

다중경로 환경에서 PMP기법을 이용한 음원의 위치 추정성능 향상

이호진¹⁾ · 윤경식²⁾ · 신동훈³⁾ · 이균경^{*,1)}

¹⁾ 경북대학교

²⁾ 김천대학교

³⁾ 국방과학연구소

Enhancement of Source Localization Performance using PMP Method in a Multipath Environment

Ho Jin Lee^{*,1)} · Kyung Sik Yoon²⁾ · Dong Hoon Shin³⁾ · Kyun Kyung Lee¹⁾

¹⁾ *Kyungpook National University, Korea*

²⁾ *Gimcheon University, Korea*

³⁾ *Agency for Defense Development, Korea*

(Received 6 January 2014 / Revised 4 March 2014 / Accepted 8 March 2014)

ABSTRACT

Source localization is an important problem in the field of sonar and radar, etc. For the purpose of source localization, two or more spatially separated sensors are often used to measure the time difference of arrivals of a radiating source whose transmitted signal waveform is unknown. The NLS(Nonlinear Least Square) cost function with curve fitting method was proposed recently, which provide robust source localization performance by reducing estimation ambiguity. However, even this algorithm shows degraded performance in a multipath environment. To estimates source localization correctly, source localization algorithm that eliminate the effect of multipath signals is required. In this paper, PMP(Power Matching Procedure) is added to the algorithm, which provides improved source localization performance by properly cutting out the effect of multipath signals. Through simulation the performance of the proposed source localization algorithm is verified.

Key Words : Source Localization, Power Matching Procedure, Multipath Environment, Nonlinear Least Square Cost Function, Passive Sonar

1. 서론

소나, 레이더, 통신 등 다양한 분야에서 음원의 위

* Corresponding author, E-mail: kkleee@ee.knu.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

치를 추정하는 것은 중요한 문제이다. 음원의 위치를 추정하는 것은 두 개 이상의 분산된 센서에 도달하는 음파의 시간지연을 추정함으로써 가능하다^[4]. 수동소나와 같이 음원으로부터 방사된 신호를 이용하여 음원의 위치를 추정하는 기법은 오랫동안 연구되어 왔으며, 그 중 TMA(Target Motion Analysis)는 음원의 위치정보를 비교적 정확히 추정하는 기법으로 잘 알려져 있다. 하지만 TMA는 음원의 위치추정을 위해 긴 시간이 소요되는 단점이 있다. 단시간 내에 음원의 위치추정이 가능한 기법으로 음파면 곡률을 이용한 거리 추정 기법(wavefront curvature ranging)이 있다^[5,6]. 이러한 기법은 센서간의 상호상관함수(cross correlation function)를 이용하여 시간지연을 추정하기 때문에 수신신호가 높은 중심주파수와 제한된 대역폭을 가지는 협대역 신호에 적용할 경우, 시간지연 추정은 비슷한 크기를 가진 다수의 침투치가 발생하는 진동특성이 나타난다. 이러한 높은 진동특성은 잡음에 의한 왜곡이 발생함에 따라 실제 시간지연추정에서 추정모호성을 발생시킴으로써 음원의 위치추정 성능을 저하시킨다. 능동소나와 같이 기준신호가 존재하는 경우 NLS 비유함수를 통해 협대역 특성에 의한 높은 진동특성을 제거할 수 있다^[7]. 하지만 기준신호가 없는 수동소나의 경우 NLS 비유함수에 왜곡이 발생하여 시간지연 추정 성능이 저하된다. 이러한 성능 저하를 줄이기 위하여 2차 curve fitting이 적용된 NLS비유함수를 이용하는 기법이 제안되었다^[8]. 하지만 다중경로 신호가 존재하는 경우, 이러한 기법에 의한 시간지연 추정 성능이 현격히 감소하는 현상이 발생한다. 이는 각 센서에 수신되는 다중경로 신호가 서로 다른 시간지연을 가져서 수신신호간의 상관성이 낮아지기 때문이다. 따라서 다중경로환경에서 정확한 음원의 위치추정을 위하여 다중경로에 의한 영향을 줄일 수 있는 시간지연 추정 기법이 필요하다.

본 논문에서는 다중경로에 의한 시간지연 추정 성능저하를 최소화하기 위하여 각 센서의 수신신호에서 다중경로 신호가 들어오기 전의 직접경로 신호만을 이용하는 새로운 기법을 제안한다. 각 센서의 수신신호에서 직접경로 신호만을 추출하기 위해 중앙값 탐지(Median Detection)를 통해 신호의 시작시점을 찾는다. 그리고 이점을 기준으로 PMP(Power Matching Procedure) 기법을 이용하여 센서간 신호의 파워가 정합(matching)이 되는 지점을 추정함으로써 대략적인 센서간 시간지연을 추정할 수 있다. 마지막으로 PMP

를 통하여 추출된 신호를 curve fitting이 적용된 NLS 비유함수를 이용하여 최종적인 시간지연을 추정한다.

2. 음파면 곡률 측정 기법

음파면 곡률 측정기법은 근거리 음원에 대한 방위(θ), 거리(R)를 추정하는 기법이다. 음원의 위치는 Fig. 1과 같이 선형으로 배치된 센서를 이용하여 두 센서간의 시간지연을 통해 추정할 수 있다. Fig. 1에서 θ 와 R 은 식 (1)과 식 (2)로 주어진다^[6].

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{c(\tau_{21} - \tau_{23})}{2D} + \frac{(c\tau_{21})^2 - (c\tau_{23})^2}{4RD} \right) \quad (1)$$

$$R = \frac{2D^2 - (c\tau_{21})^2 - (c\tau_{23})^2}{2c(\tau_{21} + \tau_{23})} \quad (2)$$

여기서 D 는 센서간격, c 는 수중에서 음속, τ_{21} 과 τ_{23} 은 센서2를 기준으로 센서1과 센서3에서의 시간지연을 의미한다. 따라서 센서간격과 음속이 주어진 경우 음원의 방위/거리는 식 (1)과 식 (2)에서 τ_{21} 과 τ_{23} 을 대입하여 구할 수 있다.

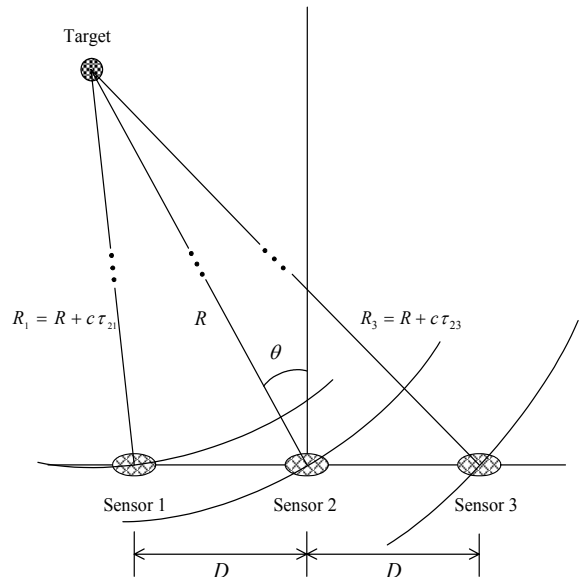


Fig. 1. Signal receiving structure of sensors

3. NLS 비용함수를 이용한 시간지연추정

센서 간 시간지연을 추정하기 위한 기법으로는 상호상관함수가 널리 알려져 있다. 하지만 음원으로부터 수신되는 신호는 높은 중심주파수와 제한된 대역폭을 가지는 협대역 신호의 경우, 이러한 상호상관함수에 의한 시간지연 추정은 비슷한 크기를 가지는 다수의 첨두치가 발생하는 진동특성을 나타내어 시간지연 추정 모호성이 발생하게 된다. 따라서 NLS 비용함수를 이용한 시간지연 추정 기법을 이용하여 협대역 특성에 의한 진동특성을 제거하고 시간지연을 추정한다. NLS 비용함수를 이용한 시간지연 추정은 식 (3)과 같이 NLS비용함수를 최소화 하는 위상변이를 통해 시간지연을 추정한다^[7].

$$C_1(\alpha, w) = \sum_{k=-N/2}^{N/2-1} |Y(k) - \alpha e^{j\omega k} S(k)|^2 \quad (3)$$

여기서 $Y(k)$ 와 $S(k)$ 는 비교신호와 원신호의 푸리에 변환이며, N 은 신호 전체의 길이이다.

NLS비용함수는 능동소나와 같이 기준신호가 있는 경우 효과적으로 진동특성을 제거하지만, 수동소나의 경우 기준신호가 없기 때문에 기준센서에 수신된 신호를 원신호로 가정하면 수신된 신호에 더해진 잡음으로 인해 Fig. 2와 같이 복소비용함수의 왜곡이 발생하여 시간지연 추정오차가 발생한다. 따라서 복소비용함수의 오차를 보정할 추가적인 과정으로 curve-fitting이 적용된 NLS비용함수를 이용하는 기법이 제안되었다^[8].

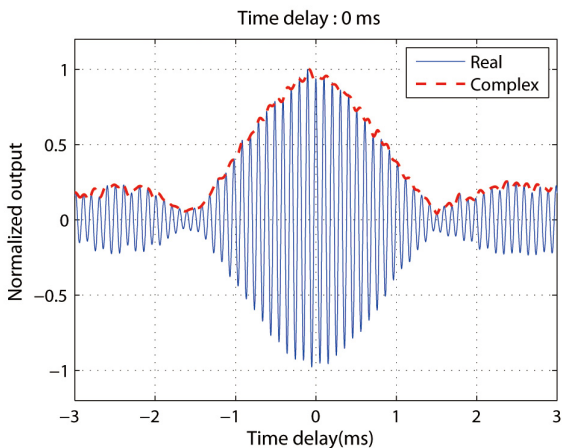


Fig. 2. When there isn't a reference signal, time-delay estimation using NLS cost function

4. 제안된 시간지연 추정기법

실제 음원으로부터 방사된 능동신호는 직접경로뿐만 아니라 해수면 반사나 해저면 반사와 같은 다중경로를 통해서도 수신된다. 이러한 다중경로를 통해서 입사되는 신호는 소나 시스템에서 사용되는 다양한 신호처리 기법에 있어서 열악한 환경을 제공한다. 특히 센서간 시간지연 추정성능의 저하로 음원의 위치추정오차를 발생시킨다. 따라서 다중경로에 의한 센서간 시간지연 추정 성능 저하를 최소화하기 위해 각 센서에 수신된 신호에서 다중경로에 의한 신호가 들어오기 전의 직접경로에 의한 신호만을 잘라서 curve fitting이 적용된 NLS 비용함수를 적용하는 기법을 제안한다. 제안한 기법은 Fig. 3과 같이 Median detection, PMP, NLS 비용함수의 세가지 모듈로 나누어진다.

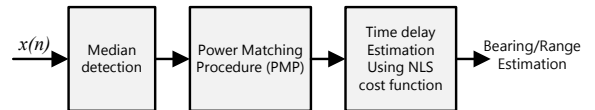


Fig. 3. Blockdiagram of proposed algorithm

4.1 중앙값 탐지

중앙값탐지는 해양환경과 같이 급변하는 배경잡음 속에서 표적으로부터의 능동신호를 탐지하기 위한 기법이다^[9]. 따라서 중앙값 탐지를 통해 센서에 수신되는 표적신호의 시작점을 대략적으로 찾는다.

4.2 Power Matching Procedure

실제 해양에서와 같이 배경잡음의 변화가 심한 경우 중앙값 탐지에 의해서 추정된 신호의 시작점은 실제 신호의 시작점과는 차이가 있다. 이러한 정확하지 않은 시작점을 기준으로 신호를 추출하게 되면 추출된 센서간 신호가 서로 정합이 되지 않기 때문에 상관성이 낮아져 curve fitting이 적용된 NLS비용함수를 이용하여 정확한 시간지연을 추정할 수 없게 된다. 따라서 각 센서간 신호의 상관성을 유지하면서 신호를 추출하기 위한 방식으로 센서간 신호의 파워를 비교하는 PMP기법을 제안한다. 식 (4)는 Fig. 1과 같이 3개의 센서를 가지는 시스템에서 표본화된 센서의 수신신호를 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 x_1(nT_s) &= s(nT_s - \tau_{21}) + \\
 &\quad \alpha s(nT_s - \tau_{m1}) + v_1(nT_s) \\
 x_2(nT_s) &= s(nT_s) + \\
 &\quad \alpha s(nT_s - \tau_{m2}) + v_2(nT_s) \\
 x_3(nT_s) &= s(nT_s - \tau_{23}) + \\
 &\quad \alpha s(nT_s - \tau_{m3}) + v_3(nT_s)
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 $n = 0, 1, \dots, N-1$ 이고, T_s 는 표본화 주기를 나타낸다. 또한 $s(\cdot)$ 는 표적이 방사한 능동신호이며, τ_{2i} 는 기준 센서인 2번 센서에 대한 i 번 센서의 시간 지연이며, τ_{mi} 는 다중경로에 의한 시간지연, v_i 는 각 센서별 잡음신호를 나타낸다.

추출할 신호의 길이는 해양의 수심과 자함의 운용 가능한 수심을 고려하여 단일경로 신호에 가장 근접하게 들어오는 다중경로 신호가 포함되지 않도록 정하여야 하며 이 길이를 L 로 정의한다. 먼저 기준센서인 2번 센서의 수신신호에서 중앙값 탐지로부터 추정된 신호의 시작 시점을 기준으로 길이 L 의 신호를 추출하고, 나머지 두 센서의 수신신호에서는 추정된 시작점을 기준으로 이전 시점과 이후 시점으로 한 샘플씩 이동해가며 길이 L 의 신호를 추출한다. 여기서 샘플의 이동범위는 중앙값 탐지에서 추정된 시작점 간의 시간차이와 실제 센서간 시간지연의 차이보다 길게 정하여야 하며 이 길이를 M 으로 정의한다. 중앙값 탐지에 의해서 추정된 센서별 신호의 시작 시점을 k_p , $p = 1, 2, 3$ 이라고 한다면 Fig. 4와 같이 이 시작점을 기준으로 길이 L 만큼 추출된 신호는 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 x_{2,ref}(iT_s) &= x_2((k_2 + i)T_s) \\
 x_{1,j}(iT_s) &= x_1((k_1 + i + j)T_s) \\
 x_{3,j}(iT_s) &= x_3((k_3 + i + j)T_s)
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 $i = 0, 1, \dots, L-1$ 이고, $j = -M, -M+1, \dots, M-1, M$ 이다.

추출된 신호들 중에서 기준이 되는 $x_{2,ref}$ 와 나머지 센서의 추출된 신호 $x_{1,j}$, $x_{3,j}$ 간의 파워의 차이가 가장 작은 신호들이 서로 정합이 되는 신호들이며, 이를 만족하는 비용함수는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 d_1(j) &= \left| \sum_{i=0}^{L-1} (x_{1,j}(i))^2 - (x_{2,ref}(i))^2 \right| \\
 d_3(j) &= \left| \sum_{i=0}^{L-1} (x_{3,j}(i))^2 - (x_{2,ref}(i))^2 \right|
 \end{aligned} \tag{6}$$

비용함수 $d_1(j)$ 과 $d_3(j)$ 이 최소가 되게 하는 j 값을 각각 j_1 과 j_3 라고 한다면 이 값으로 중앙값 탐지에 의해서 추정된 신호의 시작점을 보정하여 각 센서 신호가 서로 정합이 되도록 추출하기 위한 신호의 시작점은 식 (7)과 같게 된다.

$$\begin{aligned}
 k_1' &= k_1 + j_1 \\
 k_2' &= k_2 \\
 k_3' &= k_3 + j_3
 \end{aligned} \tag{7}$$

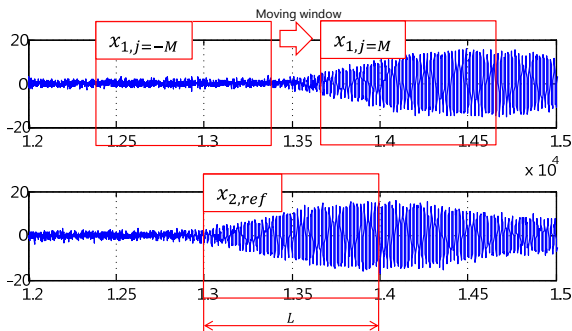


Fig. 4. Extracted signal

PMP에 의해서 보정된 센서 별 신호의 시작점 간의 차이는 중앙값 탐지에 의해서 구해진 시작점간의 차이보다는 실제 센서 간 시간지연에 더 근접한다. 하지만 비용함수가 최소가 되게 하는 값은 노이즈 영향 때문에 정확하게 신호가 정합이 되도록 하는 값은 아니다. 따라서 정확한 센서 간 시간지연을 구하기 위해서는 원 수신신호에서 PMP에 의해서 보정된 신호의 시작점을 기준으로 L 길이의 신호만을 남긴 신호에 curve fitting이 적용된 NLS비용함수를 이용하여 정확한 센서 간 시간지연을 구한다.

5. 모의실험 및 실제데이터를 이용한 검증

본 절에서는 제안한 기법의 성능 검증을 위해서 다중경로 환경에서 기존의 기법과 제안한 기법을 적용하여 위치추정 성능을 비교하였다. 실험에서 세 개의 센서는 15m 간격으로 Fig. 1과 같이 ULA(Uniform Line Array)를 가정하였다. 각 센서에 수신되는 신호는 직접경로신호, 다중경로신호 중 가장 우세한 하나의 해수면반사 신호와 잡음만이 수신된다고 가정하였다. 이때 각 센서에 수신되는 신호는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = s(t) + \alpha s(t + \tau_m) + v(t) \tag{8}$$

여기서 α 는 다중경로 신호의 감쇄율이고, $v(t)$ 는 잡음신호를 나타낸다. $s(t)$ 는 음원이 방사한 능동신호로써 실제 신호 형태를 고려하여 식 (9)와 같이 $w(t)$ 의 가중치가 주어진 CW(continuous wave) 신호를 사용하였으며 가중치 $w(t)$ 는 식 (10)로 정의하였다.

$$s(t) = w(t)\cos(2\pi f_c t) \tag{9}$$

$$w(t) = \begin{cases} 0.5 - 0.5\cos(\pi t / T_w) & 0 \leq t < T_w \\ 1 & T_w \leq t \leq T - T_w \\ 0.5 - 0.5\cos(\pi(t - T) / T_w) & T - T_w < t \leq T \end{cases} \tag{10}$$

여기서 $T_w = T/10$ 이다. 각 센서에 수신되는 잡음신호는 분산이 σ^2 인 백색잡음을 가정하였다.

음원의 위치는 방위(θ) : 13°, 거리(R) : 1.5km, 자함의 수심을 40m, 음원의 수심을 70m로 가정하고 f_c 가 수십 kHz의 모의신호를 생성하였다. PMP기법을 통해 추출된 신호의 길이는(L) 1.5ms이다.

첫 번째 실험은 제안된 기법과 전체 신호를 사용하는 기존의 방법을 적용한 경우의 방위/거리 추정 결과를 300회 몬테카를로 실험을 수행하여 SNR에 따라 비교하였다. 실험결과 제안된 기법의 방위 추정이 전체 신호를 이용하는 방법보다 우수한 성능을 나타내는 것 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 거리 추정에 대한 결과는 Fig. 6에 나타내었으며, 실제거리에 10% 이내의 값을 가지는 추정값에 대한 확률로 표현하였다. 전체신호를 이용하는 경우 거리추정이 제대로 이루어지지 않지만 제안한 기법의 경우 SNR이 20dB이상인 경

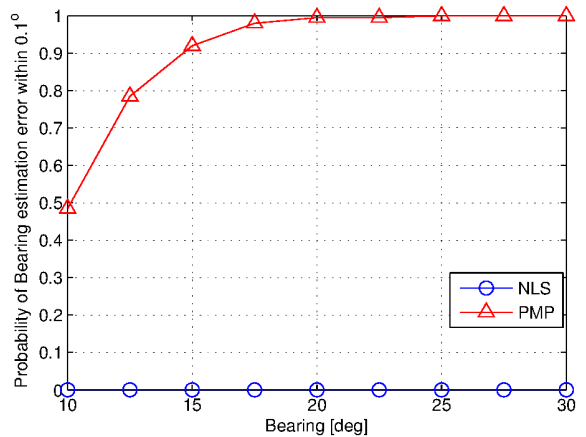


Fig. 5. Bearing estimation performance with respect to SNR

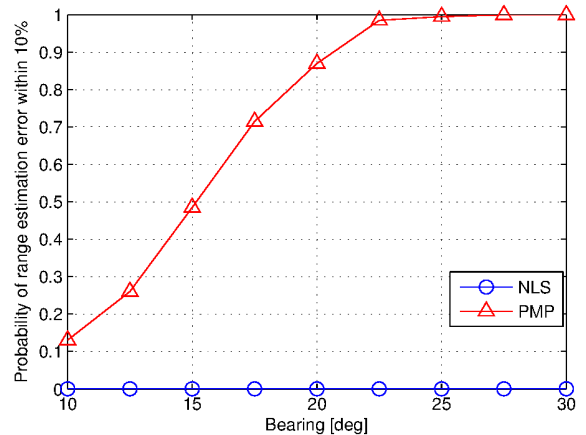


Fig. 6. Range estimation performance with respect to SNR

우 85%이상으로 추정성능을 나타내었다. 거리에 따른 추정성능 지표를 10%이내의 값을 사용한 것은 시간 지연 추정 함수의 첨두치들이 $1/f_c$ 의 간격으로 나타나 거리추정이 이산적으로 분포하게 되어 거리에 대한 추정오차가 크게 나타나기 때문에 이와 같은 기준으로 표현하였다.

두 번째 실험은 각 기법의 방위각에 따른 방위/거리 추정 성능을 비교하였다. Fig. 7과 Fig. 8에서 Y축은 방위 추정의 경우 오차가 0.1°이내, 거리 추정의 경우 오차가 10%이내에 들어올 확률을 나타낸다. 제안한 기법이 전체신호를 사용하는 기법보다 전방위에서 우수한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 기존의

기법이 0° 근처에서 추정 성능이 좋은 것은 모의신호를 생성할 때 시간지연이 대칭을 이루게 되어 나타나는 결과이다. 실제 상황에서는 정확한 대칭 나타나지 않기 때문에 그림과 같은 결과는 나타나지 않을 것으로 예상된다.

실제 해상데이터는 합성한 신호보다 복잡하고 급변하는 배경잡음이 존재한다. 따라서 신호처리에 어려움을 주는 다양한 변수들이 나타날 수 있다. 따라서 제안한 기법을 실제 해상데이터에 적용하여 성능을 검증하였다. 실험에서 사용한 센서는 15m간격으로 배치된 ULA이고, 신호원의 중심주파수가 0.07MHz , 길이는 20ms인 CW 신호를 사용하였다. 제안된 기법에서 추출

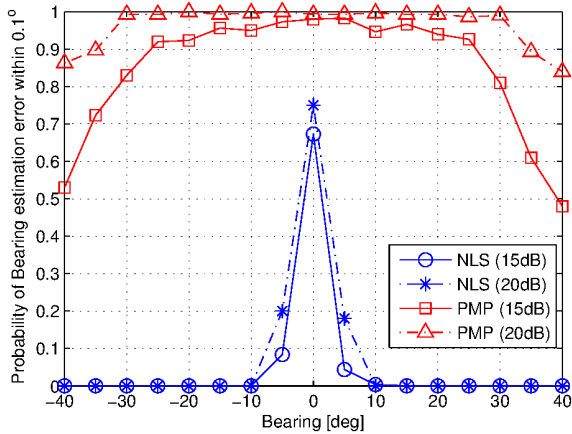


Fig. 7. Bearing estimation performance with respect to Bearing

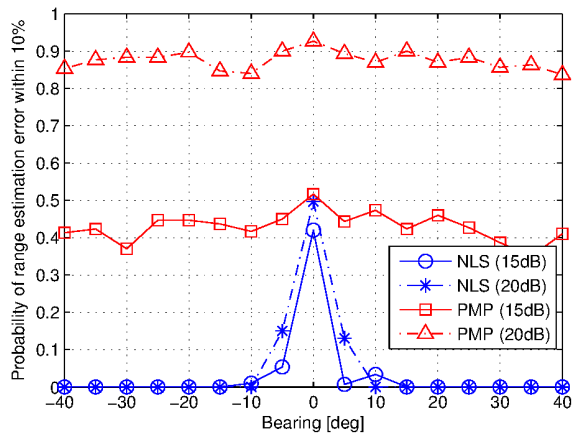


Fig. 8. Range estimation performance with respect to Bearing

된 신호의 길이 L 은 4ms로 설정하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 센서에 수신된 데이터를 나타내었으며, 점선은 중앙값 탐지의 결과이고 실선은 PMP의 결과로써 다중경로 신호가 수신되기 전의 신호만 추출되는 부분이다. 기존의 방법과 제안된 방법을 이용하여 방위/거리 추정 결과를 Table 1에 나타내었다. 결과를 통해 전체 신호를 이용할 때보다 PMP기법을 통한 추출된 신호를 이용할 때 방위/거리 추정 성능이 우수하였다.

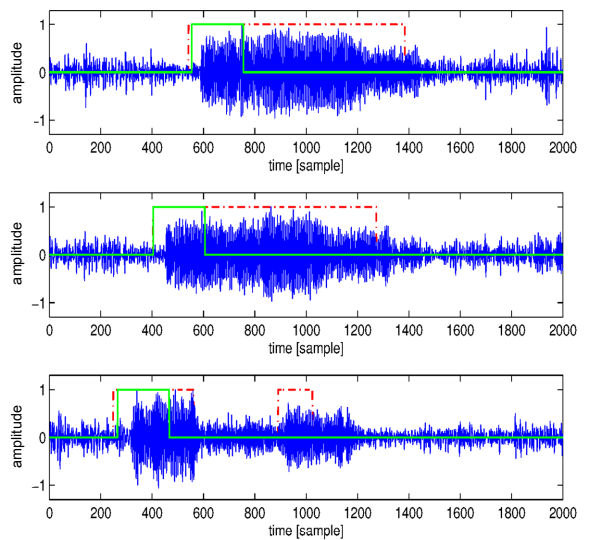


Fig. 9. Ocean Experimental Data I

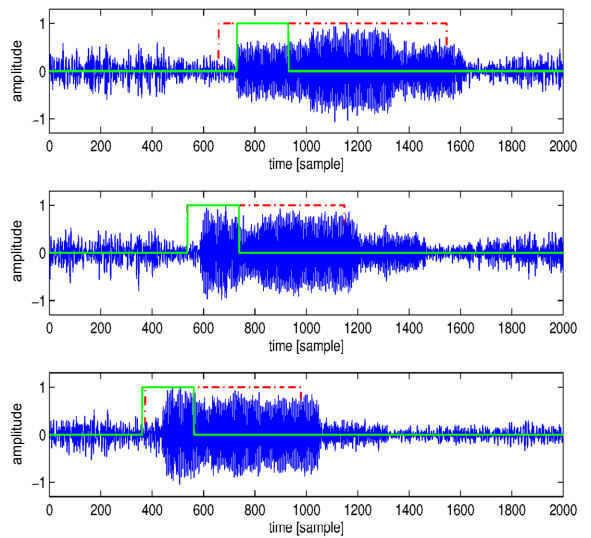


Fig. 10. Ocean Experimental Data II

Table 1. Result of Bearing estimation for ocean experimental data [°]

	함정로그	NLS (error)	PMP (error)
Data I	29.11	26.16 (2.95)	26.98 (2.13)
Data II	30.71	28.17 (2.54)	29.08 (1.63)

Table 2. Result of Range estimation for ocean experimental data [m]

	함정로그	NLS (error)	PMP (error)
Data I	1353.7	430.4 (923.3)	1410.9 (57.2)
Data II	1371.3	1084.6 (286.7)	1410.3 (39)

6. 결론

음원의 위치추정 성능 향상을 위해서 수신신호의 센서간 시간지연이 정확하게 추정되어야 한다. 그러나 실제 해상에서 신호가 전달될 때 직접경로뿐만 아니라 다중경로 신호가 존재함에 따라 각 센서에 수신되는 신호의 상관성이 낮아져 시간지연 추정 성능의 저하가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 다중경로 신호가 들어오기 전의 신호만을 추출하여 기존의 기법에 적용하는 방법을 제안하였다. 이때 신호 추출을 위해 수신 센서간의 신호의 파워를 비교하여 정합이 되는 시점을 추정하는 PMP기법을 제안하였다. 제안된 기법의 성능 비교를 위해 모의실험을 수행하였으며, 실제 해상실험 데이터를 통해 제안한 기법의 성능을 검증하였다. 실험 결과 다중경로 신호에 의한 영향을 제거함으로써 기존의 기법에 비해 향상된 위치추정 성능을 나타내었다. 또한 실제 해상데이터의 결과에서 볼 수 있듯이 제안한 기법을 통해 음원의 위치추정에 있어 성능향상을 이룰 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 2012학년도 경북대학교 학술연구비 및 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.(계약번호 UD090006DD)

References

- [1] Mark I. Jeffree and Anthony R. Collins, "Intercept Detection and Ranging," Proceeding of UDT Europe 2001, 8A.2, June 2001.
- [2] H. Schmidt and J. P. Schwarz, "Low Frequency Intercept Pulse Ranging," Proceeding of UDT Europe 2006, 8A.3, June 2006.
- [3] Brian G. Ferguson, "Improved Time-Delay Estimates of Underwater Acoustic Signals using Beamforming and Prefiltering Techniques," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 14, No. 3, pp. 238-244, July 1989.
- [4] M. Meister and D. Neumeister, "Advanced Ranging Sonar : Passive Range Measurement With Line-Arrays," Proceeding of UDT Europe 2005, 2A.2, June 2005.
- [5] G. C. Carter, "Time Delay Estimation for Passive Sonar Signal Processing," IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. ASSP-29, No. 3, pp. 463-470, June 1981.
- [6] B. G. Ferguson and R. J. Wyber, "Wavefront Curvature Passive Ranging in a Temporally Varying Sound Propagation Medium," in OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition, Vol. 4, pp. 2359-2365, 2001.
- [7] Renbiao Wu and Jian Li, "Time-delay Estimation Via Optimizing Highly Oscillatory Cost Functions," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 23, No. 3, pp. 235-244, July 1998.
- [8] 정태진, "IDRS 시스템에서 Curve Fitting이 적용된 NLS비용함수를 이용한 방위/거리 추정 기법," 한국군사과학기술학회지 제14권 제4호, pp. 590-597, 2011년 8월.
- [9] Brian P. Flanagan and Kenneth W. Parker, "Robust Distributed Detection Using Low Power Acoustic Sensors," Technical Report, The MITRE Coporation, 2005.