

적응형 FDSL을 이용한 심해 원거리 음원 위치 추정에 관한 연구

윤정문*, 고희림, 이호준

호서대학교

*yjw940521@naver.com

Research on Long-Range Source Localization Using Adaptive FDSL in the Deep Sea

YIN JINGWEN, Ko Hak Lim, Lee Ho Jun

Hoseo Univ.

요약

정합장처리(Matched Field Processing, MFP)는 수신배열 센서를 활용하여 수중 수동형 음원(passive source)의 위치(거리 및 심도)를 추정하는 기법이다. 그러나 주파수가 증가함에 따라 음파 전달 예측의 불확실성이 커지고, 이에 따라 음원 위치 추정의 정밀도가 저하된다[1]. 최근 고주파 음원 위치 추정의 어려움을 해결하기 위해 차주파수 정합장 처리(Frequency-difference Matched Field Processing, FDMFP) 기법이 많이 활용되고 있다. FDMFP는 차주파수 방법(Frequency-difference method)을 적용하여 고주파 신호를 저주파 대역으로 변환함으로써, 해양 환경 매개변수의 오정합(mismatch)이 존재하는 조건에서도 강한 성능을 나타내는 것으로 알려져 있다. FDMFP는 천해 음원 위치 추정에는 적용 가능하지만, 심해 음원 위치 추정에는 적용하기 어려운 한계가 있다[2]. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 FDMFP를 기반으로 개선된 FDSL(Frequency Difference Source Localization) 방법을 사용하였다. 또한 두 가지 적응형 알고리즘인 MUSIC(Multiple Signal Classification)과 MVDR(Minimum Variance Distortionless Response)를 FDSL과 결합하여 성능을 분석하였다. 수치 시뮬레이션 결과, 음원 수심 1000 m, 전파 거리 100 km 조건에서 FDSL과 적응형 FDSL 방법 모두 정확한 위치 추정 성능을 보였으며, 특히 적응형 FDSL은 side-lobe를 효과적으로 억제함을 확인하였다.

I. 서론

MFP는 배열에서 수신된 음향 신호 벡터와 가정된 음원 위치에서 계산된 이론적 음장 벡터 간의 상관성을 비교하여 음원 위치를 추정하는 기법이다. 이 방법의 위치 추정 성능은 음속 분포, 수심, 해저 지형, 지음향 특성 및 배열의 기울기 등 다양한 해양 환경 변수 정보의 정확성에 의존한다. 그러나 이러한 매개변수의 불확실성이나 오차는 모델 오정합을 야기하여 MFP의 위치 추정 성능을 저하시킨다. 또한, 주파수가 높아지거나 전파 거리가 증가할수록 음파 전달 예측의 불확실성이 증가하며, 이는 음원 위치 추정의 정밀도를 저하시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Wortmann 등은 FDMFP 기법을 제안하였다. 이 기법은 저주파 신호가 고주파 신호보다 환경 오정합에 대해 더 높은 견고성을 갖는다는 특성을 활용하여, 차주파수 기법을 통해 수신 신호를 저주파 대역으로 변환하고 저주파 영역에서 정합장 처리를 수행한다. 그러나 모델 변수가 완전히 일치하더라도, FDMFP는 심해 음원 위치 추정에는 적용하기 어렵다. 본 논문은 심해 원거리 위치 추정 문제를 해결하기 위해 FDMFP를 개선한 FDSL 방법을 적용하였다. 또한 두 가지 적응형 알고리즘과 결합하여 수치 시뮬레이션을 통해 FDSL 기법의 심해 원거리 환경에서의 위치 추정 성능을 분석하였다.

II. 본론

본 논문에서 적용한 모든 음원 위치 추정 방법은 MFP의 확장 형태로 간주된다. MFP의 처리 과정은 다음과 같다.

배열에서 수신된 신호를 FFT로 주파수 영역으로 변환하고, 식 (1)과 같이 계산된 CSDM(cross-spectral density matrix)을 실측음장(measured

field)으로 간주한다.

$$R(\omega) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L P_l(\omega) P_l^H(\omega) \quad (1)$$

여기서 ω 는 각주파수, P_l 은 l 번째 스냅샷의 주파수 영역 음압 데이터이며, H 는 conjugate transpose를 의미한다.

가상 음원의 위치 $x_t = (r_t, z_t)$ 에 대하여 수중음향 전파모델을 이용하여 배열 센서들 위치에서 복제음장(replica field)의 Green's function $g(x_t, \omega)$ 를 계산하고, 그 결과는 식 (2)와 같이 정규화된다.

$$w_{MFP}(x_t, \omega) = \frac{g(x_t, \omega)}{\|g(x_t, \omega)\|} \quad (2)$$

실측음장과 복제음장 간의 상관성을 비교하여 모호성 표면(ambiguity surface)을 생성하고, 그 최대값에 해당하는 위치를 추정 음원 위치로 간주한다. MFP의 모호성 표면은 식 (3)과 같이 정의된다.

$$B_{MFP}(x_t) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K w_{MFP}^H(x_t, \omega_k) R(\omega_k) w_{MFP}(x_t, \omega_k) \quad (3)$$

여기서, K 는 주파수 빈(bin)의 개수를 의미한다.

FDMFP 방법은 배열에서 수신한 음압을 직접 정합장 처리하는 것이 아니라, 차주파수 신호(Frequency-Difference Signal)라는 물리량으로 변환한 후, 정합장 처리를 수행한다. 차주파수 신호는 다음과 같이 정의된다.

$$AP(\omega, \Delta\omega) = P\left(\omega + \frac{\Delta\omega}{2}\right) P^*\left(\omega - \frac{\Delta\omega}{2}\right) \quad (4)$$

여기서 $\Delta\omega$ 는 주파수의 간격을 의미하는 차주파수를 나타내며, $(\cdot)^*$ 는 complex conjugate을 나타낸다.

차주파수 신호의 CSDM은 식 (5)와 같이 정의된다.

$$R(\omega, \Delta\omega) = \frac{AP(\omega, \Delta\omega)AP^H(\omega, \Delta\omega)}{AP^H(\omega, \Delta\omega)AP(\omega, \Delta\omega)} \quad (5)$$

다중경로 환경에서 차주파수 신호의 교차항(cross-term)이 위치 추정 정확도에 영향을 미치므로, 다음 식과 같은 대역폭 평균(bandwidth average) 방식으로 그 영향을 감소시킬 수 있다.

$$\bar{R}(\Delta\omega) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K R(\omega_k, \Delta\omega) \quad (6)$$

여기서 K 는 차주파수 값이 $\Delta\omega$ 인 차주파수 신호의 개수를 나타낸다.

FDMFP의 복제음장 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$w_{FDMFP}(x_t, \Delta\omega) = \frac{g(x_t, \Delta\omega)}{\|g(x_t, \Delta\omega)\|} \quad (7)$$

FDMFP의 모호성 표면은 식 (8)과 같이 정의된다.

$$B_{FDMFP}(x_t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w_{FDMFP}^H(x_t, \Delta\omega_n) \bar{R}(\omega, \Delta\omega_n) w_{FDMFP}(x_t, \Delta\omega_n) \quad (8)$$

여기서 N 은 선택된 $\Delta\omega$ 의 총 개수를 의미한다.

FDSL은 FDMFP를 기반으로 복제음장에도 차주파수 처리를 적용하며, 복제음장은 식 (9)과 같이 표현된다.

$$w_{FDSL}(x_t, \omega_k, \Delta\omega) = g\left(x_t, \omega_k + \frac{\Delta\omega}{2}\right) g^*\left(x_t, \omega_k - \frac{\Delta\omega}{2}\right) \quad (9)$$

복제음장에도 대역폭 평균 및 정규화를 적용하여 FDSL의 모호성 표면을 식 (10)과 같이 정의한다.

$$B_{FDSL}(x_t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N w_{FDSL}^H(x_t, \Delta\omega_n) \bar{R}(\omega, \Delta\omega_n) w_{FDSL}(x_t, \Delta\omega_n) \quad (10)$$

다음으로, FDSL 기법을 두 가지 적용형 알고리즘과 결합한다. MVDR과 결합한 모호성 표면은 식 (11)과 같다.

$$B_{FDSL, MVDR}(x_t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{w_{FDSL}^H(x_t, \Delta\omega_n) \bar{R}^{-1}(\omega, \Delta\omega_n) w_{FDSL}(x_t, \Delta\omega_n)}{1} \quad (11)$$

단일 음원을 고려한 경우, MUSIC과 결합한 모호성 표면은 식 (12)와 같다.

$$B_{FDSL, MUSIC}(x_t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{w_{FDSL}^H(x_t, \Delta\omega_n) \Phi(\Delta\omega) w_{FDSL}(x_t, \Delta\omega_n)} \quad (12)$$

여기서 $\Phi = \sum_{i=2}^M u_i u_i^H$ 는 \bar{R} 의 고유분해를 통해 구성된 잡음 투영 행렬이며, M 은 센서 수이다.

제안된 방법의 위치 추정 성능을 검증하기 위한 수치 실험 환경은 그림 1과 같은 Munk 해양 환경이다.

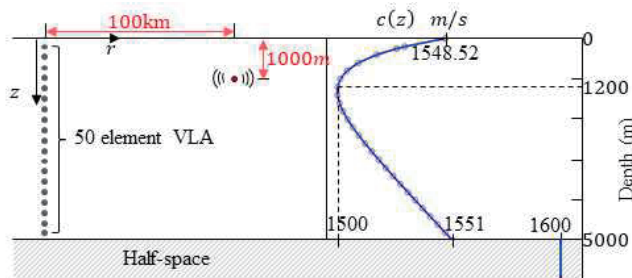


그림 1. 수치 실험 환경 및 음속 분포(Sound-speed profile)

사용한 음원의 주파수는 200~300Hz, 음원 위치는 배열을 기준으로 $x_s = (100 \text{ km}, 1000 \text{ m})$ 이다. 또한 수직 선배열(Vertical Line Array, VLA)은 수심 100m부터 5000m까지 100m 간격으로 50개의 센서로 구성된 것으로 가정하였다. 해양 환경은 수심 5km이고, 해저층은 음향학적 반무한(Half-space) 영역으로 음속은 1600m/s, 밀도는 1.62 g/cm^3 , 감쇠계수는 $0.1 \text{ dB}/\lambda$ 로 설정하였다. 차주파수는 1~5Hz 범위에서 1Hz 간격으로 적용하

였다. 모호성 표면은 거리 및 깊이에 따라 계산되며 거리 0~200km (2km 간격), 깊이 0~2000m (40m 간격) 범위의 격자 위에서 평가되었다. 복제음장은 정규 모드(normal mode) 기반의 KRAKEN 모델을 통해 계산되었다. 네 가지 기법(FDMFP, FDSL, FDSL-MVDR, FDSL-MUSIC)의 성능 분석 결과는 그림 2와 같다. 그림에서 검은색 '+'는 실제 음원 위치를, 'O'는 추정된 위치를 나타낸다.

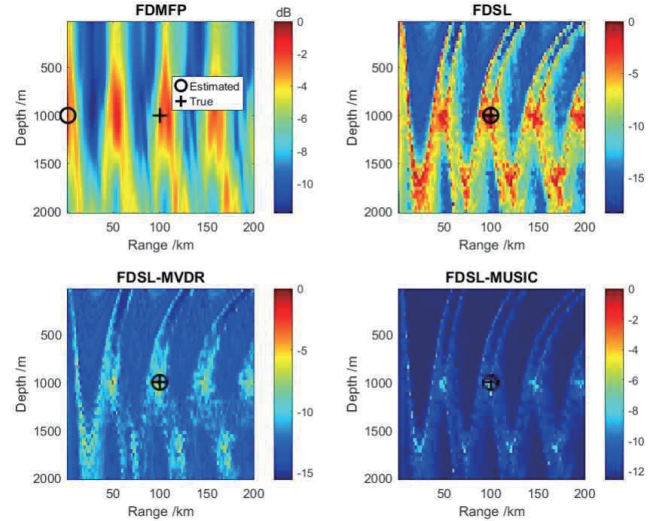


그림 2. 위치 추정 모호성 표면

그림 2와 같이, 심해 원거리 환경에서는 FDMFP 방법으로는 위치 추정이 불가능함을 확인할 수 있다. 반면, FDSL과 적용형 FDSL 방법은 모두 정확한 위치 추정이 가능하며, 특히 적용형 FDSL 방법은 side-lobe를 효과적으로 억제하여 더욱 우수한 성능을 보인다.

III. 결론

본 논문에서는 FDMFP를 개선한 FDSL 기법을 심해 원거리 음원 위치 추정에 적용하여 수치 시뮬레이션을 통해 정확한 위치 추정 성능을 확인하였다. 또한 FDSL과 적용형 알고리즘의 결합을 통해 side-lobe를 효과적으로 억제하여 위치 추정 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 그러나 차주파수 처리 과정에서 발생하는 교차항으로 인해 저SNR 환경에서는 정확한 위치 추정이 어려울 수 있다. 따라서 향후 연구에서는 이러한 교차항의 특성을 분석하고 저SNR 환경에서 위치 추정 성능을 향상시킬 수 있는 방안을 제안할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2024-00436765)

참고 문헌

- [1] Michalopoulou Z H, Porter M B. " Matched-field processing for broad-band source localization, " IEEE Journal of Oceanic Engineering, pp. 384-392.
- [2] Worthmann B M, Song H C, Dowling D R. " High frequency source localization in a shallow ocean sound channel using frequency difference matched field processing, "Journal of the Acoustical Society of America, pp. 3549-3562.