

# 위상 스펙트럼에 의한 USBL 수중위치 추정기법 연구

## USBL Underwater Positioning Algorithm using Phase Spectrum

이 용 곤\*                      이 상 국\*\*                      도 경 철\*  
 Yong-Gon Lee              Sang-Kuk Lee              Kyeong-Cheol Dho

### ABSTRACT

Underwater sensor accuracy test which measures the detection range and bearing accuracies of sonar simulates sonar transmitting ping and underwater radiating noise of target vessels. In this test, because the position of sonar target is the reference position of test, the sonar target position should be precisely estimated. Hence, this paper suggests to apply USBL algorithm which adopts cross phase spectrum of received sensor signals, and presents its performance by range and bearing estimation simulations. As a result of simulations, suggested algorithm shows good accuracy for underwater sensor accuracy test near 5dB SNR.

주요기술용어 : Sonar Target, USBL(Ultra Short Base Line), Cross Phase Spectrum, Position Estimation

### 1. 서 론

함정에 탑재된 소나, 레이더, 전자전 장비, 광학장비 및 자이로 등은 아함이 적함의 위치를 올바르게 탐지하기 위한 가장 기본적인 센서들이다. 센서의 탐지성능이 정확하지 못하다면 적함을 조기 탐지하지 못할 뿐만 아니라 탐지된 적함이라 하더라도 잘못된 공격으로 인하여 오히려 아함의 존재를 적에게 노출시키는 치명적인 결과를 초래한다. 그러므로 함정 탑재 센서들은 항상 교정된 상태에서 전투태세를 갖추어야 하고, 이를 위해 센서정확도 시험은 센서의 방위탐지 및 거리탐지 정확도를 측정하여 센서 교정 정도를 판단하는 시험평가이다.

센서정확도 시험은 센서가 탐지하는 표적 위치를

별도의 외부 계측장비에 의해 측정함으로써 수행된다. 함정센서가 탐지한 값과 별도 계측장비에 의해 측정된 값을 비교하고 그 차이에 의해 센서의 탐지 방위 및 탐지거리 정확도를 평가한다.

함정 탑재 센서 가운데 소나는 수중센서이므로 탐지정확도 시험을 위하여는 수중에서의 소나 신호 및 피측정함 수중방사소음을 모사하기 위한 별도의 소나표적체계가 필요하다.

소나표적체계는 한국의 해역환경과 여건상 표류형으로 운용된다. 그러므로 표적체계를 운용하는 시험선과 함께 표류함에 따라 소나 표적의 위치는 매시각 가변된다. 이는 정확도 시험의 기준이 시간에 따라 변한다는 의미가 되므로, 오차를 최소화시키기 위해서는 소나표적의 위치를 정밀하게 측정하여야 한다.

본 논문에서는 소나표적체계의 위치를 정밀 추적하기 위한 수중위치추적 기법에 관하여 연구한다.

\* 국방과학연구소 연구원

\*\* 국방과학연구소 선임연구원

특히 본 논문에서는 좁은 센서간격을 갖는 USBL기법을 정립하고 위상 스펙트럼에 의한 방위추정 알고리즘을 제안한다. 그리고 제안 알고리즘은 최소자승 오차 기법에 의해 방위추정 정확도를 향상시킨다.

일반적으로 구성 가능한 USBL 센서 배열에 대하여 모의 신호를 이용한 시뮬레이션으로 제안 알고리즘의 성능을 검증한다.

## 2. 소나표적체계의 수중위치추정 개념

소나표적체계 개념은 소나음향을 송수신하는 수중 센서의 운용방식에 따라 고정형(fixed type)과 표류형(drift type)으로 구분한다.

고정형은 음향센서를 해저에 고정하고 육상 관측소에서 케이블을 통하여 송수신 음향을 제어한다. 그러나 태풍과 어로작업이 잦은 해역에서는 수중센서 운용유지가 어려우므로 고정적인 해상시험소가 없는 한국 해역 환경에서는 채택하기 어려운 방식이다.

표류형은 소나표적체계를 시험선에 탑재하여 시험해역으로 이동한 다음 음향센서를 케이블로 연결하고 수중에 부설하여 운용하는 방식이다. 음향센서는 시험선으로부터 약 100m 또는 200m 내의 거리에서 수중 부설된다. 표류형은 시험 해역으로의 이동이 가능하므로 환경적 제약은 적게 받으나 시험선과 함께 수중센서가 표류하므로 매시간 위치가 변하게 된다. 이는 정확도를 시험하는 기준센서가 시간에 따라 계속 변한다는 의미가 되므로, 소나표적 수중위치의 정밀추적을 필요로 한다.

결과적으로, 한국 해역 여건상 소나표적체계는 표류형으로 운용되어야 하지만, 센서정확도 시험의 정확도 증대를 위해 가변되는 소나표적 수중 음향센서 위치를 실시간으로 정밀 추정하기 위한 기법이 반드시 개발되어야 한다.

수중위치추정 개념은 해저 및 수중 구조물의 설치

및 관리와 소나에 의한 항해 등을 위하여 1960년대부터 활발하게 연구가 이루어져 왔다[1]. 최근에는 수중 추적에 관한 정확도 향상 및 수동 위치추적 방식 위주로 연구가 이루어지고 있다[1,2,3].

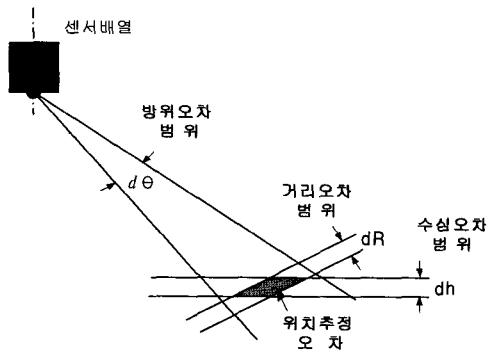
수중 위치추적 방식은 추적용 센서간 간격에 따라 장거리 기선(Long Base Line, LBL), 단거리 기선(Short Base Line, SBL), 초단거리 기선(USBL) 방식으로 구분한다[1].

LBL 수중위치추정 기법은 수백 미터로부터 넓게는 수십 킬로미터까지 대체로 넓은 영역에서 사용되는 추적체계이다. 센서간 간격을 넓게 하여 추적용 센서를 수중에 부설해야 하므로 센서 설치 및 회수에 시간과 인력이 과다 소요된다. 또한 광역추적 방식이므로 소나표적과 같은 근거리 실시간 위치추정에는 부적합한 방식이다.

SBL 수중위치추정 기법은 수미터 또는 수십미터 간격으로 추적용 음향센서를 부설하거나 시험선 선저에 부착하여 근거리 표적의 위치를 추적한다. 제한된 여건에서 비교적 높은 정확도를 보유하지만 3개 이상의 음향센서를 부설하거나 부착 가능한 환경이 마련되어야 운용 가능하다.

USBL 수중위치추정 기법은 수십 센티미터의 좁은 간격으로 구성된 하나의 음향센서배열을 수중에 부설하거나 시험선 선저에 부착하여 근거리 표적의 위치를 추적한다. 단일 센서배열이므로 설치가 용이하지만 센서간격이 좁아 정확도 측면에서는 불리해질 수 있다.

소나표적체계를 표류형으로 운용하는 경우에는 시험선 선저에 추적용 음향센서를 부착하여야 한다. SBL기법을 채택하기 위하여는 적어도 3개 이상의 음향센서를 선저에 부착하기 위한 음향돔(acoustic dome)을 수미터 또는 수십미터 간격으로 보유하여야 한다. 그러나 일반적인 선박은 이와 같은 구성의 음향돔 보유가 어렵기 때문에 하나의 음향센서배열을



(그림 1) USBL 위치추정 오차 개념

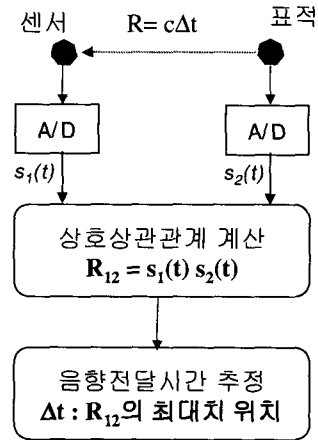
운용하는 USBL이 적합하다.

그러므로 본 연구에서는 단일 음향센서배열 설치에 의해 근거리 위치의 실시간 추정이 가능한 USBL 기법을 소나표적체계 센서위치추정 기법으로 선정한다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 USBL기법은 센서간격이 좁아 정확도 측면에서 불리할 수 있으므로, 이를 극복하기 위해 위치추정 정확도를 증대시키기 위한 연구가 수반되어야 한다.

### 3. USBL 수중위치추정 기법 제안

USBL 수중위치추정 기법의 오차 개념은 그림 1과 같다. 방위오차와 거리오차 및 수심오차가 추정 변수로 영향을 미치게 된다. 개별적으로 추정되는 추정변수는 그림 1에서와 같이 오차범위가 매우 넓은 값들을 가진다. 그러나 추정변수들을 개별로 추정한 다음 이들을 조합하게 되면 그림 1과 같이 오차가 감소한다.

그러므로 본 연구에서는 추정변수를 개별적으로 추정한 다음 이들을 조합하는 방식을 택하여 추정 오차가 최소화되도록 한다. 이는 거리추정과 방위추정 및 수심추정을 별도로 수행함이 정확도 측면에서 유리함을 의미한다. 수심추정은 표적에 내장된 수심 센서의 값을 그대로 이용함이 보편적인 방식이므로,



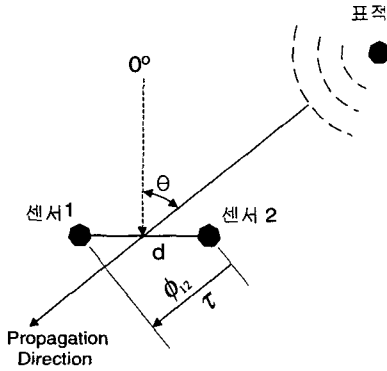
(그림 2) USBL 거리추정 개념

본 연구에서는 거리와 방위를 각각 분리하여 정밀 추정하고 이들 결과와 수심정보를 조합하여 최종적으로 표적 위치를 추정하도록 한다.

USBL에 의한 거리추정기법은 그림 2와 같은 개념으로 제안한다. 표적에서 송신한 신호와 추적용 센서가 수신한 신호의 전달시간을 상호상관관계(cross-correlation) 검출 방식으로 계산하고 수중음속을 곱하여 거리를 계산한다. 소나표적체계에서는 음향센서와 추적용 센서가 비교적 근거리에서 위치하여 송수신 음향의 신호대 잡음비가 높으므로 상관관계 검출 방식이 유용할 뿐만 아니라 측정치를 일정 시간 내에서 평균하는 경우 매우 높은 정확도로 거리추정이 가능하다.

USBL에 의한 방위추정 개념은 그림 3과 같다. 표적으로부터의 음향이 각 센서에 수신되면서 센서간격에 의해 발생하는 시간지연(time delay) 또는 두 센서간의 위상지연(phase delay)에 의해 방위  $\theta$ 를 추정한다.

센서간격이  $d$ 인 경우 시간지연에 의한 방위추정은 식(1)에 의해 계산된다. 여기서  $\tau$ 는 두 센서에 도달하는 표적신호의 시간지연이다.



[그림 3] USBL 방위추정 개념

$$\sin \theta = c\tau/d \quad (1)$$

위상지연에 의한 방위추정은 식(2)에 의해 주파수 영역에서 계산된다. 여기서  $\phi_{12}$ 는 두 센서에 도달하는 표적신호의 위상지연이다.

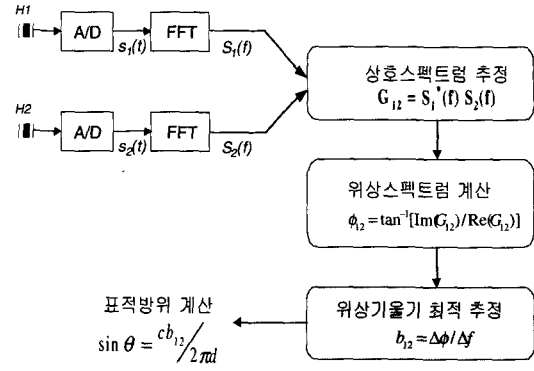
$$\sin \theta = c\phi_{12}/2\pi fd \quad (2)$$

일반적으로 센서 간격은 수신하고자 하는 신호 주파수의 반파장 이하로 구성되므로 시간지연은 매우 짧아 산출이 어렵다. 따라서 정확한 방위추정을 위하여는 위상지연을 이용함이 바람직하다[3].

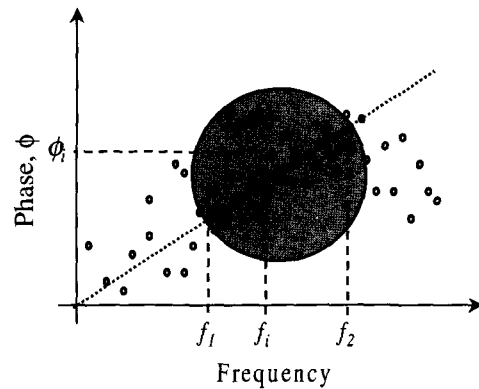
그러므로 본 연구에서는 그림 4와 같이 상호 위상 스펙트럼에 의한 표적방위 추정기법을 제안한다. 두 센서가 수신한 신호를 주파수영역으로 옮겨 상호 스펙트럼을 추정하고, 식(3)에 의해 위상 스펙트럼을 계산한다.

$$\phi_{12} = \tan^{-1} [Im(G_{12})/Re(G_{12})] \quad (3)$$

여기서  $G_{12}(f)$ 는 두 센서가 수신한 신호로부터 예측된 상호스펙트럼이다. 위상 스펙트럼은 시간지연  $\tau$ 와 식(4)의 관계를 가지므로, 이를 주파수영역에서



[그림 4] 위상스펙트럼에 의한 방위추정 개념



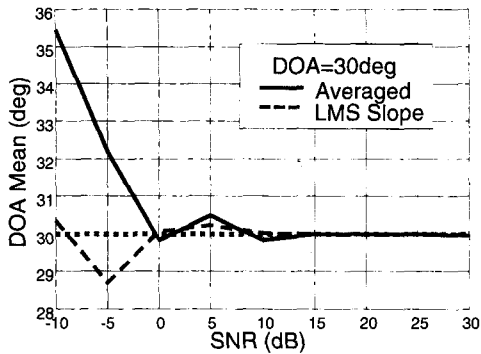
[그림 5] 선형 위상기울기에 대한 측정 위상값의 분포 예  
미분한 위상기울기  $b$ 는 시간지연  $\tau$ 와  $b=2\pi\tau$ 의 관계를 가진다.

$$\phi(f) = 2\pi f\tau \quad (4)$$

결과적으로 표적방위  $\theta$ 는 아래 식(5)에 의해 추정된다.

$$\sin \theta = cb/2\pi d \quad (5)$$

식(4)에서 위상스펙트럼은 주파수  $f$ 에 대해 선형이지만 실측되는 자료는 그림5와 같이 신호 주파수대역 내에서 랜덤한 성질을 가진다.



(그림 6) LMS를 적용한 방위추정 예

그러므로 위상기울기의 오차를 최소화시키면 식(5)에 의한 방위추정 오차가 최소화될 수 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 최소자승오차(Least Mean-Square, LMS) 기법을 도입한다. 이는 식(6)에서 최적화된 기울기  $B$ 를 계산함으로써 수행된다[4,5].

$$B = \left\{ \sum_{i=1}^N (\psi_i - b f_i)^2 \right\}_{\min} \quad (6)$$

식(6)의 LMS를 이용한 경우의 표적방위 추정결과에 대한 효과는 그림 6의 시뮬레이션 결과에 제시되

어 있다. LMS를 적용하는 경우, 낮은 신호대 잡음비에서 더 안정된 정확도로서 방위를 추정함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 LMS기법을 적용하여 방위추정오차를 최소화한다.

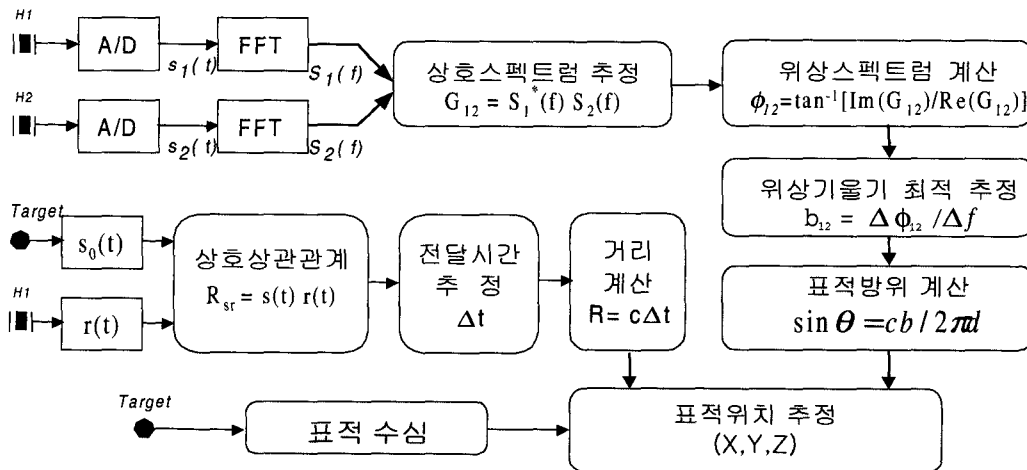
이상과 같이 제안한 기법들을 종합하여 USBL을 이용한 위치추정기법을 제안하면

그림 7과 같다. 거리추정은 상관관계에 의한 시간 지연 추정으로 수행하고 방위는 위상 스펙트럼에 의한 위상지연 기울기로부터 추정한다.

#### 4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

제안된 USBL 위치추정기법의 정확도를 고찰하기 위하여 모의신호에 의한 시뮬레이션을 수행하였다. 추정용 센서배열을 3.75cm 간격의 센서들로 구성하고 표적을 수평 100m 및 수심 30m 위치에 설치한 환경에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

추적용 신호는 1ms의 펄스를 이용하고 추가된 잡음은 백색 가우시안 특성을 갖도록 하였다. 소나의 운용주파수와 센서배열 간격을 고려하여 시뮬레이션



(그림 7) USBL 위치추정기법 알고리즘

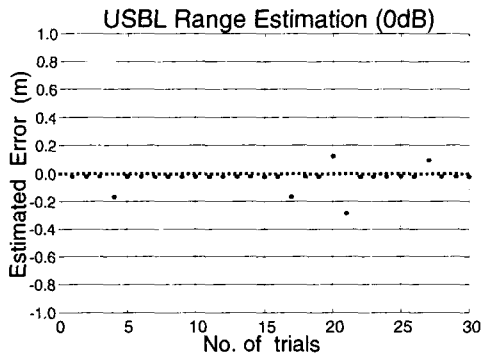


그림 8(a). 신호대 잡음비 0dB

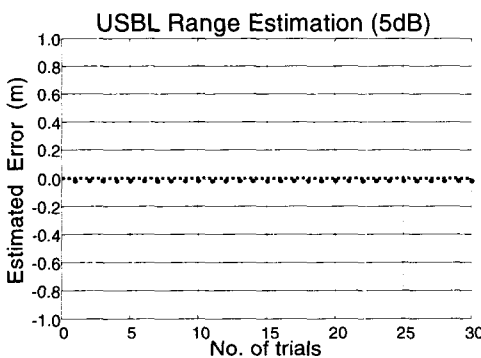


그림 8(b). 신호대 잡음비 5dB

(그림 8) USBL에 의한 거리추정 결과

을 위한 신호 주파수는 20kHz로 선정하였다.

이와 같이 수평거리 100m인 시뮬레이션 환경에서 방위추정오차와 거리추정오차의 한계를 소나표적체계 정확도를 충분히 고려하여 각각 0.3° 및 0.5m로 제한하였다.

신호대 잡음비 0dB 및 5dB인 경우의 거리추정 결과는 그림 8과 같다. 신호대 잡음비가 0dB인 경우 평균오차는 1.609m이며 분산은 0.632m로서 큰 편이지만 신호대 잡음비가 5dB인 경우 평균오차는 0.019m이며 분산은  $10^{-3}$  이하의 매우 작은 값을 가진다. 이는 시뮬레이션 사양의 제한 범위를 초과하지 않는 정밀한 추정에 해당한다. 소나표적체계 음향센서에서 송신되는 음향이 추적용 센서에 도달하는 과정에서 신호대

잡음비는 수십 dB 수준이므로 그림 8(b)에서의 정확도는 실제 해상에서 충분히 획득 가능할 것으로 판단된다.

신호대 잡음비에 따른 방위추정결과는 그림 9와 같다. 전반적으로 신호대 잡음비가 0dB 또는 5dB 이상에서 입사각을 정밀 추정함을 확인할 수 있다.

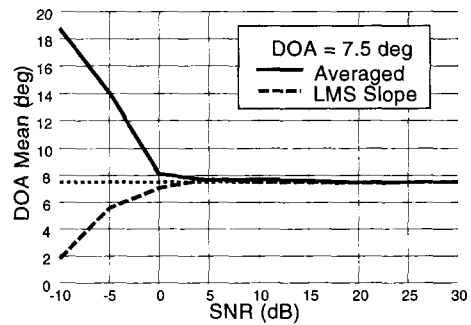


그림 9(a). 입사방위 7.5°

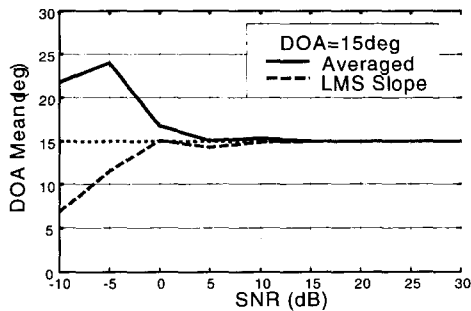


그림 9(b). 입사방위 15°

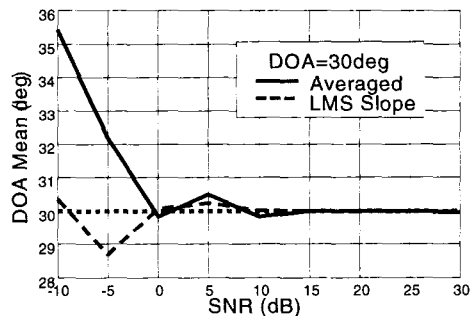


그림 9(c). 입사방위 30°

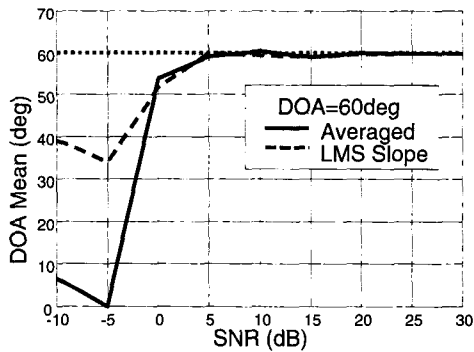


그림 9(d). 입사방위 60°

(그림 9) USBL에 의한 방위추정 결과

신호대 잡음비가 5dB 이상인 경우 4가지의 입사 각에 대하여 평균오차는 0.2° 이하, 분산은 0.02° 이하이다. 이는 시뮬레이션 사양에서 제한하는 범위 내의 값으로서, 제안 알고리즘이 소나표적체계 음향센서 위치추정에 적합함을 의미한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 표류형 소나표적체계의 음향센서 위치를 실시간 정밀추적하기 위한 위치추정 알고리즘을 제안하였다.

제안 알고리즘은 단일 추적용 센서배열을 선저에 부착하는 방식의 USBL을 채택하였다. 제안 USBL기법은 거리와 방위를 개별 추정하고 수심정보와 조합하여 위치를 추정함으로써 추정오차를 최소화한다. 거리추정은 상관관계검출에 의한 시간지연을 이용하

며 방위는 위상 스펙트럼에 의한 위상지연 기울기로 부터 추정한다. 또한 위상기울기의 오차를 최소화하도록 최소자승오차 기법을 도입하여 추정 정확도를 향상시킨다.

제안 알고리즘에 대한 시뮬레이션 결과, 해상에서 확보 가능한 수준의 신호대 잡음비인 5dB 이상에서 거리 및 방위 추정 정확도가 사양을 만족하였다. 따라서 제안 알고리즘이 소나표적체계 음향센서 위치추정에 적합함을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

1. P. H. Milne, Underwater acoustic positioning systems, E. & F. N. Spon Ltd, London, 1983.
2. A. H. Quazi, "An overview on the time delay estimate in active and passive systems for target localization", IEEE Trans. on ASSP., Vol ASSP-29, No.3, pp.527-533, 1981
3. K. Vestgaard and K. Hansen, "Super short baseline hydroacoustic navigation system," Ocean Technology Conference OTC 3100, 1978
4. A. G. Piersol, "Time Delay Estimation Using Phase Data," IEEE Trans. on ASSP., Vol ASSP-29, No.3, pp.471-477, 1981.
5. J. S. Bendat and A. G. Piersol, Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis 2ed, John Wiley