

수상함 수동타스에서 다중경로를 이용한 표적의 위치추정 기법

최 영 두 *

Target Position Estimation Method using Multi-Path in the Warship Passive TASS

Young-Doo Choi*

요 약

본 논문에서는 수상함 수동 타스에서 다중 경로를 이용한 표적 위치 추정 방법을 제안한다. 보통 수상함이 장거리 대잠 탐색할 경우에 수동 타스를 이용한다. 그러나 원래 수동 타스는 표적 위치 추정에 한계가 있다. 그리고 표적에서 생성된 음향 신호는 수중 환경에서 수많은 다중 경로와 함께 전파된다. 수동타스에서 수신되는 다중경로 표적 신호는 서로 원뿔 각도가 다르기 때문에 실제 표적 방위와는 다른 방위에 허위 표적이 나타난다. 몇 가지 가정하에서, 이 기하학적 특성은 수학적으로 분석될 수 있으며, 이 논문에서는 표적과 허위표적의 측정된 원뿔각을 사용하여 얻어진 기하학적 관계식에 의해 표적의 위치추정 정보를 얻는다.

Abstract

In this paper, we propose target position estimation method using multi-path in the warship passive TASS(Towed array Soar System). Usually, when battleship detect target, they use passive TASS detection to search a long-range target. But, originally, passive TASS have limitation for target range estimation. And the acoustic signal generated from target propagates with numerous multipaths in underwater environment. Since multipath target signals received in passive TASS have different conic angles, ghost target has different bearing in comparison target bearing. Under several assumptions, we get the target position induced of this geometric relational equations using presumed conic angles of target and ghost target.

Keywords

SONAR, warship TASS, range estimation, multipath

* 해군사관학교 전자제어공학과 교수
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3501-3508>

• Received: Sep. 27, 2022, Revised: Oct. 25, 2022, Accepted: Oct. 28, 2022
• Corresponding Author: Young-Doo Choi
Dept. of ROK NAVY Academy education Korea Post Office Box 88-1,
Jungang-ro 1, Jinhae-gu, Changwon-si
Tel.: +82-55-537-5309, Email: chdodo@naver.com

1. 서 론

소나를 이용하여 수중에서 표적의 위치를 찾기 위한 많은 연구들이 진행되었다. 표적의 위치를 추정하는 일반적인 기법은 배열센서를 이용하는 빔형성 기법 등이 있다[1,2]. 수동소나의 한 종류인 수동타스(TASS, Towed Array Sonar System) 같은 선배열센서를 이용하는 경우 배열센서의 기하학적 특성으로 인해 표적신호의 입사각만 추정할 수 있기 때문에, 표적의 위치를 추정하기 위해서 주로 능동소나를 이용한다[3]. 그러나 능동소나는 같은 조건의 수동소나에 비해 탐지거리가 반으로 줄어들기 때문에 원거리 탐지를 위해서는 타스 같은 수동소나를 이용한다. 따라서 표적기동분석(TMA, Target Motion Analysis) 등의 부가적인 기법을 통하여 수동소나의 표적 위치 추정성능을 향상 시키기 위한 연구들이 계속 진행되고 있다[4].

또 다른 방식은 수중의 다중경로 환경을 이용하는 것이다. 다중경로 환경에서 각각의 경로신호는 서로 다른 입사각 및 시간지연을 가지고 수동타스로 수신되며 이러한 다중경로 특성을 이용하면 부가적인 장비를 이용하지 않고도 수동타스를 이용하여 표적위치를 추정할 수 있다[5]-[7]. 그러나 수동타스에서 다중 경로를 통해 지속적으로 수신되는 신호의 시간차는 정확히 추정하기가 어려우므로 수동타스에서 획득가능한 다중경로 신호정보는 입사각으로 제한된다.

본 논문에서는 다중경로 환경에서 수동타스 운용

자가 확인할 수 있는 허위표적의 입사각 정보를 이용하여 표적의 위치를 추정하는 기법을 제안한다. 근거리에 위치한 표적에서 수동 타스에 각 경로를 통하여 입사되는 신호들의 각의 차이가 있으므로, 수동 타스에서 추정되는 경로별 원추각 정보를 이용하여 표적위치를 추정하였다. 이 논문에서 고려하는 표적은 수중함으로 가정하였고, 추정한 원추각과 표적 위치의 관계식을 수학적으로 유도하였으며, 얻어진 기하학적 관계식의 해를 구함으로써 표적의 위치를 추정하였다.

본 논문의 구성은 2장에서 수동 타스의 다중경로 환경에서 발생하는 허위표적 현상을 설명하며, 제시한 위치 추정기법을 3장에서 설명한다. 4장에서는 다양한 모의실험을 통하여 제시한 알고리즘의 성능을 확인하고, 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. 다중경로 환경에서의 허위표적

수중에서는 표적에 의해서 발생된 음파가 다양한 경로를 통하여 전달되며, 특히 근해에서는 해저면 혹은 해수면에 반사되어 다양한 전달 경로가 형성된다. 그림 1과 같이 수상함에서 수중에 위치한 수중함을 탐지하는 경우 수중함의 소음은 크게 직접 전달경로인 A와 해저면 반사경로인 B를 통해 전달된다. 본 논문에서는 음속이 일정하다고 가정한다. 또한 다중경로는 해저면 반사손실을 고려하여 해저면에 1회 반사되는 경로와 직접 전달경로만을 가정한다.

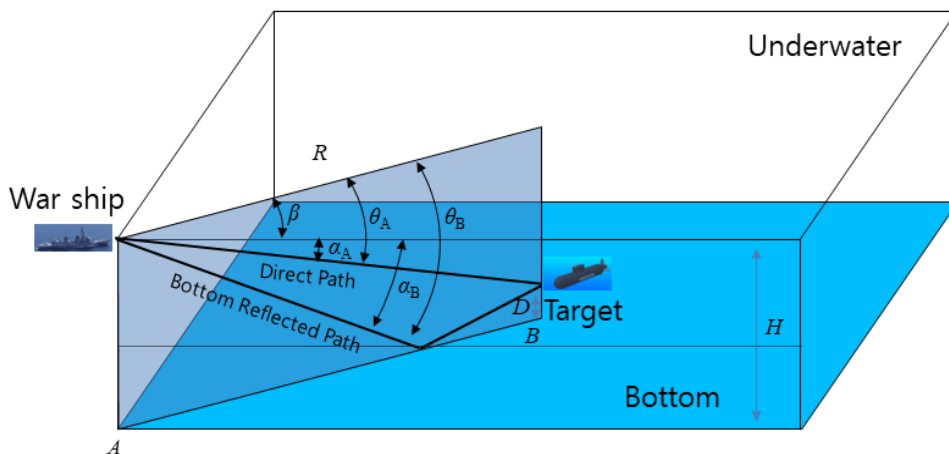


그림 1. 다중경로 환경에서 음파 전달 경로
Fig. 1. Trajectories of real and false targets on waterfall

해역의 중심은 H 이며, 표적의 해저면으로 부터의 고도 D 는 최적 심도(BD, Best Depth)에 위치해 있다고 가정하며, 자함으로부터 수평거리 R 에 위치하고 있다. 표적의 소음은 다중경로인 Path A와 Path B를 통해 서로 다른 입사각인 α_A 및 α_B 로 수동 타스로 수신된다.

그림 2는 수동 타스 운용자 콘솔 상에 워터폴(Waterfall) 다이어그램으로 전시된 시간에 따른 표적, 허위표적, 미러표적의 원추각을 나타내며, 시간 경과에 따른 궤적형태의 변화를 나타낸다. 표적 궤적 주위에 희미하게 허위표적 궤적이 나타나는데, 이는 해저면 반사에 의해 표적 신호의 강도가 약해지는 것에 기인한다. 수동 타스를 이용하는 경우 선형 배열센서의 기하학적 특성에 따라 수동 타스를 중심으로 입사되는 원추각만을 측정할 수 있으며, 수동 타스를 기준으로 표적위치의 좌/우의 구분이 제한 된다. 이러한 수동 타스의 구조적 제약으로 인하여 수상함을 중심으로 좌우 대칭인 방위에 허위 표적이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이 논문에서 다루는 허위표적은 표적 주위에 일정한 방위각 차를 가지고 나타나게 된다. 이는 근거리 표적의 신호가 다중경로를 통하여 타스에 도달하는 경우 그림 1과 같이 표적신호의 입사각의 차이에 기인하며, 표적의 수평방위가 β 라고 할 때, α_A , α_B 의 고각으로 입사하는 다중경로 신호는 수동 타스에서 각 θ_A 및 θ_B 의 원추각으로 측정된다.

수평방위 β 와 고각 α_A , α_B 및 원추각 θ_A 및 θ_B 의 관계는 코사인법칙을 이용하여 다음 식 (1), (2)와 같이 정의된다.

$$\cos\theta_A = \cos\alpha_A \cos\beta \quad (1)$$

$$\cos\theta_B = \cos\alpha_B \cos\beta \quad (2)$$

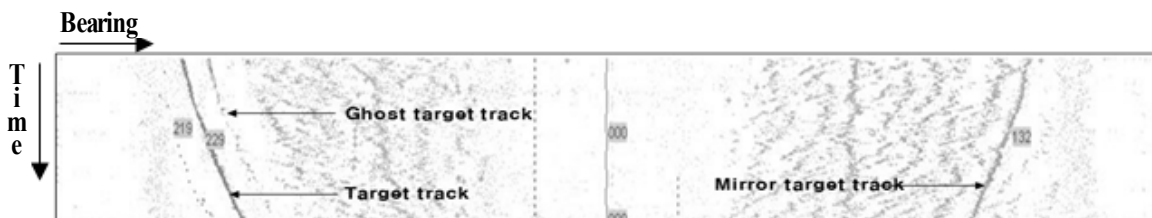


그림 2. 운용자콘솔에 워터폴로 표시된 표적과 허위표적
Fig. 2. Target waterfall and ghost target waterfall displayed using waterfall on operator console

그림 1의 다중경로 환경에서 수상함 수동 타스의 중심과 표적이 같이 존재하는 수직 평면인 $A-B$ 간 단면상의 다중경로 신호를 그림 3으로 나타내었다. 수중에서의 음속은 c , 직접경로의 길이는 R_A , 반사경로의 길이는 R_B 이다. 그림 3에서 해저면 반사경로와 직접경로의 표적신호의 신호 도달 시간차 τ 는 다음 식 (3)과 같다.

$$\tau = \frac{1}{c}(R_B - R_A) \quad (3)$$

III. 제안한 알고리즘

제시한 기법은 다중경로 신호의 원추각 추정과 표적 위치추정으로 구성된다. 표적의 원추각 추정 경우 수상함 수동 타스 운용상황에서 별도의 처리 없이 운용자 콘솔 상 워터폴의 방위각 차이로 추정되는 것으로 가정하였다. 그리고 추정된 원추각, 수상함 정보 및 활동 해역수심 정보로 부터 표적 위치추정을 위한 기하학 관계식을 유도하고, 이 식의 해를 산출함으로써 표적의 위치를 추정한다.

3.1 원추각 추정

원추각 추정을 위해서는 통상 MUSIC(Multi-Signal Classification) 등의 도달방위각 추정기법을 적용하여 방위각을 추정한다[8]. 그러나 이와 같은 기법을 위해서는 센서수준의 원데이터 수집이 필요하며, 일정 관측시간에 연속적으로 데이터가 축적되어야 하므로, 수상함에서 임무 중에 적용하기에는 많은 제약조건이 따른다. 이 논문에서는 원추각 추정 알고리즘의 적용 없이 운용자콘솔의 그림 2와 같은 형태로 나타나는 워터폴에서 실패표적과 허위표적의 방위각 차이를 운용자가 확인하여 값을 입력하는 것으로 가정하였다.

3.2 표적위치 추정

타스로 입사되는 각각의 다중경로의 길이 R_A 및 R_B 는 그림 3의 기하학적 구조를 이용하여 식 (4), (5)를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$R_A = \sqrt{R^2 + (H - D)^2} \quad (4)$$

$$R_B = \sqrt{R^2 + (H + D)^2} \quad (5)$$

식 (3)에서 나타난 각 경로 간의 도달 시간 차는 식 (4), (5)로부터 다음과 같이 수평거리 R 과 표적의 심도 D 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \frac{1}{c} (\sqrt{R^2 + (H + D)^2} - \sqrt{R^2 + (H - D)^2}) \quad (6)$$

다중경로의 원추각은 그림 3에 나타난 다중경로의 입사각, 식 (1), (2)를 사용하여 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\cos\theta_A = \frac{R \cos\beta}{\sqrt{R^2 + (H - D)^2}} \quad (7)$$

$$\cos\theta_B = \frac{R \cos\beta}{\sqrt{R^2 + (H + D)^2}} \quad (8)$$

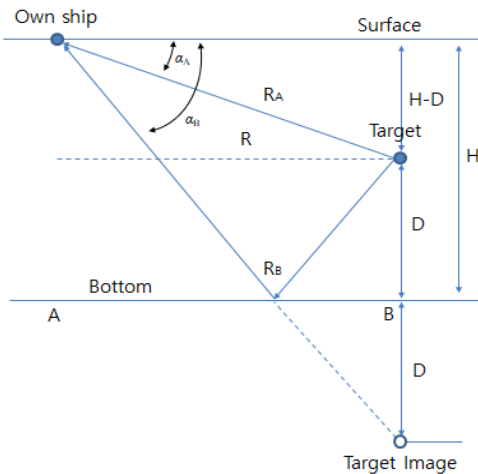


그림 3. 다중경로 환경에서 음파신호
Fig. 3. Soundwave in multipath environments

위와 같이 기하학적 특성을 수학적 관계식으로 표현할 수 있으며, 식(6)-(8)을 이용하여 정리하면

아래와 같은 표적의 수평거리 R 의 값을 산출할 수 있는 관계식을 구할 수 있다.

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{c^2 \tau^2 + \frac{16H^2 D^2}{c^2 \tau^2} - 4(H^2 + D^2)} \quad (9)$$

식 (9)에서 해역수심 H 와 표적함인 수중함 최적 심도 D 및 수중에서의 음속 c 는 BT를 투하하여 정보를 획득할 수 있다[9]. 다만, 각 경로별 신호의 도달 시간차 τ 는 운용자가 화면 혹은 다른 센서정보로부터 직접적인 확인이 어려우나, 음속이 일정하다고 가정하는 경우 식 (6)과 식 (7), (8)의 기하학적 관계로부터 τ 값을 다음과 같은 관계식으로 유도 가능하다.

$$\tau = \sqrt{\frac{4HD(\cos\theta_A - \cos\theta_B)}{c^2(\cos\theta_A + \cos\theta_B)}} \quad (10)$$

위와 같이 식 (10)의 관계식을 이용하면, 실 표적 및 허위표적의 각 원추각 값 및 자함 정보로부터 표적 신호의 도달 시간차 τ 를 구할 수 있다.

3.3 알고리즘 요약

제시한 알고리즘을 요약하면 그림 4와 같다. 측정된 해양환경, 수상함 항해정보 및 운용자화면에서 확인할 표적 및 허위표적의 방위각을 측정하고, 식 9를 이용하여 표적의 위치를 산출한다.

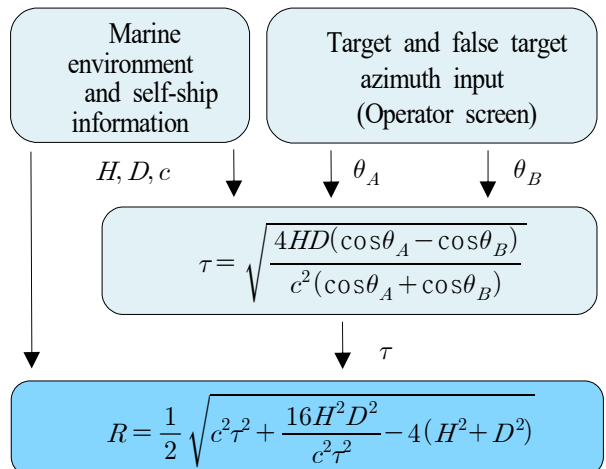


그림 4. 제안한 알고리즘 요약
Fig. 4. Summary of presented algorithms

IV. 모의실험

제시한 위치추정 알고리즘의 성능을 분석하기 위해 모의실험을 수행하였다. 수상함은 수심 400m 해역에서 항해중이며 표적은 최적심도는 200m에서 활동하는 것으로 가정하였다. 수상함의 소나는 센서가 등간격으로 배치된 선배열센서를 가정하였다. 표적은 수상함으로부터 수평거리 1200m 이격된 지점에 위치한 것으로 설정하였으며 표적의 방위에 따른 위치추정 성능 분석을 위해 자함기준 상대방위 45°와 85°로 표적 방위를 변하게 하여 모의실험을 수행하였다. 표적신호의 중심주파수는 1KHz, 신호대 잡음비는 0dB로 설정하고, 100회의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 제시한 알고리즘을 적용하여 표적의 위치 추정 결과를 그림 5와 6에 나타내었다.

그림 5는 표적의 방위가 45°에 방향에 위치할 때이며, 실제 거리값인 1200m 중심으로 위치 추정값이 오차범위 ±50m 이내임을 확인할 수 있다. 그러나 그림 6은 표적의 방위가 85°방향에 위치할 때이며 비교적 위치 추정오차가 굉장히 늘어남을 확인할 수 있다. 이는 표적의 방위가 90°에 인접할수록 입사각에 따른 원추각 θ_A , θ_B 가 유사하게 되어 두 값의 차이가 감소함으로, 식 9에서 각 경로별 신호의 도달 시간차 τ 이 0에 근접해서(분모항이 0에 근접) 수평거리 R 의 추정오차 증가함으로 제시한 알고리즘을 적용 가능한 조건을 만족할 수 없기 때문이다.

그림 7은 표적의 방위를 20°에서 120°까지 증가시키면서 위치추정오차를 분석한 결과이다. 위치추정오차는 평균제곱근오차(RMSE)로 나타내었다. 80°~100° 부근에서 다중경로 효과가 거의 없기 때문에(이는 표적의 방위가 90°에 인접할수록 입사각에 따른 원추각 θ_A , θ_B 유사) 위치추정오차가 커지며, 위치추정오차 결과는 90°를 기준으로 좌우가 유사하게 나타난다.

그림 8은 표적의 위치를 수상함으로부터 거리를 증가시켰을 때 거리추정오차의 분석 값이다. 원거리에 위치할수록 위치 추정 성능이 저하되는데, 이것은 음파의 진행 경로에 의한 도달 시간차와 입사각 차이가 작아지게 되는 현상에 기인한 것으로 판단되며 알고리즘의 초기 전제조건인 근거리 표적 조건을 만족하지 못하기 때문이다.

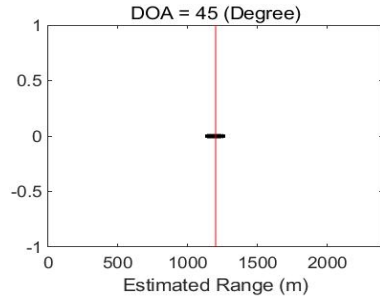


그림 5. 표적 거리 추정 결과(DOA 45°)
Fig. 5. Target position estimation result(DOA 45°)

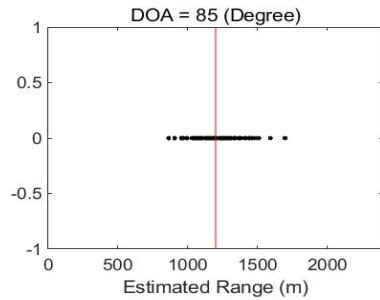


그림 6. 표적 거리 추정 결과(DOA 85°)
Fig. 6. Target position estimation result(DOA 85°)

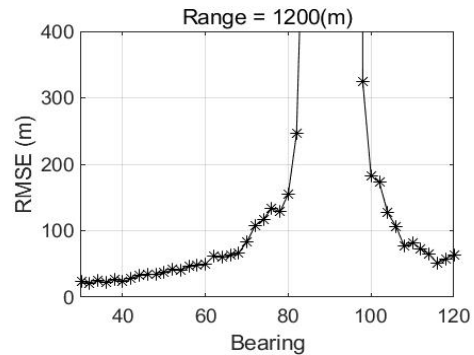


그림 7. 표적 방위 변화에 따른 평균제곱근오차 (위치 1200m)
Fig. 7. RSME of position estimation for DOA variation (position 1200m)

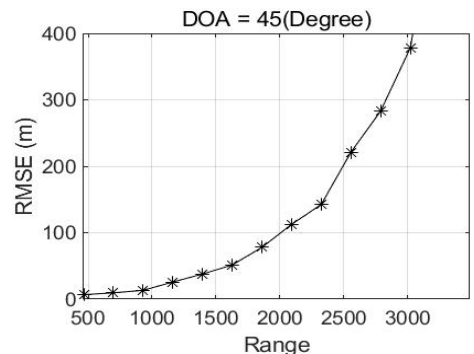


그림 8. 표적 위치 변화에 따른 평균제곱근오차 (방위 45°)
Fig. 8. RSME of position estimation for position variation (DOA 45°)

V. 결 론

본 논문에서는 수상함에 탐지되는 다중경로 현상을 이용하여 표적의 위치를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 다중경로환경에서 표적신호의 전달경로 특성을 수학적으로 분석하여 관계식을 정리하고 이로부터 표적의 위치를 추정하였다. 이후 모의실험을 통하여 알고리즘의 성능을 분석하였다. 이 알고리즘은 신뢰할 수 있는 거리 추정 결과를 보였으며(원 추각 분리가 안되는 90° 인근 제외), 수상함에서 간단한 연산으로 표적위치 산출을 위한 초기값을 획득 할 수 있었다.

References

- [1] D. H. Johnson and D. E. Dudgeon, "Array Signal Processing : Concepts and Techniques", Pearson, 1993.
- [2] N. Song and H. C. Chun, "Beamforming Algorithms", J. Korean inst. Electromagn. Eng. Sci., Vol. 31, No. 8, pp. 701-712, Aug. 2020. <https://doi.org/10.5515/kjkiees.2020.31.8.006>.
- [3] R. O. Nielson, "Sonar Signal Processing", Artech House, 1991.
- [4] C. Jauffret and D. Pillon, "Observability of passive target motion analysis", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 32, No. 4, pp. 1290-1300, Oct. 1996. <https://doi.org/10.1109/7.543850>.
- [5] S. H. Lee, C. S. Ryu, and K. K. Lee, "Near-field source localisation using bottom-mounted linear sensor array in multipath environment", IEE Proc. Radar, Sonar and Navig, Vol. 2, pp. 836-840, Nov. 1992. <https://doi.org/10.1049/ip-rsn:20020494>.
- [6] D. Starter and A. Neorai, "Passive Localization of Near-Field Sources by Path Following", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 42, No. 3, pp. 677-680, Mar. 1994. <https://doi.org/10.1109/78.277864>.
- [7] S. H. Lee and B. W. Choi, "3-D Near Field

Localization Using Linear Sensor Array in Multipath Environment with Inhomogeneous Sound Speed", The journal of the acoustical society of Korea, Vol. 25, No. 4, pp. 184-190, Jul. 2006.

- [8] R. Roy and T. Kailath, "ESPRIT-Estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process., Vol. 37, No. 7, pp. 984-995, Jul. 1989. <https://doi.org/10.1117/12.55606> .
- [9] W. Y. Hong, S. M. Jung, S. E. Lee, and W. T. Oh, "Naval Weapon Systems Engineering", Sejong, 2011.

저자소개

최 영 두 (Young-Doo Choi)



2003년 3월 : 해군사관학교
해양학과(이학사)

2013년 2월 : 경북대학교
전자공학과(공학석사)

2016년 2월 : 경북대학교
전자공학과(공학박사)

2021년 3월 ~ 현재 : 해군사관학교

전자제어공학과 교수

관심분야 : 레이더/소나 신호처리, 수중탐지