

GSFM 펄스의 상관도에 기반한 연속 송수신 소나의 신호처리 구간 설정 방법

A method for setting coherent processing interval of continuous active sonar based on correlation of GSFM pulse

김현수,[†] 김현우,¹ 이원오,¹ 박송화,¹ 이정훈,¹ 박규태¹

(Hyeon-su Kim,[†] Hyun-woo Kim,¹ Won-oh Lee,¹ Song-hwa Park,¹ Jung-hoon Lee,¹ and Gyu-tae Park¹)

¹엘아이저넥스원 해양연구소

(Received May 31, 2021; revised July 6, 2021; accepted August 16, 2021)

초 록: 연속 송수신 소나 기술은 표적 탐지 시간간격이 짧아 표적을 탐지하고 추적하는 데 효과적인 기술이다. 연속 송수신 소나 시스템에 적합한 Generalized Sinusoidal Frequency Modulation(GSFM) 펄스는 펄스 간 직교성을 유지하면서 높은 시간-주파수 곱을 얻을 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 가속도를 갖는 표적이 존재할 경우 수신된 GSFM 펄스를 상관처리하는 적절한 시간 길이를 산출하는 방법에 대해서는 알려진 바가 없다. 본 논문에서는 GSFM 펄스를 사용하는 연속 송수신 소나 시스템에서 수신신호를 정합처리할 때 적절한 시간 길이를 상관도에 근거하여 산출하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 표적의 가속도에 따른 상관도를 계산하고 상관도에 따른 신호처리 길이를 산출한다. 부엽의 준위를 통해 제안된 방법으로 산출된 신호처리 길이를 적용할 경우 안정적인 탐지 성능을 얻을 수 있음을 보인다.

핵심용어: 연속 송수신 소나, Generalized Sinusoidal Frequency Modulation (GSFM), 상관 신호처리 간격, 능동 표적 탐지, 능동 표적 추적

ABSTRACT: The continuous active sonar technology is effective for detecting and tracking targets because of short target revisiting rate. Generalized Sinusoidal Frequency Modulation (GSFM) pulses suitable for continuous active sonar systems are known to be capable of obtaining high time-bandwidth product while maintaining the orthogonality between pulses. However, it is unknown how to calculate an appropriate length of time to correlate received GSFM pulses in the presence of a target with acceleration. In this paper, we propose a method to calculate the appropriate time length based on the correlation when matching the received signal in the continuous active sonar system using GSFM pulse. The proposed method calculates the correlation according to the acceleration of the target and calculates the signal processing length according to the correlation. It is shown that stable detection performance can be obtained when the signal processing length calculated by the proposed method through the level of the sidelobe is applied.

Keywords: Continuous active sonar, Generalized Sinusoidal Frequency Modulation (GSFM), Coherent processing interval, Active target detection, Active target tracking

PACS numbers: 43.30.Vh, 43.60.Kx

1. 서 론

연속 송수신 소나는 긴 펄스 또는 펄스 시퀀스를

연속으로 송신하고, 수신된 신호를 짧은 시간 간격으로 처리하기 때문에 기존의 펄스 능동 소나에 비해 표적 탐지 주기가 짧아 표적을 발견하고 추적하

[†]Corresponding author: Hyeon-su Kim (hyeonsu.kim@lignex1.com)

LIG NEX1, 333, Pangyo-ro, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi Province 13488, Republic of Korea

(Tel: 82-31-8026-4238, Fax: 82-31-8026-7089)



Copyright©2021 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

는데 유리한 기술이다.^[1,2] 연속 송수신 소나는 정합 처리를 하는 시간 길이보다 더 길게 펄스를 송신하기 때문에 시간 영역에서 인접한 송수신 신호 간의 간섭을 줄이는 것이 필수적이다. 이러한 간섭을 피하기 위해 주파수 도약 방식을 적용하는 연속 송수신 소나 시스템이 제안되었다.^[3] 제안된 방법은 주파수 대역을 분할하여 인접 신호들이 서로 다른 대역을 사용하도록 함으로서 간섭을 피하는 방식이다. 이 방식은 분할된 대역의 수에 반비례하여 표적 탐지 주기를 줄일 수 있는 장점이 있지만 대역폭이 줄어드는 만큼 거리 분해능이 커지고 시간-주파수 곱이 줄어드는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 펄스간 직교성을 유지하는 Generalized Sinusoidal Frequency Modulation(GSFM) 펄스를 이용한 연속 송수신 소나 기법이 제안되었다.^[4] 제안된 방법은 가용 주파수 대역을 모두 사용하면서 GSFM 펄스를 연속으로 송수신하기 때문에 높은 거리-도플러 해상도를 얻는 동시에 시간-주파수 곱의 감소가 없다는 장점이 있다.^[5] 그리고 Hague와 Buck^[5]은 가속도를 갖는 표적에 대해 GSFM 펄스의 신호처리 길이를 단일 펄스 길이보다는 길고, 펄스 시퀀스의 총 길이보다는 짧게 설정함으로써 안정적인 탐지 성능을 얻을 수 있음을 보여주었다. 그러나 표적의 가속도에 따라 신호처리 길이를 설정하는 방법에 대해 객관적인 지표나 정량적인 기준은 제시되지 않았다.

본 연구에서는 표적의 가속도에 따라 얻어지는 상관도를 기준으로 신호처리 길이를 설정하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 가속도를 갖는 표적으로부터의 반향음과 정합필터뱅크에 포함된 레플리카의 상관도를 산출하고, 높은 상관도를 유지할 수 있는 길이로 정합처리 할 경우 안정적인 탐지 성능을 얻을 수 있음을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 II장에서 Reference [5]에 기술된 기존의 GSFM 시퀀스 전송 방법에 대해 설명한다. 그리고 III장에서 제안된 신호처리 길이 설정 방법에 대해 기술하고, IV장에서 결론을 맺는다.

II. 기존의 GSFM 시퀀스 전송 방법

2.1 GSFM 펄스 시퀀스

FM 파형의 하나인 GSFM 펄스는 기저대역에서 다음과 같이 시간에 대한 함수로 표현할 수 있다.

$$p(t) = e^{j\varphi(t)}, \quad 0 < t \leq T, \quad (1)$$

여기서 T 는 펄스의 길이이고, $\varphi(t)$ 는 위상 변조 함수이며 다음 수식으로 표현된다.^[5]

$$\varphi(t) = \frac{\beta}{t^{(\rho-1)}} \sin\left(\frac{2\pi\alpha t^\rho}{\rho}\right), \quad (2)$$

여기서 $\beta = B/2\alpha$ 는 변조 인덱스이고 B 는 대역폭이다. α 는 주파수 변조 계수로 펄스의 순시 주파수의 반복주기를 결정하고, ρ 는 순시 주파수의 형태를 결정하는 파라미터로 1 이상의 값을 가지며 1일 때 위상 변조 함수가 시간-주파수 영역에서 대칭이 되게 하고 값이 클수록 비대칭이 되게 한다.

이러한 GSFM 펄스는 α 와 ρ 에 따라 특정 파형을 갖게 되며 시간-주파수 영역에서의 비대칭적인 특성으로 인해 압정 형태의 모호성 함수를 얻을 수 있다. 그리고 하나의 α 와 ρ 를 이용해서 서로 직교에 가까운 6개의 펄스를 만들 수 있는데 이는 시간과 주파수를 조정하여 얻어질 수 있다.^[5] Fig. 1은 α 가 10, ρ 가

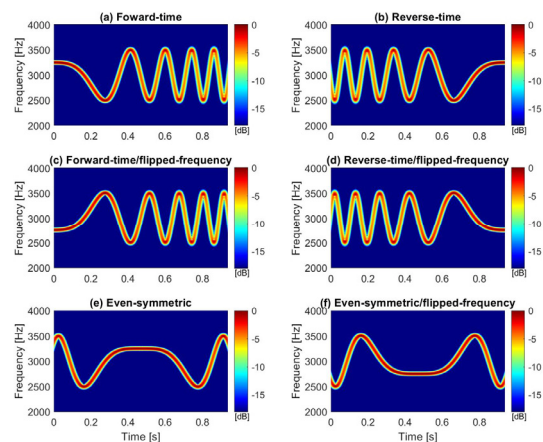


Fig. 1. (Color available online) Spectrograms of the six reflections of the GSFM.

2일 때 반송파 주파수 3 kHz, 대역폭 1 kHz, 펄스 길이 1초를 갖는 6개의 GSFM 펄스의 스펙트로그램을 나타낸 것이다. Fig. 1(a)는 Eq. (2)를 위상 변조 함수로 갖는 기본 펄스이며 이를 시간 반전하여 얻은 펄스의 스펙트로그램이 Fig. 1(b)이다. Fig. 1(c)와 (d)는 각각 기본 펄스를 주파수만 반전한 펄스와 시간과 주파수를 반전한 펄스의 스펙트로그램이며 Fig. 1(e)는 Eq. (1)에서 시간을 $-T/2 < t \leq T/2$ 로 조정된 것이고, Fig. 1(f)는 Fig. 1(e)의 펄스를 주파수 반전한 것이다. 이와 같이 동일한 α 와 ρ 를 이용하여 6개의 부펄스로 이루어진 펄스 시퀀스를 만들 수 있으며 파라미터를 조정하여 추가적인 펄스 시퀀스를 생성하는 것이 가능하다. N 개의 부펄스로 이루어진 GSFM 펄스 시퀀스는 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n(t - nT_{PRI}), \quad (3)$$

여기서 T_{PRI} 는 부펄스 간 송신시간 간격을 의미하며 연속으로 송신할 경우 부펄스 길이 T 와 같은 값을 갖는다. s_n 은 통과대역에서의 n 번째 부펄스이며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_n(t) = \frac{\text{rect}(t)}{\sqrt{T}} p_n(t) e^{j2\pi f_c t}, \quad (4)$$

여기서 $\text{rect}(t)$ 는 사각함수이고, $p_n(t)$ 는 n 번째 저대역 부펄스이며 f_c 는 반송파 주파수다.

2.2 펄스 처리 간격에 따른 정합처리 결과

능동 소나에서 수신신호는 복조 과정을 거친 후 필터 뱅크의 레플리카들과 정합처리가 된다. Fig. 2

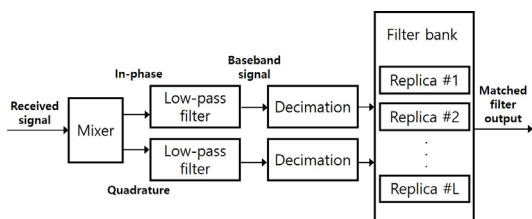


Fig. 2. Block diagram of the received signal processing for the active sonar.

는 능동 소나에서 수신 신호를 처리하는 과정을 나타낸 블록도이다. 수신된 신호는 먼저 믹서에서 반송파 주파수를 갖는 정현파에 곱해지고, 저역통과 필터를 거쳐 기저대역 신호로 얻어진다. 얻어진 신호는 다운샘플링 된 후 레플리카들과 정합처리되어 출력되는데 이 출력으로부터 유효한 측정치를 추출하고 표적의 거리와 속도를 산출하게 된다. 연속 송수신 소나는 정합처리 과정에서 레플리카의 길이를 선택함으로써 정합필터의 출력을 조정할 수 있는데 이 길이는 Coherent Processing Interval(CPI)로 알려져 있다. CPI는 길수록 큰 시간-주파수 곱을 얻기 때문에 정합필터의 입력 신호대잡음비 Signal to Noise Ratio(SNR) 대비 출력 신호대잡음비의 비를 증가시켜 탐지 확률을 높일 수 있다. 그러나 레플리카들은 일반적으로 속도의 함수로서 만들어지기 때문에 가속도를 갖는 표적으로부터 반향되어 수신된 신호는 레플리카들과 부정합이 발생하며 CPI가 길수록 부정합이 증가하게 된다. 이론적으로는 레플리카를 속도와 가속도의 함수로 만들 수 있으나 연산량이 크게 증가하기 때문에 구현이 어렵다. 특히 GSFM 펄스의 정합필터 출력은 시간-도플러 영역에서 나타나는 주엽의 너비가 좁기 때문에 속도의 함수로서만 레플리카들을 구성하더라도 속도의 분해능을 조밀하게 해야하므로 많은 연산량을 필요로 한다.^[6]

Fig. 3은 CPI 길이에 따른 정합 필터 뱅크의 출력을 나타낸 것이다. 펄스 시퀀스는 ρ 가 2이고 α 가 10인 6

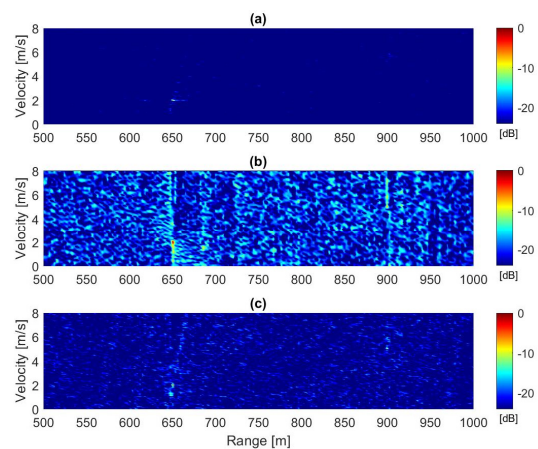


Fig. 3. (Color available online) Outputs of matched filter banks with (a) a CPI of 12.0 s, (b) 1.0 s, and (c) 4.0 s.

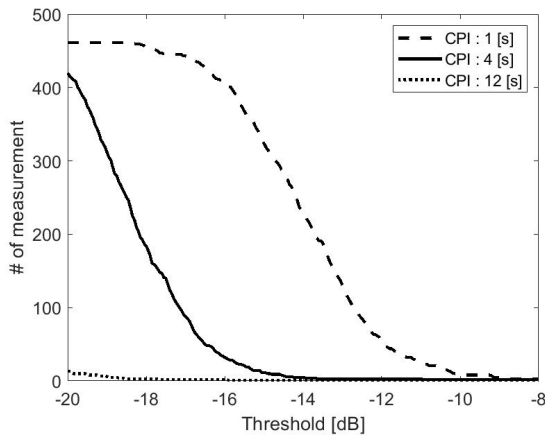


Fig. 4. The number of detected measurement according to threshold.

개의 부펄스와 α 가 20인 6개의 부펄스를 조합하여 이루어진 12개의 부펄스를 송수신하였으며 반송파 주파수는 3 kHz, 대역폭은 1 kHz, 펄스 길이 1초로 적용되었다. 이 신호 구성은 본 논문의 나머지 부분에서도 사용된다. 2 개의 표적이 존재하는 환경을 모의하였으며 첫 번째 표적은 거리 650 m에서 2 m/s의 속도이고 두 번째 표적은 거리 900 m에서 5 m/s의 속도와 0.01 m/s^2 의 가속도를 갖는다. 그리고 두 번째 표적의 반향음 세기는 첫 번째 표적보다 3 dB 낮게 설정하였다. 음속은 1500 m/s로 가정하였다. Fig. 3(a)는 12개의 부펄스에 상응하는 레플리카를 이용하여 정합처리한 것으로 첫 번째 표적은 구분이 되지만 두 번째 표적은 식별되지 않는다. 이는 두 번째 표적이 가속도를 갖기 때문에 수신신호와 레플리카의 부정합이 크게 발생하여 나타난 결과이다. Fig. 3(b)는 1개의 부펄스로 레플리카를 구성하여 얻은 결과이다. 모든 부펄스를 사용했을 때와 비교하기 위해 표적의 이동을 고려하여 12개의 부펄스 중 첫 번째 부펄스를 레플리카로 사용하였다. 첫 번째 표적은 구분이 가능하나 두 번째 표적은 부펄스 간 상호 상관으로 발생하는 부엽들로 인해 구분하기가 어렵다. Fig. 3(c)는 4개의 부펄스에 해당하는 레플리카를 적용하여 얻은 결과이다. 첫 번째 표적은 쉽게 구분이 가능하며 앞의 두 결과와 다르게 두 번째 표적 또한 구분이 용이하다. Fig. 4는 정합필터 출력에서 첨두치를 찾은 후 문턱치를 적용했을 때 유효한 측정치로 검출되는 측정치의 개수를 나타낸 것이다. 첨두치는 \pm

5.86 m의 거리와 $\pm 0.16 \text{ m/s}$ 의 속도 범위에서 최대 세기를 갖는 값으로 구하였다. CPI가 1초일 때 표적과 무관하나 유효한 것으로 추출된 측정치가 가장 많았으며 CPI가 4초일 때는 문턱치가 증가함에 따라 무관한 측정치가 급격히 감소하여 약 -11 dB의 문턱치에서부터 표적과 연관된 측정치 2 개만 추출되었다. CPI가 12초일 때는 -16 dB 이상의 문턱치에서 표적과 연관된 측정치가 1 개만 추출되었다. 따라서 CPI가 4초일 때 표적과 연관된 측정치는 모두 추출하는 동시에 표적과 무관한 측정치는 상대적으로 줄일 수 있음을 알 수 있다. Fig. 3의 결과는 Reference [5]의 모의실험 환경과 유사하게 구성하여 얻은 유사한 결과이며 적정 길이의 CPI를 적용할 때 부엽의 준위도 적절히 낮추면서 가속도를 갖는 표적도 탐지할 수 있음을 보인다. 그러나 적절한 CPI를 결정하는 객관적인 지표는 제시된 바 없으며 파라미터에 따른 GFSM 펄스 형태와 조합에 따라 적정 CPI는 달라질 수 있다. 또한 탐지하고자 하는 표적의 최대 가속도를 알고 있을 때 그 값에 따라 CPI 길이는 다르게 선택될 수 있다.

III. 제안된 CPI 설정 방법

본 장에서는 사용하려는 GFSM 펄스 시퀀스가 주어질 때 가속도에 따른 상관도를 구하고 상관도에 따라 CPI를 설정하는 방법을 제안한다. 앞장에서 설명한 바와 같이 가속도를 갖는 표적으로부터의 반향음은 시간에 따라 도플러가 변하기 때문에 CPI를 길게 설정할수록 부정합이 커지게 된다. 이러한 부정합은 수신신호와 레플리카 사이의 상관도 감소로 이어지므로 정량적인 기준으로서 CPI 길이와 가속도에 따른 상관도를 확인할 필요가 있다. M 개의 부펄스 길이에 해당하는 펄스 시퀀스가 a 의 가속도를 갖는 표적으로부터 반향되어 수신되는 신호를 벡터 $\mathbf{r}_M(a)$ 로 표현할 때 상관도를 구하는 수식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\eta(M, a) = \frac{\langle \mathbf{r}_M^*(0), \mathbf{r}_M(a) \rangle}{\sqrt{\langle \mathbf{r}_M^*(0), \mathbf{r}_M(0) \rangle \langle \mathbf{r}_M^*(a), \mathbf{r}_M(a) \rangle}}, \quad (5)$$

여기서 \langle, \rangle 는 두 벡터의 내적을 의미하고 *는 공액

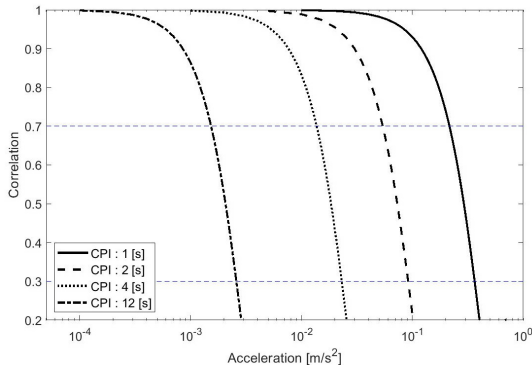


Fig. 5. Correlation values according to acceleration of the target.

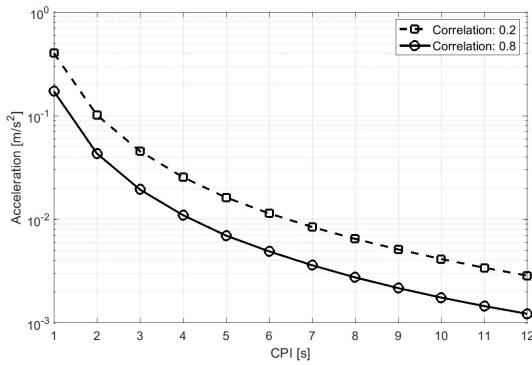


Fig. 6. Acceleration corresponding to CPI for correlations of 0.2 and 0.8.

복소를 나타낸다. Fig. 5는 2.2절에서 사용한 펄스 시퀀스의 가속도에 따른 상관도를 CPI 별로 나타낸 것이다. 가속도가 증가함에 따라 상관도가 감소하는 것을 확인할 수 있으며 CPI가 길수록 가속도에 취약하고 짧을수록 높은 가속도에서도 상관도가 높게 형성된다. CPI가 1 s일 때는 약 0.01 m/s^2 의 가속도에도 상관도가 유지되나 CPI가 12 s일 때는 약 0.0001 m/s^2 의 가속도부터 상관도가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 상관도 0.3과 0.7을 기준으로 가로로 그은 파선은 상관도 크기를 구분하기 위해 표시해놓은 것이다. 일반적으로 신호처리에서 0.3 이하의 상관도는 낮은 상관성을 갖는 것으로 판단하고, 0.7 이상의 상관도는 상관성이 높다고 판단한다.^[7]

이러한 상관도를 근거로 하여 CPI의 길이에 따라 높은 상관도가 유지될 수 있는 가속도를 역으로 산출할 수 있다. 본 논문에서는 높은 상관도를 0.8, 낮은 상관도를 0.2로 설정하여 그에 상응하는 가속도를 산출하였다. Fig. 6은 CPI에 따라 특정 상관도를 가지

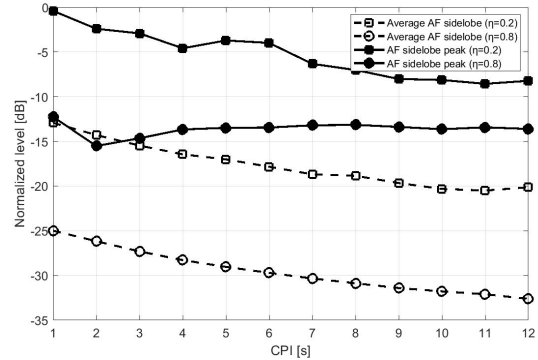


Fig. 7. Sidelobe levels of ambiguity functions according to coherent processing interval.

는 가속도를 나타낸 것이다. CPI가 길수록 상관도를 유지하기 위한 가속도가 작은 것을 확인할 수 있다. 만약 본 논문의 신호 구성을 사용하는 소나 시스템에서 탐지하려는 표적의 최대 가속도가 0.01 m/s^2 이라면 CPI는 4 s 이하로 적용하는 것이 적절할 것이며 이는 앞서 2.2절에서 보였던 정합필터 출력 결과와 부합하는 결과이다.

상관도를 기준으로 CPI를 적용하는 것이 타당한지 검증하기 위해 0.2와 0.8의 상관도를 갖게 하는 CPI별 가속도를 신호에 적용하고 모호성 함수를 산출하여 부엽 준위를 확인하였다.^[8] Fig. 7은 CPI별 평균 부엽 준위와 부엽의 첨두치 준위를 나타낸 것이다. 먼저 평균 부엽 준위(파선)는 상관도가 0.2일 경우 $-20 \text{ dB} \sim -13 \text{ dB}$ 에 형성되고 상관도가 0.8일 경우 $-33 \text{ dB} \sim -25 \text{ dB}$ 에 형성된다. 상관도의 차이에 따라 평균 부엽 준위의 차이가 명확하게 발생하는 것을 알 수 있다. 다음으로 부엽의 첨두치 준위를 확인해보자. 부엽의 첨두치는 표적의 측정치로 오검출될 수도 있고 인접 표적의 측정치를 마스킹 할 수도 있기 때문에 소나 신호처리에서 중요한 인자이다. 상관도가 0.2일 경우(실선 사각도형) 부엽의 첨두치 준위는 $-8 \text{ dB} \sim 0 \text{ dB}$ 정도에 형성되는데 배경 소음을 반영하지 않은 결과이기 때문에 이는 상당히 높은 준위 할 수 있다. 반면에 상관도가 0.8일 경우(실선 원도형) 부엽의 첨두치 준위는 -12 dB 이하로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 정리하면 CPI를 단일 부펄스 길이로 하거나 전체 부펄스 길이로 하더라도 높은 상관도를 유지할 수 있는 길이로 설정하면 표적 탐지에 적절하다고 할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 표적의 가속도에 따라 얻어지는 상관도를 근거로 하여 CPI를 설정하는 방법을 제안하였다. 가속하는 표적으로부터의 반향음을 정합처리할 때 CPI 길이에 따라 표적 탐지 성능이 달라짐을 보였고, CPI의 적절한 설정이 필요함을 주장하였다. 그리고 표적의 가속도에 따라 상관도가 달라지며 높은 상관도를 유지할 수 있는 정합처리 길이로 CPI를 설정하면 안정적인 성능을 얻을 수 있음을 보였다. 이러한 결과를 활용하면 목표로 하는 표적의 제원과 기동 특성에 맞추어 보다 효과적인 탐지 성능을 기대할 수 있다.

References

1. C. Gianelli, L. Xu, and J. Li, "Active sonar systems in the presence of strong direct blast," Proc. OCEANS 2015-Genova, 1-10 (2015).
2. C. Jauffret, A. Perez, P. Blanc-Benon, and H. Tanguy, "Doppler-only target motion analysis in a high duty cycle sonar system," Proc. 19th Int. Conf. Information Fusion, 1-8 (2016).
3. G. Hickman and J. Krolik, "Non-recurrent wideband continuous active sonar," Proc. OCEANS 2012, 1-6 (2012).
4. D. A. Hague and J. R. Buck, "The generalized sinusoidal frequency modulated waveform for continuous active sonar," Proc. OCEANS 2015-Genova, 1-8 (2015).
5. D. A. Hague and J. R. Buck, "The generalized sinusoidal frequency modulated waveform for active sonar," IEEE J. Ocean. Eng. **42**, 109-123 (2017).
6. J. Hong, C. Cho, G. Kim, K. Lee, and K. Yoon, "Multiple vertical depression-based HMS active target detection using GSFM pulse" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **39**, 237-245 (2020).
7. H. Kim, J. Kim, G. Park, S. Kim, and J. Chung, "Extraction of time coherence using detection of dominant components for underwater acoustic communication channels at East sea" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **32**, 22-31 (2013).
8. C. Guan, Z. Zhou, and X. Zeng, "Optimal waveform design using frequency-modulated pulse trains for active sonar," Sensors, **19**, 4262 (2019).

저자 약력

▶ 김 현 수 (Hyeon-su Kim)



2008년 2월: 인하대학교 전자공학과 학사
2011년 2월: 인하대학교 전자공학과 석사
2017년 8월: 인하대학교 전자공학과 박사
2017년 9월 ~ 2019년 8월: 한양대학교 해양음향공학과 박사 후 연구원
2019년 9월 ~ 2020년 3월: 한양대학교 해양음향공학과 연구조교수
2020년 3월 ~ 현재: LIG넥스원(주) 선임연구원

▶ 김 현 우 (Hyun-woo Kim)



2018년 2월: 고려대학교 컴퓨터학과 학사
2018년 3월 ~ 현재: LIG넥스원(주) 선임연구원

▶ 이 원 오 (Won-oh Lee)



2008년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 학사
2011년 7월: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 석사
2011년 7월 ~ 현재: LIG넥스원(주) 선임연구원

▶ 박 송 화 (Song-hwa Park)



2005년 2월: 부산대학교 전자전기정보컴퓨터공학부 학사
2007년 2월: 부산대학교 컴퓨터공학부 석사
2007년 3월 ~ 현재: LIG넥스원(주) 수석연구원

▶ 이 정 훈 (Jung-hoon Lee)



1997년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
1999년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학석사)
2004년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학박사)
2004년 4월 ~ 현재: LIG넥스원(주) 수석연구원

▶ 박 규 태 (Gyu-tae Park)



1996년 2월: 경북대학교 전자공학과 학사
1999년 2월: 경북대학교 전자공학과 석사
2004년 2월: 경북대학교 전자공학과 박사
(수중음향신호처리 전공)
2004년 2월 ~ 현재: LIG넥스원(주) 수석연
구원