

# 천해 능동 소나 환경에서 물리적 지연 제약을 이용한 고스트 피크 완화 기법

최영두  
해군사관학교

chododo78@navy.ac.kr

## Ghost Peak Mitigation Using Physical Delay Constraints in Shallow-Water Active Sonar Environments

Choi Young Doo  
Republic of Korea Naval Academy

### 요 약

천해(shallow-water) 환경에서 운용되는 능동 소나는 해수면 및 해저 반사로 인해 다중경로 신호가 빈번하게 발생하며, 이로 인해 펄스압축 출력에서 실제 표적과 무관한 고스트 피크가 생성된다[1],[2]. 이러한 고스트 피크는 탐지 오경보 증가 및 거리 추정 불안정을 유발하여 수중 감시 체계의 신뢰도를 저하시킨다[4]. 본 논문에서는 천해 환경의 기하학적 전파 특성에 착안하여, 물리적으로 도달 가능한 지연 범위를 정의하고 이를 펄스압축 출력 분석에 적용하는 고스트 피크 완화 기법을 제안한다[2]. 제안 방법은 수신, 센서 깊이, 음속과 같은 제한된 환경 정보만을 활용하여 구현 가능하며, 통계적 임계값 조정이나 학습 기반 분류에 의존하지 않는다[5]. 시뮬레이션을 통해 제안 기법이 천해 다중경로 환경에서 고스트 피크를 감소시키고 탐지 안정성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다[4],[5].

### I. 서 론

천해 해역은 수심이 제한되어 있어 수중 음향 신호가 해수면과 해저에 의해 반복적으로 반사되는 전파 환경을 형성한다[1],[2]. 이로 인해 능동 소나 수신 신호는 소수의 강한 다중경로 성분으로 구성되며, 펄스압축 과정에서 다수의 피크가 동시에 관측된다[2]. 이 중 일부는 실제 표적과 직접적인 관련이 없는 고스트 피크로 작용하여 탐지 및 추적 성능을 저하시킨다[4].

기존에는 CFAR 기반 임계값 조정이나 통계적 규칙을 이용하여 오경보를 제어하려는 시도가 일반적이었다[5]. 그러나 이러한 접근은 고스트 피크를 잡음 또는 통계적 이상치로 취급하는 경향이 있어, 환경 조건 변화에 따른 성능 일관성 확보에 한계를 가진다[5]. 또한 데이터 기반 분류 방식은 학습 데이터 구축 부담과 운용 환경에서의 일반화 및 설명 가능성 측면에서 제약이 존재한다[5]. 따라서 고스트 피크를 물리적으로 제한된 전파 구조의 결과로 해석하고, 제한된 환경 정보만으로 적용 가능한 억제/완화 프레임이 요구된다[2].

본 논문에서는 천해 다중경로를 기하학적으로 단순화하여 물리적으로 도달 가능한 지연 범위를 정의하고, 펄스압축 출력에서 검출된 피크의 지연이 해당 범위를 벗어나는 경우 고스트로 간주하여 완화하는 간단한 절차를 소개한다[2],[4]. 제안 방식은 기존 매치드 필터 및 CFAR 탐지 구조에 사전 필터(pre-filter) 형태로 결합될 수 있어 실시간 처리 관점에서도 구현이 용이하다[4],[5].

### II. 물리적 지연 제약 기반 고스트 완화 개념

천해 환경에서 능동 소나 신호의 전파는 해수면과 해저 경계에 의해 기하학적으로 제한된 소수의 전파 경로로 구성된다[1],[2]. 수신  $H$ , 센서 깊이  $h_s$ , 표적 깊이  $h_t$ , 수평 거리  $R$ 가 주어질 때, 대표적인 전파 경로는 직접경로, 해수면 반사경로, 해저 반사경로로 모델링할 수 있다. 이때 각 전파 경로의 기하학적 길이는 식 (1)과 같이 표현된다[2].

$$\begin{aligned} L_0 &= \sqrt{R^2 + (h_s - h_t)^2}, \\ L_s &= \sqrt{R^2 + (h_s + h_t)^2}, \\ L_b &= \sqrt{R^2 + (2H - h_s - h_t)^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $L_0$ ,  $L_s$ ,  $L_b$ 는 각각 직접경로, 해수면 반사경로, 해저 반사경로의 전파 길이를 의미한다. 수중 음속을  $c$ 라 하면, 각 경로에 대응하는 왕복 도달 지연 시간은 다음과 같이 정의된다.

$$\tau_i = \frac{2L_i}{c}, i \in \{0, s, b\}. \quad (2)$$

위 식 (2)로부터 천해 환경에서는 펄스압축 출력에서 관측 가능한 지연 성분이 기하 구조에 의해 물리적으로 제한된 지연 범위 내에 존재함을 알 수 있다. 본 연구에서는 이를 다음과 같은 물리적 지연 제약 영역으로 정의한다.

$$\tau_{\min} = \min_i \tau_i, \tau_{\max} = \max_i \tau_i \quad (3)$$

$$\mathcal{D}_{\text{phys}} = [\tau_{\min} - \Delta_{\tau}, \tau_{\max} + \Delta_{\tau}] \quad (4)$$

여기서  $\Delta_{\tau}$ 는 환경 파라미터 불확실성 및 모델 오차를 고려한 여유 마진이다. 이 식 (4)의 지연 영역은 제한된 환경 정보만으로 계산 가능하며, 천해 다중경로의 지연의 물리적 제한성을 정량적으로 반영한다[2].

펄스압축 출력에서 검출된 피크의 지연 시간을  $\hat{\tau}_k$  라 할 때, 본 연구에서는 식 (5)의 판별 규칙을 적용한다.

$$\hat{\tau}_k \notin \mathcal{D}_{\text{phys}} \Rightarrow \text{ghost peak.} \quad (5)$$

즉, 물리적 지연 제약 영역을 벗어나는 피크는 실제 전파 경로로 설명될 수 없으므로 고스트 피크로 간주한다[2],[4]. 구현 관점에서 본 절차는 매치드 필터 기반 펄스압축, 피크 후보 추출, 환경 파라미터 기반 지연 영역 계산, 지연 제약 기반 피크 제거 또는 약화의 단계로 구성되며, 단순한 비교 연산 중심이므로 계산 복잡도가 낮다[4],[5].

또한 이 물리적 지연 제약 단계는 CFAR 기반 탐지기의 임계값 추정 이전에 적용될 수 있어, 다중경로로 인해 발생하는 비정상 피크가 배경 통계에 미치는 영향을 사전에 완화하는 효과를 가진다[5]. 결과적으로 오경보 제어의 안정성과 거리 추정의 일관성을 동시에 개선할 수 있다.

### III. 성능 검증

개념 검증을 위해 천해 능동 소나 환경을 가정한 시뮬레이션을 구성하였다. 직접경로와 1 차 반사 경로를 포함한 다중경로 신호를 생성하고, 매치드 필터 기반 펄스압축 출력에서 피크 분포를 비교하였다[4]. 그 결과 물리적 지연 제약을 적용한 경우, 특정 지연 영역 밖에 나타나는 피크가 감소하여 펄스압축 출력의 해석 가능성이 개선되는 경향이 있다[4]. 특히 저신호 대잡음비 조건에서 다중 피크로 인한 거리 추정 불안정이 완화되는 결과를 보였다[4],[5].

### IV. 결론

본 논문에서는 천해 다중경로 환경에서 발생하는 고스트 피크 문제를 완화하기 위해, 물리적으로 제한된 지연 구조를 활용하는 간단한 신호처리 개념을 제안하였다[2],[4]. 제안 기법은 추가적인 학습이나 복잡한 최적화 없이 구현 가능하며, 기존 탐지 구조와 결합 가능한 형태로 운용 측면의 적용성을 가진다[4],[5]. 향후에는 다중 반사 경로(2-bounce 이상) 확장 및 배열 소나 적용을 통해 물리 제약의 일반화를 진행할 예정이다[2].

### 참 고 문 헌

- [1] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed., McGraw-Hill, 1983.
- [2] L. B. Brekhovskikh and Y. P. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*, Springer, 2003.
- [3] M. B. Porter, "The KRAKEN normal mode program," *Naval Research Laboratory*, Tech. Rep., 1991.
- [4] H. L. Van Trees, *Detection, Estimation, and Modulation Theory*, Part III, Wiley, 2001.

- [5] S. M. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing: Detection Theory*, Prentice Hall, 1998.