

고래 모방신호를 이용한 양상태 환경에서의 수중통신-탐지 방법

김인수, 이동훈, 안종민, 박근호, 김완진, 김형문, 이상국

국방과학연구소

kis171@add.re.kr

Underwater Communication and Detection Method for Bistatic Environment Using Whale Mimetic Signals

Insoo Kim, Donghun Lee, Jongmin An, Geun-Ho Park, Wanjin Kim, Hyungmoon Kim, Sangkug Lee

Agency for Defense Development

요 약

본 논문은 송신체계와 수신체계의 양상태 환경에서 통신과 탐지를 수행하는 방법을 제안한다. 고래 휘슬음과 클릭음을 모방하여 통신신호를 사용하며, 표적에 반사된 신호를 수신하여 표적을 탐지하는 개념을 제안하고자 한다. 제안된 방법으로 양상태 탐지 환경에 대한 표적 위치 추정 분석을 통해 결과를 확인하였다.

I. 서 론

최근 수중 유무인체계의 필요성이 대두되면서 무인체계에 대한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있으며 지휘통제, 정보교환 등 무인체계의 작전 수행을 위해서는 소나를 이용한 표적 탐지와 함께 은밀 수중통신이 필수적으로 요구된다. 수중 유무인체계 소나는 운용 플랫폼과 탐지 대상 및 목적에 따라 크게 수동소나와 능동소나로 구성될 수 있다. 수동소나는 표적에서 방사된 음향신호를 배열센서로 수신하여 빔형성 및 표적 방위, 주파수를 탐지/추적하며, 능동소나는 신호를 송신하여 표적에 반사된 신호를 배열센서로 수신하여 빔형성 및 표적의 방위, 거리, 속력을 탐지/추적한다. 수중 전력체계는 갈수록 저소음화 되고 있어 수동소나로 표적을 탐지하기에는 한계가 있으며 이를 극복하고자 능동소나를 운용할 경우 위치가 노출될 가능성이 높아 특히 은밀성이 핵심인 수중 유인체계에서는 능동소나 운용은 극히 제한된다. 수중 유무인체계 통신은 현재 수중 유인체계의 경우 진파 통신이나 음성통신이 운용 가능하지만, 능동소나와 마찬가지로 노출 위험성으로 인해 운용이 극히 제한된다. 최근 수중 무인체계 운용을 목표로 은밀성을 가지는 은밀 음향통신에 대한 연구가 수행되고 있으며, 특히 고래 휘슬음 등 생체모방을 이용한 은밀 수중통신 기술에 대한 연구가 수행되고 있다[1]. 수중 전력체계를 위한 소나는 이미 오래전부터 많은 연구를 통해 소나체계가 전력화되어있는 현황이나 수중통신은 특히 음향을 이용한 은밀 수중통신에 대해서는 기술 개발 수준으로 연구를 수행하고 있는 현황이다. 특히 능동소나, 수중통신(신호송신)과 같이 운용이 제한되는 상황에서 수중 유무인체계 운용을 위해서는 은밀성을 가지는 통신과 함께 표적 탐지가 가능한 방법이 필요하다. 최근 수중통신과 탐지를 고려하여 레이더 신호와 통신신호 간의 상관관계를 고려한 레이더 내장형 통신 개념을 기반으로 수중에서 고래 클릭음을 이용한 소나 내장형 은밀 통신에 관한 연구가 수행되고 있다[2].

본 논문에서는 은밀 통신 및 탐지를 위하여 송신체계와 수신체계의 양상태(Bistatic) 환경에서 통신과 탐지를 수행하는 방법을 제안한다. 은밀 통신을 위하여 고래 휘슬음과 클릭음을 모방한 통신신호를 사용하며, 이와 함께 표적에 반사된 통신신호를 수신하여 표적을 탐지하는 개념을 제안하고자 한다.

II. 고래 휘슬음/클릭음을 이용한 양상태 수중통신-탐지 방법

고래 휘슬음 및 클릭음을 이용한 수중통신 및 탐지를 위하여 그림 1과 같이 송신체계와 수신체계가 존재하는 양상태 환경을 고려하고자 한다. 양상태 환경에서의 수중통신 및 탐지 개념은 다음과 같다. 1) 고래 휘슬음과 클릭음을 이용하여 통신신호를 모사하고, 2) 송신체계에서 고래 모방 통신신호를 송신하고 수신체계에서 신호를 수신하고, 3) 표적에 반사된 고래 모방 통신신호를 수신체계에서 수신하여 표적 탐지를 수행한다. 4) 수중 유무인체계에서 송신체계는 통신신호 송신이 가능한 무인체계가 될 수 있으며, 수신체계는 광대역 특성의 신호를 수신할 수 있는 무인체계 또는 선측배열소나, 선배열소나 등 수동소나가 탑재된 유인체계가 될 수 있다.

그림 2(a)는 혹범고래의 휘슬음과 클릭음 신호 예를 나타낸다. 휘슬음은 일정 구간의 주파수 대역을 가지면서 시간에 따라 비선형성으로 변화하며 클릭음은 짧은 시간에 발생하며 광대역의 주파수 특성을 가진다. 혹범고래 휘슬음은 flat, up-sweep, down-sweep, u-shape 등 일련의 패턴을 가지는 것으로 알려져 있으며[3], 수집된 휘슬음 데이터를 바탕으로 휘슬음 형태와 패턴 분석을 통해 그림 2(b)와 같이 통신신호를 모방할 수 있다.

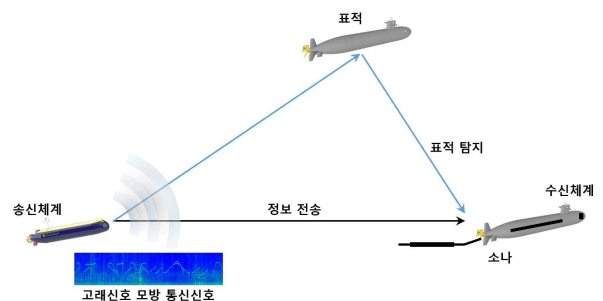
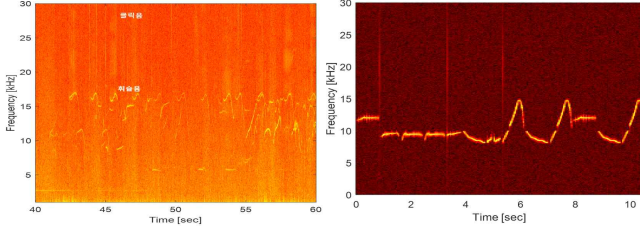


그림 1. 고래 모방신호를 이용한 양상태 수중통신-탐지 개념



(a) 흑범고래 휘슬음/클릭음 (b) 휘슬음/클릭음 모방신호

그림 2. 흑범고래 신호와 모방신호

수신체계는 수동소나를 이용하여 송신체계에서 송신한 고래 모방 통신 신호를 수신하여 통신정보를 획득하며 이와 함께 표적에 반사된 신호를 수신하여 표적 탐지를 수행한다. 표적 탐지 절차는 다음과 같다.

- 1) 고래 클릭음 모방신호의 수신신호와 표적에 반사된 신호 수신시간 차를 이용하여 표적 존재 궤적을 추정한다.
- 2) 고래 모방신호 표적반사신호를 이용하여 표적 방위를 탐지한다.
- 3) 표적 존재 궤적과 표적 방위를 이용하여 표적의 위치를 추정한다.

표적 존재 궤적은 그림 3과 같이 양상태 환경에서 TDOA(Time Difference of Arrival) 개념을 이용하여 표적 존재 궤적을 추정한다. 그림 3에서 송신체계에서 송신한 고래 클릭음 모방신호가 수신체계에 도달한 직접도달신호와 표적에 반사된 표적반사신호 간의 시간 차를 이용하여 표적 존재 가능 영역을 추정할 수 있다. 직접도달신호 탐지시간 t_d , 송신체계와 수신체계 간 거리 R_d , 표적반사신호 탐지시간 t_r , 표적반사신호의 전달거리 $R_{r1} + R_{r2}$ 로부터 표적 존재 가능 영역은 그림 3과 같이 장축 L 과 단축 S 을 가지는 타원 궤적과 같이 형성되며, 음속 c 로부터 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{R_{r1} + R_{r2}}{t_r} = c \quad (1)$$

표적반사신호 전달거리와 직접도달신호 전달거리의 관계식은 표적반사신호와 직접도달신호 간의 탐지시간 차 $\tau(\tau = t_r - t_d)$, 음속 c 를 이용하여 다음과 같이 주어진다.

$$R_{r1} + R_{r2} = R_d + c\tau \quad (2)$$

장축 L 과 단축 S 의 관계식 $R_{r1} + R_{r2} = 2L = 2\sqrt{S^2 + (R_d/2)^2}$, 표적반사신호와 직접도달신호 간의 탐지시간 차 τ , 음속 c , 송신체계와 수신체계 간 전달거리 R_d 로부터 표적 존재 궤적 T_x 와 T_y 는 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{T_x^2}{L^2} + \frac{T_y^2}{S^2} = 1 \quad (3)$$

여기서 $L = a/2$, $S = \sqrt{(a/2)^2 - (R_d/2)^2}$, $a = R_d + c\tau$ 이다.

식 (3)의 표적 존재 궤적만으로는 표적 위치를 알 수 없으므로 표적 위치를 추정하기 위하여 수신체계의 수동소나에서 탐지한 표적 방위를 이용한다. 수신체계 선측배열소나, 선배열소나 등의 수동소나를 이용하여 탐지한 표적 방위 θ 와 표적 존재 궤적 (T_x, T_y) 간의 교차점인 수신체계에서의 표적 추정거리 \tilde{R} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\tilde{R} = \frac{L(1 - e^2)}{1 + e \cos \theta} \quad (4)$$

여기서 $e = (R_d/2)/L$, $L = (R_d + c\tau)/2$ 이다.

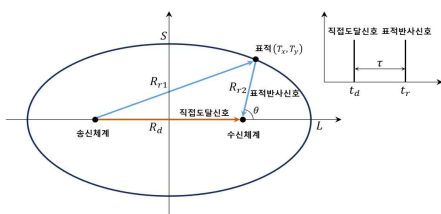
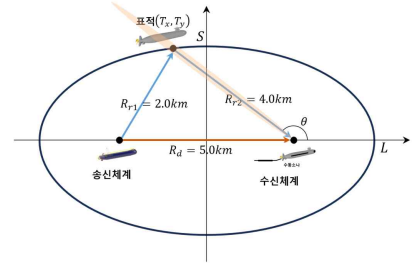


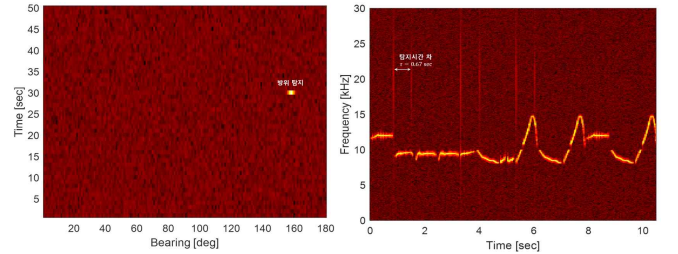
그림 3. 클릭음 모방신호를 이용한 표적 궤적 추정

III. 양상태 탐지 분석

그림 4(a)와 같이 송신체계와 수신체계 간 거리 5 km, 표적반사신호의 전달거리 6 km의 양상태 환경을 고려한다. 해양환경 조건은 고려하지 않았으며, 송신체계에서 송신한 고래 휘슬음 및 클릭음 모방신호(그림 2(b))에 대해 수신체계에서 표적반사신호를 탐지하여 추정된 표적 방위는 158도(그림 4(b), 방위탐지 해상도 1도 조건), 해당 탐지 방위에 대해 주파수 분석 화면에서 구한 표적반사신호와 직접도달신호 간의 탐지시간 차는 0.67초(그림 4(c), 주파수탐지 시간해상도 0.01초 조건)이며, 표적 방위와 탐지시간 차로부터 추정된 수신체계에서의 표적 거리 추정치는 4,039 m이다.



(a) 양상태 표적 탐지 조건



(b) 휘슬음/클릭음 모방신호 방위 탐지 (c) 클릭음 모방신호의 탐지시간 차

그림 4. 양상태 탐지 분석 결과

IV. 결론

본 논문은 송신체계와 수신체계의 양상태 환경에서 통신과 탐지를 수행하는 방법을 제안하였다. 고래 휘슬음과 클릭음을 모방하여 통신신호를 사용하며, 클릭음 모방신호의 탐지시간 차를 이용하여 표적 존재 궤적을 추정하고, 휘슬음 및 클릭음 모방신호의 표적반사신호로부터 표적 방위를 탐지하여 표적 위치를 추정한다. 양상태 탐지 환경에 대한 표적 위치 추정 분석을 통해 표적 탐지 결과를 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 연구는 2026년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소에서 수행한 미래도전국방기술 연구개발사업임(No.915084201).

참 고 문 헌

- [1] Jongmin Ahn, et. al., "Analysis of research trends and technological maturity of biomimetic underwater communication", *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 50, no. 3, pp. 1676-1702, 2025.
- [2] Jiajia Jiang, et. al., "A sonar-embedded disguised communication strategy by combining sonar waveforms and whale call pulses for underwater sensor platforms," *Applied Acoustics*, vol. 145, pp. 255-266, 2019.
- [3] R. Rio, "Acoustic recording of false killer whale (*Pseudorca crassidens*) from Mexico (L)," *J. Acoust. Soc. Am*, vol. 153, no. 4, pp. 2019-2022, Apr. 2023.