

수중 음원 위치 추정을 위한 개선된 최소 분산 정합장 처리 기법

양인식, 김준환, 김기만
한국해양대학교 전파공학과

Improved Minimum Variance Matched Field Processing Technique for Underwater Acoustic Source Localization

In-Sik Yang, Jun-Hwan Kim, Ki-Man Kim
Dept. of Radio Science & Eng., Korea Maritime University
E-mail : insic@shinbiro.com

요 약

수중 음원을 탐지할 때 사용되는 정합장 처리 기법은 복잡한 수중 환경을 고려하여 수행된다. 특히, 최소 분산 처리기를 적용할 경우 행렬의 고유치 문제로 인해 그 성능이 크게 저하될 수 있다. 본 논문에서는 변환 행렬을 이용하여 최소 분산 정합장 처리기의 성능을 개선하였다. 이 변환 행렬은 입력 신호의 공분산 행렬이 역행렬을 구할 수 있도록 하면서 원하는 음원 신호 성분을 향상시키도록 한다. 제안된 방법은 NATO 산하 SACLANT 센터에서 수집된 실측 데이터를 이용하여 그 효율성을 입증하였다.

Abstract

Matched field processing technique is performed by considering complex underwater environments. Specially, the performance of minimum variance processor is greatly degraded by eigenvalue problem. In this paper, we propose the minimum variance matched field processor using shaping matrix. This shaping matrix makes that the input covariance matrix is invertible and enhances the desired acoustic source component. It was proved effectively range/depth localization of the proposed method with vertical array data collected by NATO SACLANT Center north of the island of Elba off the Italian west coast.

1. 서 론

수중에서 음원의 위치를 탐지하고 음원의 여러 가지 정보를 얻기 위해 널리 이용되고 있는 소나는 크게 능동형과 수동형 소나가 있으며, 일반적으로 원거리 음원을 추정하기 위해서 수동형 소나가 쓰이고 있다. 공기중과는 달리 환경 영향이 지배적인 수중에서 시시각각 변하는 수온 및 해류들로 인한 부정합(mismatch) 환경 변수들을 줄이고 정확한 음원의 위치를 추정하는 것이 중요

한 문제이다. 이렇게 복잡한 수중 환경 모델에 근거하여 수중 음원을 탐지하는 정합장 처리(matched field processing) 방법에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다[1].

정합장 처리 기법은 수중에서의 음파 전달 모델로부터 계산된 replica와 실제 수신된 신호 사이에 상관 관계를 구하여 음원을 탐지하는 기법이다. 이러한 정합장 처리 기법에는 크게 Bartlett와 최소 분산 기법이 있다. Bartlett 처리 기법은 실제 환경과 완전 정합시 주 빔을 형성하는 특징을 가지며, 최소 분산 방식은 빔 패턴의 부엽을 줄이

고 원하지 않는 위치에서 나타나는 grating lobe를 줄이기 위한 수단으로 이용되고 있다. 그러나 최소 분산 빔 형성 기법은 음원과 수신단 사이의 불규칙한 음파의 변화로 인한 수신 신호의 파면(wave front) 불일치에 민감한 점이 문제가 되고 있다. 이러한 불규칙한 수중 환경을 고려하여 개선된 성능을 갖는 최소 분산 기법들이 제안되었다[1,2]. 그러나 제안되었던 방법들은 많은 계산량을 갖고 있다.

본 논문에서는 적은 계산량을 가지면서도 개선된 성능을 갖는 정합장 처리 방법을 제안한다. 제안된 방법은 최소 분산 프로세서에 기반을 두고 있으며, 공분산(covariance) 행렬의 변형[4,5,6]을 통해 구현한다. 제안된 방법은 NATO 산하의 SACLANT 연구소에서 수집된 실제 데이터와 수중 음파 전달 모델을 이용하여 그 효용성을 증명하였다.

II. 정합장 처리 기법

정합장 처리에 사용되는 빔 형성 기법에는 실제 수신되는 신호와 음파 전달 모델로부터 계산된 replica를 어떠한 형태로 상관시키느냐에 따라 Bartlett 방식과 최소 분산 프로세서로 나뉜다. Bartlett를 이용한 정합장 처리기는 수중 환경에서 생겨나는 문제로 인해 주 빔의 왜곡 현상과 부엽의 크기가 커져 정확한 음원의 위치 추정이 곤란해 질 수 있다.

최소 분산 처리기는 음원과 수신단 사이의 깊이에 따른 음파 속도의 불규칙한 변화에 강한 성질을 가지고 있는 프로세서로서 (1)식과 같이 표현된다.

$$Z_{MV}(r, z) = \frac{d(r, z)^H d(r, z)}{d(r, z)^H R^{-1} d(r, z)} \quad (1)$$

최소 분산 빔 형성 기법은 음원의 위치를 예측하고 부엽의 크기를 줄이는데 있어서 Bartlett 방법보다 우수한 성능을 갖는다. 그러나, 공분산 행렬 R의 고유치들의 특성상 불안정한 연산으로 인해 성능 저하를 가져온다. 수직으로 배열된 하이드روف온을 이용하여 수집된 실측 데이터로부터 계산된 공분산 행렬 R의 고유치 분포를 보면 일부를 제외한 나머지 0에 가까운 값을 가지는 고유치들로 인해 역행렬 과정에서 정확한 연산이 어렵게 된다. 샘플 행렬의 역 변환 연산 과정에서 full rank를 가져야 정확한 역행렬 연산이 이루어지게 된다.

III. 개선된 표적 탐지 성능을 갖는 최소 분산 처리기

본 논문에서는 기존 최소 분산 처리기의 성능을 개선하기 위한 방법으로 공분산 행렬 변형 개념을 도입하였다. 이 때 실제 수신된 신호의 공분

산 행렬을 변형하기 위한 과정으로서 변환 행렬을 적용하여 최소 분산 기법의 성능을 개선하였다. 이의 근본적인 목적은 원하는 신호와 간섭 신호 사이에 생기는 부엽의 크기를 줄이고 신호 대 잡음비를 증가시키기 위해서이다.

최소 분산 빔 형성 과정에서 공 분산 행렬 R의 역 행렬을 구할 경우 0에 가까운 고유치를 가짐으로서 최소 분산 처리기의 성능 저하를 가져오게 되었다. 이런 현상을 보완하기 위해 기존의 대표적인 방법으로써 수신된 신호의 공분산 행렬에 대각항으로만 가중치를 주어 full rank를 갖도록 하는 것이 있다. 이는 diagonal loading 기법[3-5]으로 널리 알려져 있는 것으로 변형된 공분산 행렬 R_d 은 (2)와 (3)식과 같이 정의된다.

$$R_d = R \cdot T_d \quad (2)$$

$$T_d = \mathbf{1} \times \mathbf{1}^T + D \quad (3)$$

(3)식의 $\mathbf{1}$ 은 모든 원소가 1인 벡터이고, D는 대각항으로만 임의의 값을 갖는 행렬이다. 위의 '·' 연산은 행렬의 원소 대 원소 사이의 곱을 의미하며 아래의 '×'은 외적(outer product) 연산자이다.

본 논문에서는 diagonal loading 뿐만 아니라 공간 영역 개념까지 도입하여 개선된 변형 행렬을 기존의 공분산 행렬에 적용시켜 음원의 위치 추정을 하였다. 공간 영역이 고려된 변형 행렬의 개념은 초기에 레이다에서 간섭 신호를 제거하기 위한 방법으로 도입[3,7,8]되었으며, 이는 간섭 신호가 존재하는 방향에서 간섭 신호의 파워에 따라 계산된 널(null)의 폭을 넓혀서 성능을 향상시킨다. 새로운 공분산 행렬 R_f 는 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$R_f = R \cdot T_f \quad (4)$$

$$[T_f]_{mn} = \frac{-\sin(m-n)\Delta}{(m-n)\Delta} = \text{sinc}((m-n)\Delta/\pi) \quad (5)$$

Δ 는 간섭 신호에 의해 결정된 공간 대역폭으로 널 폭과 간섭 신호의 크기에 따라 변하는 값이다. m과 n은 공분산 행렬의 index 값이다. 본 논문에서는 diagonal loading을 위한 변환 행렬 T_d 와 공간 대역폭을 고려한 변형 행렬 T_f 를 모두 이용한 행렬 T_{df} 를 이용하여 변형된 공분산 행렬 R_{df} 를 구하고 음원의 위치를 탐지하였다. 위의 (5)식과 같이 Δ 만큼 간섭 신호가 존재하는 방위 각에 넓은 대역폭을 둬므로써 원하지 않는 신호의 탐지 및 부엽의 크기를 억압하는데 효과를 가진다.

$$R_{df} = R \cdot T_{df} \quad (6)$$

$$T_{df} = T_d + T_f \quad (7) \quad \text{재배열 방식을 고안해야 할 것이다.}$$

즉 최소 분산 방법의 개선 방법으로 변형 행렬 개념을 도입하여 새롭게 배열된 공분산 행렬 R_{df} 를 이용하여 수중에서 음원의 위치를 탐지하고 수신된 신호의 부엽을 줄여 정합장 처리의 성능을 향상시켰다. 이제 제안된 최소 분산 정합장 처리 $Z_{MMV}(r, z)$ 은 다음과 같다.

$$Z_{MMV}(r, z) = \frac{d(r, z)^H d(r, z)}{d(r, z)^H R_{df}^{-1} d(r, z)} \quad (8)$$

IV. 실험 환경 및 시뮬레이션 결과

제안된 방법의 성능을 검증하기 위하여 실제 수중에서 측정된 데이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 실측된 데이터는 NATO 산하의 SACLANT 연구소에서 수집한 데이터이며 음원의 위치는 거리 5.8 km, 깊이 79 m에 두고 실험하였고, 음원의 주파수는 170Hz로 하여 실험하였다. 그리고 음원의 세기는 약 15 dB의 평균값을 가진다.

그림1은 실제 지층해에서 측정된 수심에 따른 음속 분포를 나타낸 그림이다. 그림 2는 기존의 최소 분산 정합장 처리 결과로서 수신된 실제 신호의 공분산 행렬의 고유치들이 불안정한 값을 가져 수신 신호의 최대 값을 갖는 부분에서 위치 추정이 곤란하다. 그림 3은 diagonal loading 만을 고려한 공분산 행렬 R_d 을 이용한 위치 추정 결과로서 실제 음원과 깊이에 따른 약간의 오차를 두고 위치 추정이 가능하다. 이 때 diagonal loading factor 값은 10^7 으로 하였는데 수신된 신호의 파워를 고려하여 결정한 값이다. 그림 4는 위의 제안된 변형 행렬 T_{df} 를 가지고 음원의 위치를 탐지한 결과이다. Δ 값은 0.01의 값을 사용하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 수직으로 배열된 하이드로폰 어레이에 수신된 신호를 이용하여 개선된 최소 분산 처리기를 제안하고, 그 성능을 지층해 연안에서 채취한 데이터를 이용하여 평가하였다. 수신된 신호의 부엽과 grating lobe를 줄이기 위해 수신된 신호의 공분산 행렬을 변형함으로써 불안정한 역행렬 연산을 안정시키고 음원의 위치 추정 성능이 개선되도록 하였다. 또한 제안된 방법은 기존의 변형된 최소 분산 정합장 처리 방법에 비해 적은 계산량으로도 효율적인 결과를 얻을 수 있다. 그러나 실제 데이터와 replica 벡터의 오정합으로 인한 음원의 부엽의 크기 및 위치 추정이 문제가 되고 있으며 앞으로 모의 실험과 실제 음원의 추정을 통하여 더욱 개선된 공분산 행렬의

참고 문헌

- [1] J.L. Krolik, "The performance of matched-field beamformers with mediterranean vertical array data," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.44, no. 10, Oct, 1996.
- [2] J.L. Krolik, "Matched-field minimum variance beamforming in a random ocean channel," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 92, no. 3, Sept, 1992.
- [3] Joseph R. Guerci, "Theory and application of covariance matrix tapers for robust adaptive beamforming," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.47, no. 4, April 1999.
- [4] R. A. Horn and C. R. Johnson, *Topics in Matrix Analysis*. New York: Cambridge Univ. Press, 1991.
- [5] B.D. Carlson, "Covariance matrix estimation errors and diagonal loading in adaptive arrays," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 24, pp. 397-410, July 1988.
- [6] H. Schmidt, A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, and E. K. Sheer, "Environmentally tolerant beamforming for high-resolution matched field processing: deterministic mismatch," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol.88, pp.1802-1810, 1990.
- [7] R.Mailloux, "Covariance matrix augmentation to produce adaptive array pattern troughs," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 10, pp.771-772, May 1995.
- [8] M. Zatman, "Production of adaptive array troughs by dispersion synthesis," *Electron. Lett.*, vol.31, no.25, pp.2141-2142, Dec. 1995.

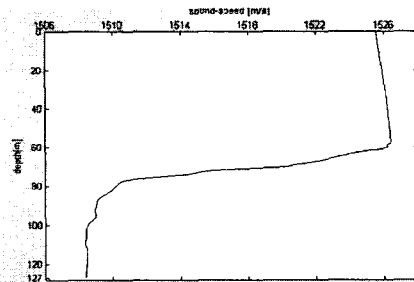


그림 1. 수심에 따른 음속 분포.
Fig. 1. Sound velocity profiles.

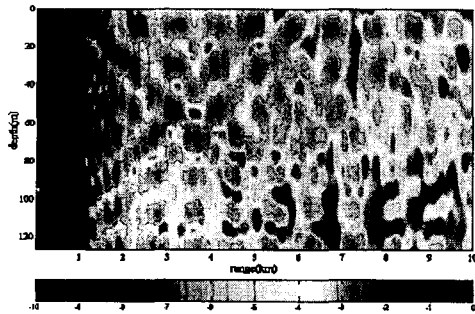


그림 2. 기존의 최소 분산 처리 결과.
Fig. 2. Result of minimum variance matched field processing.

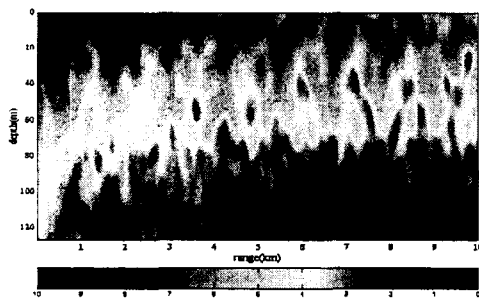


그림 3. Diagonal loading 기법만을 이용한 최소 분산 처리 결과.
Fig. 3. Result of minimum variance matched field processing using only diagonal loading technique.

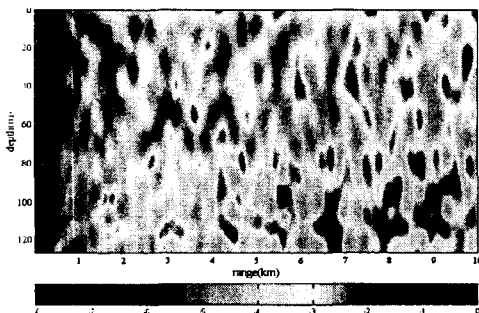


그림 4. 제안된 최소 분산 처리 결과.
Fig. 4. Result of the proposed minimum variance matched field processing.