

잠수함 선배열소나의 허위표적 정보를 이용한 표적의 거리추정 기법

최병웅^{*1)} · 김규백²⁾

¹⁾ 한화탈레스(주) 해양/시스템연구소

²⁾ 국방과학연구소 함정전투체계단

Target Range Estimation Method using Ghost Target in the Submarine Linear Array Sonar

Byungwoong Choi^{*1)} · Kyubaek Kim²⁾

¹⁾ *Naval/System Research Center, Hanwha Thales Co., Ltd., Korea*

²⁾ *The Naval Combat Systems PEO, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 13 March 2015 / Revised 25 August 2015 / Accepted 4 September 2015)

ABSTRACT

In this paper, we propose target range estimation method using ghost target in the submarine linear array sonar. Usually, when submarine detect target, they use passive sonar detection to avoid self-disclosure by active sonar transmission. But, originally, passive linear array sonar have limitation for target range estimation and additional processing is required to get target range information. For the case of near-field target, typical range estimation method is using multiple information by multipath effect in underwater environment. Acoustic signal generated from target are propagated along with numerous multipath in underwater environment. Since multipath target signals received in the linear array sonar have different conic angles each other, ghost target is appeared at the bearing different with real target bearing and sonar operator can find these information on the operation console. Under several assumption, this geometric properties can be analysed mathematically and we get the target range by derivation of this geometric equations using measured conic angles of real target and ghost target.

Key Words : Submarine(잠수함), Linear Array Sonar(선배열소나), Range Estimation(거리추정), Multipath(다중경로), Ghost Target(허위표적)

1. 서론

소나를 이용하여 수중 표적의 위치를 추정하는 것은 매우 중요한 문제이며 위치 추정 정확도를 높이기 위한 다양한 연구들이 수행되어 왔다. 표적의 위치를 추정하는 가장 일반적인 방법은 배열센서를 이용하여 표

^{*} Corresponding author, E-mail: bwng.choi@samsung.com
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

적의 위치를 추정하는 기법으로 범형성 기법, MUSIC, ESPRIT 등이 대표적이다^{1,2}. 수동소나의 선배열센서와 같은 1차원 배열센서를 이용하는 경우 센서의 기하학적인 특성으로 인해 표적신호의 입사각만을 추정할 수 있다. 표적의 거리를 추정하기 위해서는 펄스신호 송신 후 반향음이 수신될 때까지의 시간지연 정보를 이용하여 표적의 거리 및 방위를 추정하는 능동소나를 주로 이용하고 있다³. 그러나 은밀성의 확보가 핵심인 잠수함에서는 능동소나 보다 수동소나를 수중표적의 주 탐지원으로 사용한다. 그러나 수동소나는 표적의 거리를 추정하는데 근본적인 제한이 있다. 따라서 잠수함에서는 수동측거소나(PRS) 및 표적기동분석(TMA) 등의 다양한 기능을 통하여 표적의 거리를 추정하고 있으며, 그 외에도 거리 추정성능의 향상을 위한 노력들이 계속되고 있다.

수동소나 환경에서 수중 표적의 위치를 추정하는 또 하나의 방법은 수중의 다중경로 특성을 이용하는 것이다. 다중경로 환경에서 각 경로신호는 서로 다른 입사각 및 시간차를 가지고 선배열센서로 수신되는데, 이러한 다중경로 정보를 이용하여 신호 전달 경로를 모델링하고 이를 통해 표적의 거리를 추정하는 기법을 경로추종(path following)기법이라 한다. 이러한 경로추종 기법을 이용하면 별도의 부가적인 장비를 이용하지 않고도 수동 선배열센서를 이용하여 표적의 위치를 효과적으로 추정할 수 있다^{4,5}. 그러나 다중경로 신호의 시간차 정보는 실제 잠수함에서 정확히 추정하기가 어려우므로 잠수함에서 획득할 수 있는 다중경로 신호의 정보는 입사각 하나로 제한된다.

본 논문에서는 다중경로 환경에서 잠수함의 선배열소나를 이용하여 잠수함 운용수가 확인할 수 있는 이중허위표적의 입사각 정보만으로 표적의 거리를 추정할 수 있는 기법을 제안한다. 해군의 잠수함 승조원들은 잠수함 운용 중 이와 같은 다중경로에 의한 수신 원추각 차이로 인해 실효적 궤적 근처에 실효적과 유사한 형태의 궤적이 나타나는 이중허위표적(Ghost target) 현상이 나타남을 확인하고 이를 실제 거리 추정에 이용하고 있다. 그러나 표적의 거리 추정을 위해 경험적인 수식 및 보정 테이블을 이용하고 있어 운용에 많은 번거로움이 있는 실정이다. 이에 본 논문에서는 이러한 이중허위표적이 발생하는 신호 전달 경로의 기하학적 구조를 수학적으로 모델링하여, 해석적(analytic)으로 표적의 수평 거리를 산출할 수 있는 방안을 간단한 방정식(closed-form equation)으로 나타내었

다. 본 논문에서는 선배열센서를 이용하여 근거리 표적에서 각 경로를 통하여 도달하는 신호들의 입사각이 다르므로 센서에서 추정되는 원추각도 서로 상이하다는 점을 이용하였으며, 경로별 원추각 정보를 이용하여 표적의 거리를 추정하였다. 본 논문에서 고려하는 표적은 잠수함의 주요 표적인 수상함으로 가정하였다. 추정한 원추각 정보와 표적의 거리에 대한 관계식을 다중경로의 기하학적 구조를 통해 수학적으로 유도하였으며, 이러한 기하학적 방정식의 해를 구함으로써 표적의 거리를 산출하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 잠수함의 다중경로 환경에서 발생하는 이중허위표적 현상에 대해 설명하며, 제안한 거리 추정 알고리즘을 3장에서 설명한다. 4장에서는 다양한 시뮬레이션을 통하여 제안 알고리즘의 성능을 확인하며, 5장에서 결론을 맺는다.

2. 다중경로환경에서의 이중허위표적

수중에서는 소음원에 의해서 발생된 음파가 매우 복잡한 경로를 통하여 전달되며, 특히 수심이 낮은 천해에서는 해수면 혹은 해저면에 반사되어 다수의 전달 경로를 발생시킨다. Fig. 1과 같이 잠수함에서 해수면에 위치한 수상표적을 탐지하는 경우 수상표적의 소음은 크게 직접 전달경로(Direct Path)인 Path A와 해저면 반사경로(Bottom-Reflected Path)인 Path B를 통해 전달된다. 이러한 다중경로 현상으로 인해 동일한 소음원에서 발생하는 신호임에도 불구하고 서로 다른 입사각으로 수신되므로, Waterfall 상에는 Fig. 2와 같이 실효적 궤적과는 구분되는 별도의 궤적으로 나타나게 된다. 이러한 현상을 잠수함 승조원들은 이중허위표적이라 칭하고 있다. 본 논문에서는 이러한 이중허위표적 정보를 이용하여 표적신호의 수신경로를 산출하고, 이로부터 표적까지의 수평거리를 산출하는 기법을 제안하고자 한다.

선배열소나를 이용하는 경우 1차원 배열센서의 기하학적 특성에 따라 선배열센서를 중심으로 한 원추형태의 입사각만을 측정할 수 있으므로, 배열센서를 기준으로 좌/우/상/하의 구분이 모호하게 된다. 이러한 선배열소나의 구조적 제약으로 인하여 Fig. 2와 같이 자함을 중심으로 대칭인 방위에 Mirror 표적이 나타나는 현상을 확인할 수 있다. 그러나 본 논문에서 다루고자 하는 이중허위표적은 Mirror 표적과는 달리 실효적

변에 일정한 방위각 차(Bearing Difference)를 가지고 나타나게 된다. 이는 다중경로를 통하여 근거리 표적의 신호가 선배열센서에 도달하는 경우 Fig. 1과 같이 신호의 입사각이 서로 차이가 나는 현상에 기인하며, 표적의 수평방위가 β 라고 할 때, α_A 및 α_B 의 고각으로 입사하는 다중경로신호는 선배열센서에서 각각 θ_A 및 θ_B 의 원추각으로 측정되어 Waterfall 다이어그램 상에 Fig. 2와 같은 형태로 전시된다.

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

$$\cos\theta_A = \cos\alpha_A \cos\beta \tag{1}$$

$$\cos\theta_B = \cos\alpha_B \cos\beta \tag{2}$$

Fig. 1의 다중경로환경에서 자함 선배열소나의 중

심과 표적이 존재하는 수직 평면인 $A-B$ 간 단면상의 다중경로 신호를 Fig. 3에 나타내었다. 수중에서의 음속을 c 라 할때, Fig. 3에서 서로 다른 경로를 따라서 입사하는 직접경로신호와 해저면 반사경로 신호의 표적신호의 신호 도달 시간차 τ 는 다음의 식 (3)과 같다.

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

실제 해양환경에서는 수심에 따라 음속이 다양하게 변화하나, 본 논문에서는 음속이 일정하다고 가정한다. 다중경로는 해저면 반사손실을 감안, 직접 전달경로와 해저면에 1회 반사되는 경로만을 고려하며, 해역의 해저면은 평평하다고 가정한다. 해역의 수심은 H 이며, 잠수함인 자함은 해저면으로 부터의 고도 D 에 위치하고, 수상함인 표적은 자함으로부터 수평거리 R 에 위치하고 있다.

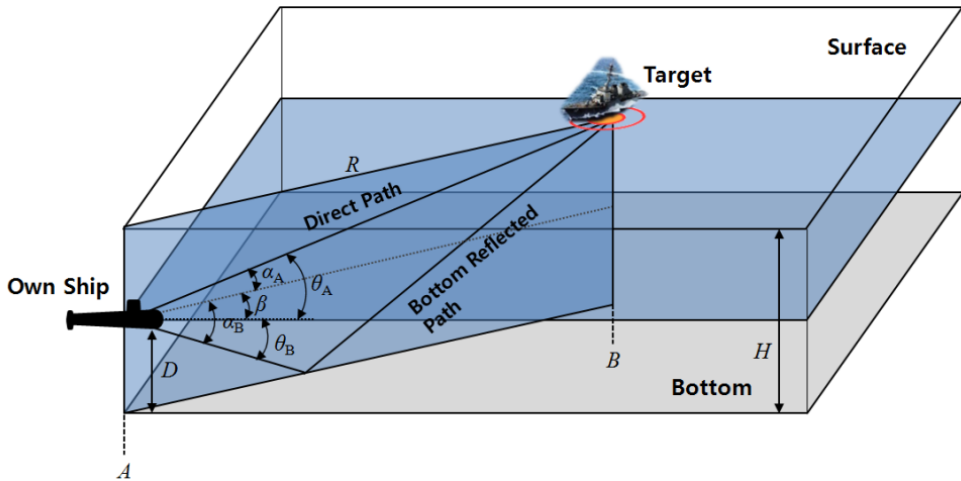


Fig. 1. Signal propagation in multipath environment



Fig. 2. Real target track and ghost target track displayed on waterfall

3. 제안 알고리즘

제안 알고리즘은 다중경로신호의 원추각 추정 및 표적의 거리 추정으로 구성된다. 표적의 원추각 추정의 경우 본 논문에서는 실제 잠수함 운용상황에서 별도의 추가적인 처리 없이 Waterfall 다이어그램 상의 방위각 차이 확인을 통해 추정되는 것으로 가정하였다. 그리고 추정된 원추각 및 자함정보 및 해역 수심 등의 정보로부터 표적의 위치추정을 위한 기하학적 방정식을 유도하고 해를 구함으로써 표적의 위치를 추정한다.

3.1 원추각 추정

일반적으로 원추각 추정을 위해서는 MUSIC 및 ESPRIT 등의 도달방위각(DOA)추정기법을 적용하여 정확한 방위각을 추정한다. 그러나 이와 같은 처리를 위해서는 실제 센서 레벨의 원 데이터(Raw Data)가 획득되어야 하며, 일정한 관측시간 동안 연속적으로 자료가 축적되어야 하므로, 실제 잠수함 임무 중에 직접 적용하기에는 많은 제약조건이 따른다. 따라서 본 논문에서는 별도의 원추각 추정 알고리즘의 추가적인 적용 없이 콘솔 운용자화면의 Waterfall 다이어그램 상에 Fig. 2와 같은 형태로 나타나는 실효적과 이종허위표적의 방위각 차이를 운용자가 직접 확인하여 값을 입력하는 것으로 운용개념을 가정하였다.

3.2 표적위치 추정

선배열센서로 입사되는 각 다중경로 신호의 경로 길이 R_A 및 R_B 는 Fig. 3에서 나타난 기하학적 구조에 따라 다음 식 (4), (5)와 같이 각각 표현할 수 있다.

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

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

다중경로의 원추각 정보는 Fig. 3에서 나타난 다중경로의 입사각 정보 및 식 (1), (2)를 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\cos\theta_A = \frac{R\cos\beta}{\sqrt{R^2 + (H - D)^2}} \quad (6)$$

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

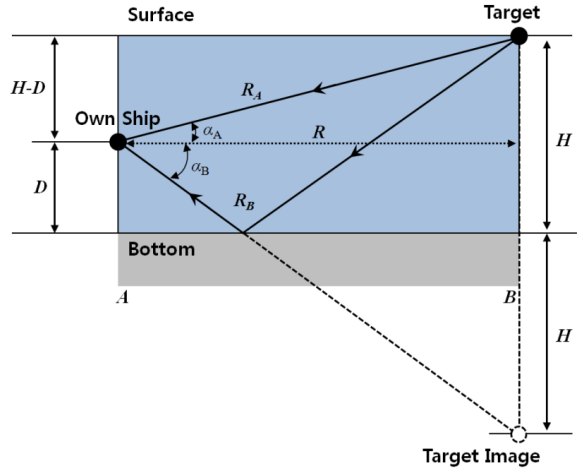


Fig. 3. Multipath signal

위와 같이 다중경로환경의 기하학적 특성을 수학적으로 나타낼 수 있으며, 식 (6), (7)에서 $R\cos\beta$ 는 같으므로, 식 (6), (7)을 정리하면 식 (8)와 같이 나타낼 수 있으며,

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

이를 정리하면, 아래 식 (9)과 같은 표적의 수평거리 R 의 값을 별도의 탐색과정 없이 해석적으로 산출할 수 있는 방정식을 구할 수 있다.

$$R = \sqrt{\frac{\cos^2\theta_B(H + D) - \cos^2\theta_A(H - D)}{\cos^2\theta_A - \cos^2\theta_B}} \quad (9)$$

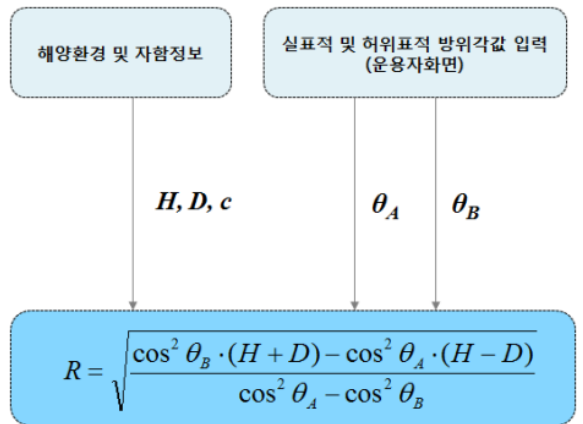


Fig. 4. Summary of proposed algorithm

식 (9)에서 θ_A 와 θ_B 는 각각 실패적의 원추각 및 허위표적의 원추각으로, 소나 전시기의 Waterfall 화면에서 운용자에 의해 입력가능하며, 해역수심 H 와 자함심도 D 는 잠수함 운용자가 자함의 항해센서로부터 정밀 측정치 정보를 획득할 수 있다.

제안 알고리즘을 요약하면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

Step 1. 잠수함에서 측정한 해양환경 및 자함정보 및 운용자화면에서 확인한 실패적 및 허위표적의 방위각 값 측정

Step 2. 식 (9)를 이용하여 표적의 수평거리를 산출

4. 모의실험

본 절에서는 제안한 거리추정 알고리즘의 성능을 분석하기 위한 모의실험 결과를 설명하였다. 자함은 수심 400 m 해역에 해수면 기준 200 m 심도에서 잠항중인 잠수함이며, 자함의 소나는 센서가 등간적으로 배치된 선배열센서를 가정하였다. 표적은 자함으로부터 수평거리 1200 m 떨어진 지점에 위치하는 수상함으로 설정하였으며 표적의 방위각에 따른 거리추정 성능 분석을 위해 자함의 heading 기준 상대방위 40°와 80°로 표적 방위를 다르게 하여 모의실험을 수행하였다. 표적 신호의 중심주파수는 100 Hz, 신호대 잡음비(SNR)는 0 dB로 설정하여 100회의 몬테카를로(Monte-Carlo) 시뮬레이션을 수행하였다. 수중환경에서의 음파전달 모델은 음선모델(Ray model)을 적용하였다. 해양환경은 잠수함에서 측정 가능한 오차허용 범위를 고려하여 시뮬레이션 하였다.

제안 알고리즘을 적용하여 표적의 거리를 추정한 결과를 Fig. 5와 6에 나타내었다. Fig. 5의 결과는 표적의 방위각이 40°에 위치하는 경우로, 실제 거리값인 1200 m 중심으로 거리 추정값이 오차범위 ± 50 m 이내에 포진하고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 6의 결과는 표적의 방위각이 80°에 위치하는 경우로, 상대적으로 거리 추정오차가 매우 커짐을 확인할 수 있다. 이는 표적의 방위각이 90°에 근접 할수록 다중경로 입사각에 따른 원추각 θ_A , θ_B 의 서로 가까워져서 원추각 값의 차이가 감소함으로, 제안 알고리즘을 적용할 수 있는 전제조건이 만족되지 않기 때문이며, 식 (9)에서 분모 항이 0이 되는 조건이므로, 이 경우에는 정확한 거리 추정이 불가능하게 된다.

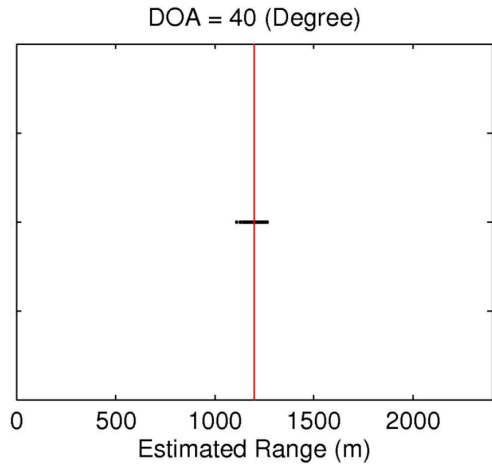


Fig. 5. Target range estimation result(DOA 40°)

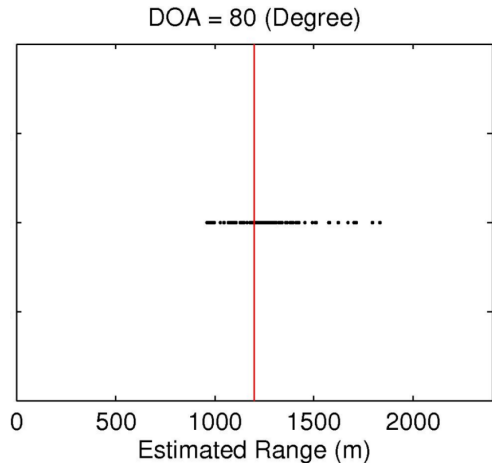


Fig. 6. Target range estimation result(DOA 80°)

Fig. 7과 Fig. 8은 표적의 방위각 및 거리를 변화하면서 표적의 거리추정 성능을 분석한 결과이다. 추정 오차는 제공된 평균제곱오차(RMSE)로 나타내었다. Fig. 7은 표적의 방위각을 20°에서 120°까지 변화시키면서 거리추정오차를 분석한 결과이다.

Fig. 6의 결과에서 분석한 것과 마찬가지로, 표적 방위각이 90° 근처인 경우 다중경로 효과가 거의 사라져서 식 (9)의 결과가 무한대로 발산하게 되는 조건으로 거리추정오차가 커지며, 결과는 90°를 기준으로 대칭으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8은 표적의 거리를 근거리에서 원거리로 변화시키면서 거리추정오차를 분석한 결과이다. 표적이 자함에서 멀어지는 원거리 환경이 될수록 표적의 거리추정 성능이 저하되는

양상을 보이는데, 이는 표적이 원거리에 위치하는 경우 다중경로로 인한 입사각 차이와 도달 시간차가 작아지게 되므로 서로 구분이 어렵게 되는 현상이 발생하며, 이는 역시 제안 알고리즘의 초기 전체조건을 만족하지 못하는 상황이 되기 때문으로 판단된다.

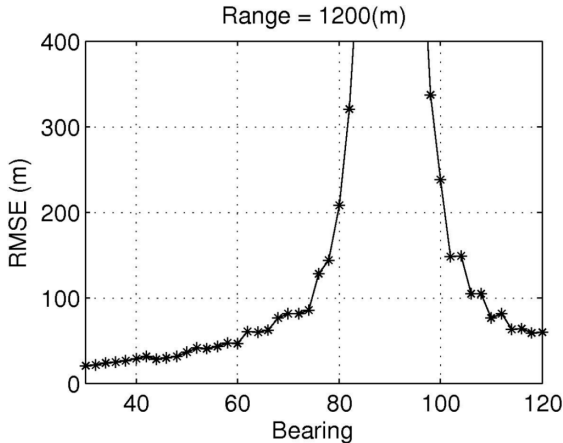


Fig. 7. RMSE of range estimation for DOA variation (target range 1200 m)

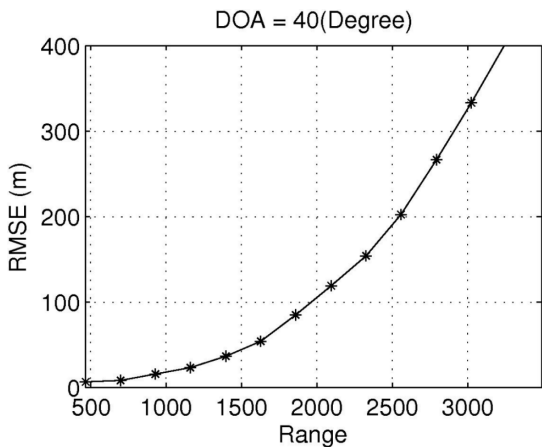


Fig. 8. RMSE of range estimation for range variation (DOA 40°)

5. 결론

본 논문에서는 근거리 다중경로환경의 잠수함에서 탐지되는 이중허위표적 현상을 이용하여 표적의 거리를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서는

근거리 다중경로환경의 기하학적 특성을 수학적으로 분석하여 관계식을 유도하고 이로부터 표적의 거리를 추정하였다. 또한 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 제안 알고리즘의 성능을 분석하였다. 제안 알고리즘은 원추각을 분리할 수 없는 90° 부근을 제외하고는 비교적 만족할 만한 오차범위에 수렴하는 거리 추정 결과를 보였으며, 실제 잠수함에서 간단한 연산으로 표적 거리 산출을 위한 초기치 확보 및 TMA 등의 보조적 수단으로의 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 본 논문은 기존에 이중허위표적에 의한 표적의 거리를 잠수함 승조원들이 경험적 지식을 근거로 산출하던 것을 수학적 이론에 기반하여 해석적으로 표적의 거리를 산출할 수 있게 하는데 그 의의를 가진다 판단된다. 추후에는 본 기법을 수심에 따라 음속이 변화하는 비균일 음속 환경에 대한 적용하여 보다 실제적인 거리추정 기법에 대한 연구를 진행하고자 한다.

References

- [1] D. H. Johnson and D. E. Dudgeon, Array Signal Processing : Concepts and Techniques, Prentice Hall, 1993.
- [2] 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, July 1989.
- [3] R. O. Nielson, Sonar Signal Processing, Artech House, 1991.
- [4] 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, March 1994.
- [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 Nav., Vol. 149, No. 4, pp. 202-206, 2002.
- [6] S. H. Lee, 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, 2006.