

축소모형 표적신호의 특징 파라미터로서 TSP에 관한 연구 (Investigation of TSP as a Feature Parameter for the Scaled Target)

주 재훈, 김 재수

한국해양대학교 수중음향연구실

E-mail : k981071g@hanbada.kmaritime.ac.kr, jskim@hanara.kmaritime.ac.kr

ABSTRACT

Target signal feature parameters are very important to classify target by active sonar. Two highly correlated broadband pulses separated by time T have a time separation pitch (TSP) of $1/T$ Hz, equal to the spacing between ripples of its spectrum. In this study, TSP is applied to scaled-target echoes to be used as a feature parameter. The TSP from the target signal when source signals are CW short, CW long, and LFM long was investigated. It is also found the TSP can be applied to the target signal with doppler shift. It is shown that the position and magnitude of highlight can be found for LSEM based on TSP.

1. 서론

소나 시스템의 운용 목적은 첫째 표적을 탐지하고 나아가 표적에 대한 정보, 즉 표적의 종류, 소나, 크기, 속도, 이동방향 등을 얻어 표적을 분류하는데 있다. 능동 소나를 사용하여 표적을 분류하려면 먼저 표적 반향음에 대한 특성을 파악하고 이것에 대한 특징(feature) 파라미터를 추출해야 한다. 돌고래와 같이 음향으로 표적을 탐지·식별하는 수중동물의 경우 TSP(Time Separation Pitch)를 사용하여 표적의 위치, 종류 등을 알아낸다는 사실이 연구되었다[1]. 수중 표적의 산란 신호는 여러 가지 복잡한 메커니즘에 의해 형성된다. 특히 산란 영역이 기하광학 영역(geometric optics region)인 경우 수중 표적으로부터 수신된 신호는 송신신호를 담은 여러 개의 반향음 성분, 즉 하이라이트(highlight)로 구성된다. 시간영역에서 두 개의 하이라이트가 T 의 시간 간격으로 떨어져 있을 때 스펙트럼에서 리플(ripple)들의 주파수 간격은 $1/T$ 와 같이 되는데, 이러한 가상적인 피치를 TSP라고 한다.

본 논문에서는 축소모형표적 반향 실험 데이터(data)를 TSP 이론에 적용하여 크게 3가지 부분으로 나누어 분석하였다. 첫째, 3가지 음원신호 즉, 펄스의 길이가 상대적으로 짧아 하이라이트를 쉽게 분리할 수 있는 CW(Continuous Wave) short 펄스와 반대로 하이라이

트를 분리할 수 없는 CW long 펄스, 그리고 LFM long 펄스일 경우 축소표적 신호를 사용하여 하이라이트간의 시간간격에 주파수 분석을 하였다. 두 번째로 각 하이라이트의 도플러가 다를 경우 TSP의 형태를 분석하였고, 마지막으로 최소 자승 오차법(Least square error method)에 근거하여 실제의 스펙트럼의 양상과 거의 비슷한 스펙트럼의 형태를 갖는 표적 신호를 시뮬레이션 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 축소모형표적의 반향음 특성

능동 소나 시스템에서 표적의 음향산란 현상은 송신신호의 파장과 관련된 파수(k)와 표적의 크기(a)의 곱으로 표현되는 매개 변수 ka 에 따라 Rayleigh 영역, 공진 영역, 물리광학 영역 그리고 기하광학 영역으로 구성된다. 축소모형표적 반향실험은 중심 주파수 420kHz의 송신펄스를 사용하는데, 이 경우에 ka 값은 기하광학 영역에 해당하는 $200 < ka < 1300$ 이 된다. 기하광학 영역에서 반향음 성분은 거울반사(specular reflection), 표적의 불규칙한 표면에 의한 산란이 있다.

이러한 반향음 형성 요인에 의해 여러 개의 하이라이

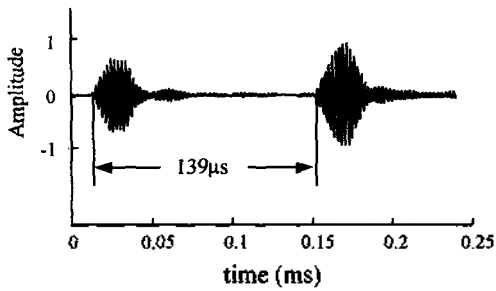


Fig. 2 (a) CW short 펄스의 표적신호

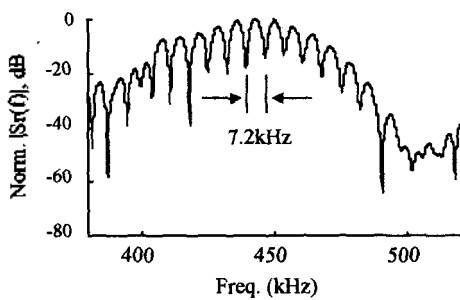


Fig. 2 (b) CW short 펄스의 스펙트럼

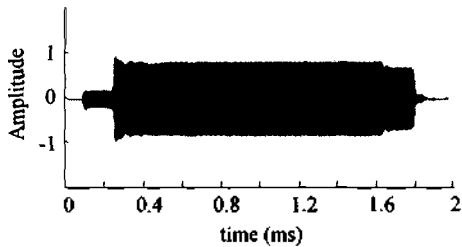


Fig. 3 (a) CW long 펄스의 표적신호

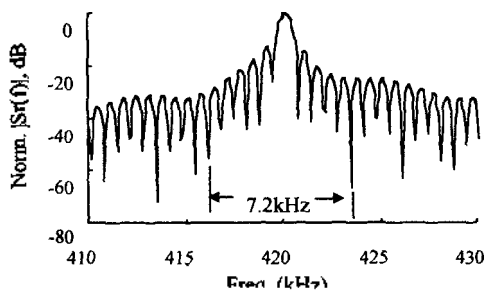


Fig. 3 (b) CW long 펄스의 스펙트럼

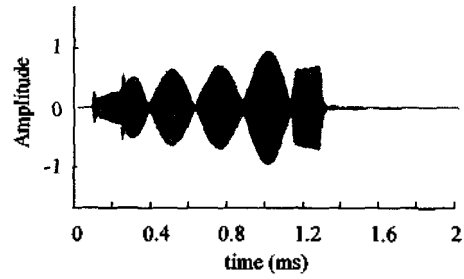


Fig. 4 (a) LFM long 펄스의 표적신호

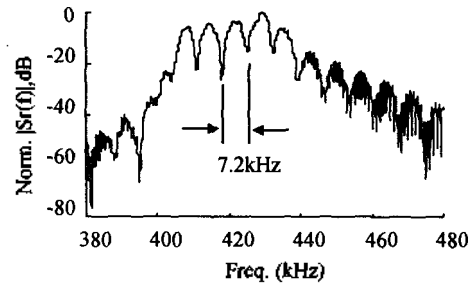


Fig. 4 (b) LFM long 펄스의 스펙트럼

3.2 하이라이트의 도플러가 다를 경우 TSP

Fig. 5 (a)는 도플러가 있을 때 신호를 나타내고 있는데, 속도가 20m/s 인 경우 도플러는 11.35kHz가 된다.

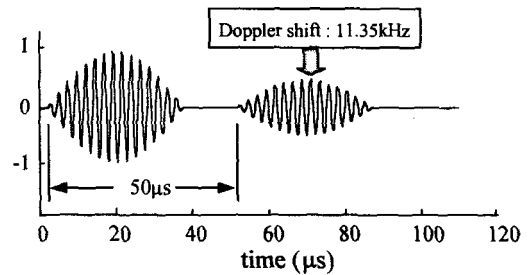


Fig. 5 (a) 도플러가 있을 때 표적신호

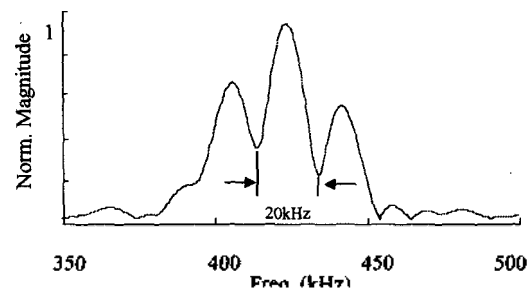


Fig. 5 (b) 도플러가 있을 때 스펙트럼

트가 나타나며, 이들 하이라이트는 이동 하이라이트 (moving HL)와 고정 하이라이트(fixed HL)로 나누어진다. 거울반사 성분은 대개 이동 하이라이트가 되며, 불규칙한 표면에 의한 반향음 성분은 고정 하이라이트로 나타난다.

2.2. 시간 지연된 신호의 TSP

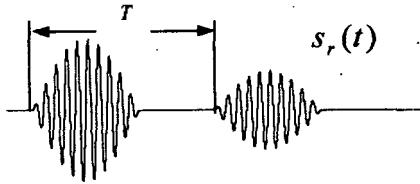


Fig. 1 두 개의 하이라이트로 구성된 신호

Fig.1과 같이 T 의 간격으로 시간 지연된 복제파 (replica)가 합쳐진 광대역 신호, 즉 두 개의 하이라이트로 구성된 신호에 대해 살펴보자.

$$s_r(t) = s(t) + as(t-\tau) \quad (2.1)$$

여기서 $s(t)$ 는 각 개개의 click, a 는 감쇠계수를 나타낸다. 식(2.1)의 $s_r(t)$ 의 푸리에 변환은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathcal{F}[s_r(t)] &= S_r(f) \\ &= S(f) + ae^{-j2\pi f\tau}S(f) \end{aligned} \quad (2.2)$$

식(2.2)의 $S(f)$ 는 복소수이고 $S_r(f)$ 는 다음과 같다.

$$S_r(f) = \frac{[S_R(f) + jS_I(f)] \cdot [1 + a \cos(2\pi f\tau)] - j[S_I(f)[1 + a \cos(2\pi f\tau)] - S_R(f) a \sin(2\pi f\tau)}{1 + a \cos(2\pi f\tau)} \quad (2.3)$$

여기서, $S_R(f)$ 는 $S(f)$ 의 실수 부분, $S_I(f)$ 는 $S(f)$ 의 허수 부분이다. 실수 부분과 허수 부분을 분리시키면 다음의 식을 얻는다.

$$S_r(f) = \frac{S_R(f)[1 + a \cos(2\pi f\tau)] + S_I(f) a \sin(2\pi f\tau) + j\{S_I(f)[1 + a \cos(2\pi f\tau)] - S_R(f) a \sin(2\pi f\tau)\}}{1 + a \cos(2\pi f\tau)} \quad (2.4)$$

따라서, 스펙트럼의 크기는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} |\mathcal{F}[s(t) + as(t-T)]| \\ = \sqrt{1 + a^2 + 2a \cos(2\pi fT)} |S(f)| \end{aligned} \quad (2.5)$$

스펙트럼에서 리플들은 식(2.5)의 $\cos(2\pi fT)$ 항에 의해 발생된다. 이 식으로부터 스펙트럼에서 최고점 (peaks)은 $\cos(2\pi fT) = 1$ 일 때 나타난다. 그리고, 스펙트럼에서 골(through)은 $\cos(2\pi fT) = -1$ 또는 다음과 같을 때 나타난다.

$$f = \frac{(2n-1)}{2T}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.6)$$

TSP의 강도(strength)는 식(2.5)으로부터 표현할 수 있는 peak-to through 비율(ratio)에 따라 달라진다.

$$k = \frac{1+a}{1-a} \quad (2.7)$$

이것의 최대 값은 $a = 1$ 일 때 나타나고 최소 값은 $a = 0$ (no ripples) 일 때 나타난다.

3. 분석 결과 및 해석

3.1 송신 펄스 종류에 따른 TSP

TSP 분석에 사용된 축소표적 실험의 송신펄스는 Table 1과 같다.

송신펄스 종류	중심 주파수	펄스 길이	대역폭
CW short	420kHz	12 μ s	.
CW long	420kHz	1.0ms	.
LFM long	420kHz	1.0ms	30kHz

Table 1 송신 펄스의 종류

Fig. 2 (a), Fig. 3 (a)와 Fig. 4 (a)는 각각 송신펄스가 CW short, CW long, LFM long일 때 축소표적 신호를 나타내고 있다. 세 신호 모두 2개의 하이라이트가 시간 간격 139 μ s로 되어있다. CW short 펄스의 경우 Fig. 2 (b)에서 스펙트럼에서 리플들의 간격이 $\frac{1}{139\mu s}$ 즉, 7.2kHz로 TSP가 잘 나타나고 있다. CW long 펄스는 CW short 펄스와 달리 상대적으로 협대역이 되는데, 이 때 TSP는 주엽(major lobe)을 벗어난다. LFM long 펄스의 경우도 대역폭 내에서 TSP가 잘 나타나고 있다.

CW short 펄스의 경우 도플러가 있어도 TSP가 잘 나타나지만, LFM의 경우 도플러가 있을 때 TSP의 분석이 어렵다. 하지만, Fig. 6에서 보는 바와 같이 CW short 펄스도 도플러 주파수가 스펙트럼의 주엽의 대역폭보다 높을 경우, 스펙트럼에서 TSP를 구별할 수 없게 된다. 여기서 TSP는 마찬가지로 20kHz이고, sine envelope이 대역폭이 84kHz, 도플러는 45kHz이다.

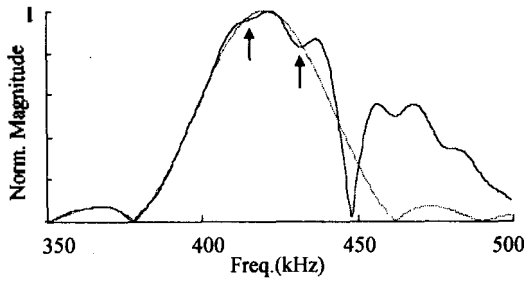


Fig. 6 도플러가 대역폭보다 클 경우 TSP

지금까지 2개의 하이라이트에 대해 TSP를 분석하였는데, 3개 이상의 하이라이트가 나타나는 경우 TSP는 더욱 더 복잡한 형태가 된다.

3.3 최소 자승 오차법을 이용한 신호합성

실제 신호(measured signal)로부터 계산된 신호(calculated signal)는 다음과 같이 최소 자승 오차법에 의해 계산되었다. 먼저, 계산하고자 하는 신호는 다음의 식으로 계산하였다.

$$s_c(t) = \sum_{k=1}^3 a_k s(t - \tau_k) \quad (3.1)$$

여기서 a_k 는 진폭, τ_k 는 각 하이라이트의 시간 위치가 된다. 실제의 신호의 스펙트럼을 $S_m(f)$ 라 하면, 계산된 신호와 실제 측정된 신호의 스펙트럼 크기의 오차를 최소화하는 $\hat{s}_c(t)$ 를 구하였다.

$$\hat{s}_c(t) = \mathcal{F}^{-1} \{ \text{Min}[S_m(f) - S_c(f)] \} \quad (3.2)$$

실제 스펙트럼과 시뮬레이션 스펙트럼을 비교해보면 스펙트럼의 골(through)의 위치가 거의 비슷하고 크기에는 약간의 오차가 있다. 그리고 계산된 신호의 스펙트럼에는 잡음(noise)의 효과가 빠져있는 것을 알 수 있다.

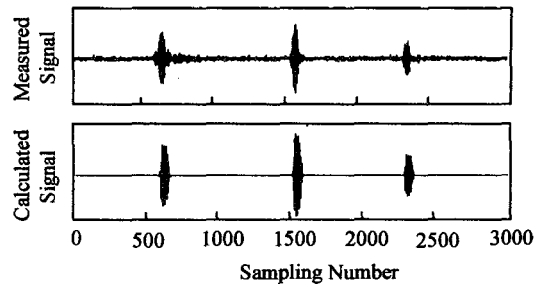


Fig. 7 (a) 실제 표적신호와 계산된 표적신호

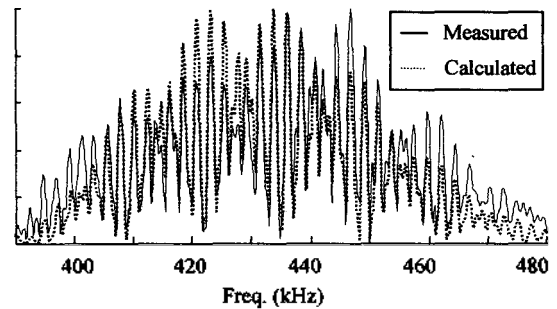


Fig. 7 (b) 실제 표적신호의 스펙트럼과 계산된 표적신호의 스펙트럼 비교

4. 결론 및 추후과제

본 논문에서는 축소모형표적 방향 실험 데이터로 세 가지 경우에 대해 TSP를 분석하였다. 첫째, 음원신호가 CW short, CW long, LFM long일 때, 하이라이트가 시간영역에서 분리되지 않아도 하이라이트의 시간간격에 해당하는 리플들이 스펙트럼에서 잘 나타났다. 두 번째로 각 하이라이트의 도플러가 있을 경우도 TSP가 잘 나타났으나, 도플러가 특정 주파수를 넘어가는 경우 TSP는 구별하기가 힘들어진다. 마지막으로 최소 자승 오차법에 근거하여 실제의 스펙트럼의 양상과 거의 비슷한 스펙트럼의 형태를 갖는 표적 신호를 합성하였다. 이러한 TSP를 축소모형 표적신호의 특징 파라미터로 표적신호의 패턴인식과 표적 구별 알고리즘을 구현하는 데 사용할 수 있다.

참고문헌

- [1] "The Sonar of Dolphins", Whitlow W.L. AU, Springer-Verlag New York Inc, pp. 66-74, 1993.
- [2] "Highlights model for submarines", Andre Rondini et al, UDT conference, 1994
- [3] "축소모형표적의 산란특성과 DB를 이용한 능동표적 신호 합성", 신기철, 김재수 외, 한국음향학회 학술대회 논문집, pp. 187-191, 1997