정한다. 이는 표적 성분이 있는 레인지 bin의 경우 표적의 도플러 주파수 성분에 해당하는 위치에 에너지가 집중할 것이므로 특정 레인지 bin에서의 에너지가 큰 반면, 잡음만 있는 레인지 bin의 경우 푸리에 변환을 하면 전 구간에 균등하게 분포하게 되어 표적 성분 유무 판단이 가능하다.

둘째로 표적 성분이 존재할 위치를 정한다. 만약 레인지 워크 범위가 $m\Delta t$ (Δt : 레인지 gate)이고, CPI 내에 PRI가 n 번 존재한다고 하자. 첫 번째 PRI의 표적 성분 위치가 t_1 이라면 두 번째 PRI의 표적 성분 위치 t_2 는 $t_2 = t_1 + m\Delta t/n$ 의 관계가 있다.

셋째로 레인지 방향으로 샘플 값들은 이미 레인지 bin에 의해서 주어져 있으므로 이들 값들을 이용하여 위에서 얻은 표적 위치 값을 인터플레이션하여 구한다. 여기서 샘플 값들은 복소수 값을 가지므로 실수부, 허수부로 분리해서 각각 인터플레이션한 후 다시 합쳐서 복소 인터플레이션 값을 얻는다.

넷째로 인터플레이션하여 얻어진 샘플 값들에 대해서 푸리에 변환하여 도플러 프로세싱을 한다. 이 경우 인터플레이션된 샘플 값들은 정확한 cross-range가 아닌 squint cross-range 방향에 위치하게 되며, 각 샘플들은 $m\Delta t/n + \text{PRI}$ 만큼 동일한 시간 간격으로 떨어져 있게 된다.

만약 레인지 워크의 구간을 추정하는 과정에서 잡음이 많아 CDP를 통한 신호 검출이 되지 않을 경우, 적당한 윈도우(window)를 취하여 특정 레인지 bin의 범위에서만 레인지 인터플레이션을 하고, 해당 샘플 값들을 이용하여 SCDP한다. 신호 성분이 있는 경우는 도플러 정보로 인한 큰 성분이 얻어지므로 윈도우의 위치를 변경함으로써 신호가 존재하는 레인지 bin의 위치를 추정할 수 있고, 윈도우의 크기를 변경함으로써 레인지 워크의 범위 또한 추정이 가능하다.

IV. 시뮬레이션

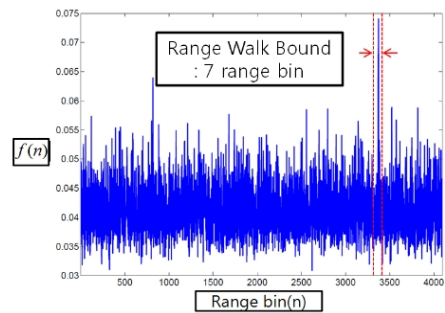
표 1은 점 산란체(point scatterer)로 모델링한 표적에 대한 바이스태틱 레이더의 시뮬레이션의 파라미터들을 나타낸다.

그림 1(a)는 표 1과 같은 시뮬레이션 조건에서 각

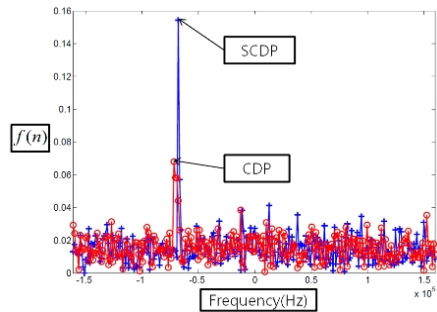
표 1. 시뮬레이션 파라미터

Table 1. Simulation parameters.

구분	조건	비고
f_c	10 GHz	
PRI	3.1 μ s	PRF=320 kHz
CPI	79 ms	256×PRI
펄스폭	1 μ s	
LFM rate	$\alpha=6\times 10^{14}$	
SNR	-37 dB	
표적 위치	3,369 point	최초 위치
표적 속도	1,020m/s	Mach 3



(a)



(b)

그림 1. (a) 레인지 bin 별 푸리에 변환 최대값, (b) 도플러 프로세싱 결과 비교

Fig. 1. (a) Maximum value of Fourier-transform for each range bin, (b) Comparison of Doppler processing results.

레인지 bin 별로 푸리에 변환을 한 후 각 레인지 bin에서의 최대값을 나타낸 것으로 레인지 워크의 범위가 총 7개 레인지 bin에 걸쳐 발생하였음을 알 수 있다.

그림 1(b)는 동일한 조건에 CDP 결과와 본 논문에서 제시한 SCDP에 의해 얻어진 결과를 비교한 것

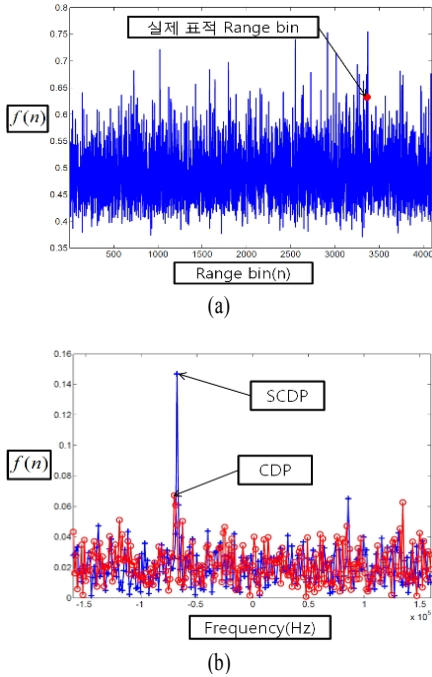


그림 2. (a) 레인지 빈 별 푸리에 변환의 최댓값, (b) SCDP 결과

Fig. 2. (a) Maximum value of Fourier-transform for each range bin, (b) Squint cross-range Doppler processing result.

이다. 한 지점의 값을 인터폴레이션하기 위해 해당 지점에서 이웃하는 좌우 6개 레인지 빈의 수신 신호 값을 이용하여 인터폴레이션을 하였으며, 실수부와 허수부로 구분하여 나이퀴스트 인터폴레이션을 실시하였다. SCDP을 하여 추정된 값은 -67.98 kHz로서 실제 값과 동일함을 확인하였으며, 기존의 CDP는 약 $1,260$ Hz의 오차 발생 외에도 피크 값의 크기가 제한적이었다.

그림 2(a)는 SNR이 -40 dB인 경우의 레인지 빈 별 푸리에 변환 최댓값을 나타낸 것으로, 잡음으로 인해서 레인지 워크 범위를 정할 수 없었다. 그림 2(b)는 윈도우를 임의로 설정해서 SCDP를 수행하고, 도플러 주파수에 대한 coarse 추정 및 윈도우 조정에 의해 SCDP를 반복 수행해서 얻어진 결과를 나타내었다. 그림 2(b)는 그 결과로서 SCDP 방식이 기존의 CDP보다 정확한 도플러 값 추정이 가능하며, SCDP가 우수한 정도는 그림 1(b)와 비교해 볼 때 거의 유사하였다. 그러므로 SCDP가 CDP를 개선한 정도는 잡음과는 거의 무관하며, 그보다는 레인지 워크가 클수

록 SCDP가 상대적으로 더 큰 개선 효과를 보여주었다.

V. 결 론

본 논문에서는 바이스태틱 레이더 시스템에서 레인지 워크가 발생한 경우, 이를 보상하여 정확한 도플러 주파수를 추정하는 방법을 제시하였다. 제시된 방법은 레인지 워크 범위 추정, 샘플 위치 결정, 인터폴레이션, SCDP 과정을 통해서 도플러 주파수를 추정하는 것으로, 특히 잡음이 많은 환경, 즉, 레인지 워크 범위 추정이 힘든 경우에는 윈도우를 이동해서 도플러 주파수를 추정할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar System*, 3rd E/d, McGraw Hill, 2003.
- [2] F. Deng, X. Wang, "Coherent integration detection algorithm research of space debris", *CIE'06 International Radar Conference*, pp. 1-4, 2006.
- [3] G. J. Frazer, S. J. Anderson, "Wigner-ville analysis of HF radar measurements of an accelerating target", *Proc. ISSPA '99, Brisbane, Australia*, pp. 317-320, 1999.
- [4] D. R. Wehner, *Hugh-Resolution Radar*, 2nd E/d, Artech House, 1994.
- [5] B. D. Carson, E. D. Evens, and S. L. Wilson, "Search radar detection and track with the hough transform, Part I : System concept", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, pp. 102-108, 1994.
- [6] B. D. Carson, E. D. Evens, and S. L. Wilson, "Search radar detection and track with the hough transform, Part II : Detection statistics", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, pp. 109-115, 1994.
- [7] G. Y. Wang, X. G. Xia, and B. T. Root, "Maneuvering target detection in over-the-horizon radar by using adaptive chirp let transform and subspace clutter rejection", *Proc. ICASSP '03, HongKong, China*, pp. 49-52, 2003.
- [8] I. G. Cuming, H. F. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Artech House, 2004.