2001年度 第14回 信號處理合同學術大會 論文集 第14卷 1號

수차 모형 배열을 이용한 FFTSA 기법 성능 분석

최 주 평, 이 원 철
숭실대학교 정보통신전자공학부

Performance Analysis of FFTSA Method Using Water pulley Model

Joo-Pyoung Choi, Won-Cheol Lee
School of electronic engineering, Soongsil university
E-mail : pyoung424@amcs.ssu.ac.kr

요약

신호 대 잡음비가 매우 낮은 수중 음원을 탐지하기 위해서는 많은 센서를 갖는 견인 배열 시스템을 운용하여야 한다. 그러나 이러한 경우 수백 미터에 이르는 배열을 견인함이 끌고 다닐 때 파도와 같은 해수면의 움직임과 견인선의 기동 형태에 따라 원하는 배열 형태를 항상 유지할 수 없다. 그러므로 본 논문에서는 실제 수중 환경에서 견인되는 배열의 왜곡된 형태를 시간적으로 뿐만 아니라 공간적으로 통합된 센서의 움직임 근거로 한 상관 형태를 잘 표현한 "Paidoussis" 방정식을 적용하여 이 방정식의 간단화된 형태인 수차 모형(Water pulley)배열을 협대역 목표물 탐지에 이용하였다.[1][2][8]

수차 모형 구조의 배열을 이용하여 사상 기법을 적용하면 수차 모형의 왜곡 특성으로 인해 센서간 간격이 비균일성을 가지는 가상의 선형 배열이 형성되어 진다. 본 논문에서는 사상 기법에 의해 생성된 가상의 선형 배열을 토대로 합성 어패처 방식의 일종인 FFTSA(Fast Fourier Transform Synthetic Aperture) 기법을 이용하여 센서 배열의 입사각 추정 성능에 중대한 영향을 부여하는 코히어런스 주기에 따른 추정 성능의 변화 및 견인함의 이동 경로 변화에 따른 변동 경로 주기에 따른 성능 변화를 분석하였다.

1. 서론

본 논문에서 사용되는 합성 배열 소나 기법은 FFT변환을 통한 빔 영역에서 연속적인 시간 간격에서의 부배열 신호의 코히어런트한 합성 과정을 통하여 수행되어지며 FFT 합성 배열기법(FFTSA)이라 불리어 진다.[3]-[5].

FFT 합성 배열 기법은 견인함에 의해 견인되는 배열 센서 시스템에 대한 신호 이득의 증가 및 입사각 분석 능력의 개선에 목적을 두고 있다. 이를 위해 센서 배열을 빔 영역에서 합성을 수행하며, 이동 부배열을 사용함으로 인해 연속적인 부배열 빔 패턴에서 코히어런트한 조합을 수행한다. 즉, 수신과정을 반복해서 얻은 응답 결과를 전체적으로 조합함으로 물리적으로 긴 센서 배열을 쓰는 효과를 얻을 수 있다. 이로 인해 신호 취득과 더불어 계산되는 센서 배열 응답들의 적절한 위상보상과정을 통한 고해상도의 합성 빔 패턴을 얻을 수 있다.

2. 수차 모형 구조 배열을 이용한 FFTSA 신호 모델링

그림 1은 각각의 센서에 대해 수차 모형 배열의 변동 정도를 나타내는 변위를 각각의 센서에 대해 D1, D2,

D3,..로 나타내고 있다.

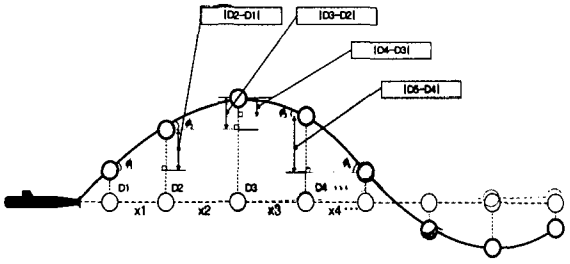


그림 1. 사상(Mapping)기법을 이용한 센서간 거리 계산

사상 기법 적용의 결과로 생성되는 가상의 선형 배열상에 센서간 거리를 이용하여 합성 과정을 처리하여야 하므로 배열 변위 값 D1, D2, D3,... 및 추차 모형 배열상에 존재하는 균일한 센서간 거리를 나타내는 값인 ξ를 이용하면 수차 모형 배열의 각 센서를 중심으로 한 수평 기준선을 토대로 기준선에서 이탈된 편이각 $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4, \ldots$를 구할 수 있다. 식 (1)은 수평 기준선에서 수차 모형 배열의 벗어난 정도를 나타내는 편이각 ϕ_n을 나타내고 있다.

$$\phi_n = \sin^{-1}\left(\frac{|D_{n+1} - D_n|}{\xi}\right) \quad (1)$$

단, n은 센서의 위치

식 (1)에서 구해진 편이각 $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \ldots$를 이용하여 사상 기법이 적용된 후 생성된 가상의 선형 배열 상의 비균일적인 센서간 거리 $x_1, x_2, x_3, \ldots$은 식 (2) 같이 나타낼 수 있다.

$$x_n = \xi \cdot \cos\phi_n \quad (2)$$

식 (3)은 식 (2)에 의해 생성된 센서간 거리를 이용하여 목표물 방사 신호의 각각의 센서에 대한 지연 처리 산출 식을 나타내고 있다.

$$Delay_{n-1} = x_{n-1} \cdot \sin\theta \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 각각의 견인 배열 센서 출력 신호를 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_n(t_i) = A \cdot \exp\left[j2\pi f\left(t_i - \frac{Delay_{n-1} \cdot \sin(\theta)}{c}\right)\right] + \varepsilon_n(t_i) \quad (4)$$

$$n = 1, 2, 3, \ldots N$$

견인함이 이동함으로 인해 각각의 부배열에서 생성되는 빔 패턴은 수차 모형 배열을 FFTSA기법에 적용했을 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$b(f, \theta_s)_\tau = \sum_{n=1}^{N}\left(\sum_{i=1}^{K} x_n(t_i + \tau)\exp(-j2\pi f_o t_i)\right) \cdot \exp\left[j2\pi f_o \frac{Delay_{n-1}\sin(\theta_s)}{c}\right] \quad (5)$$

식 (5)에서 n은 센서의 개수를 의미하며, $\varepsilon_n(t_i)$는 영평균의 통계적 특성을 가지는 가우시안 잡음 랜덤 변수, A는 신호의 감쇄와 위상지연을 포함하는 복소값을 나타낸다. 또한 c는 수중환경에서의 1498m/s의 값을 갖는 음파 전달 속도이며, θ_s는 각각의 센서에 대해 입사각 θ를 갖는 목표물 방사 신호에 대한 조절각을 의미한다. 센서에 입사되는 신호는 각 센서 출력을 표본화하는 시점인 $t_i = i \cdot \Delta t$에서 표본화되어지며 여기서 Δt는 표본화 간격을 의미한다.

$$B(f_\theta, \theta_s)_{Mi} = b(f_\theta, \theta_s)_{t_o} \cdot \sum_{m=1}^{M}\exp\left[\left(j2\pi f_o\left(1 - \frac{v}{c}\sin\theta\right)m\tau\right) - j\phi_m\right] \quad (6)$$

식 (6)은 τ초마다 생성되어지는 물리적 배열의 연속적인 빔 패턴 출력에 대한 합성 횟수 M을 가지는 최종적으로 합성된 빔패턴 출력 값이다. 여기서 $\phi_m = 2\pi f_o(1 + v \cdot \sin\theta_s/c)$는 합성 어패처를 생성하는데 필요로 되어지는 m번째 빔 패턴 출력에 대한 위상 보상 요소이다.

본 논문에서는 견인 센서 배열이 목표물을 추정함에 있어 주된 영향을 끼치는 코히어런스 특성 및 견인함의 이동 경로 변화에 따른 추정 성능의 변화에 대해 다루었다. 즉, 수신된 신호의 시간적 코히어런스 손실이 합성 어패처의 공간적 코히어런스 길이의 손실을 유발하는 관계로 식 (7)과 같은 관계가 성립한다.

$$\rho_{nl}(f, m\tau) = \exp\left[-\left(\frac{mv\tau + Delay_{n-l}}{vT_c}\right)^2/2\right] \quad (7)$$

여기서 수차 모형 배열이라는 점을 고려하여 n번째와 l번째 센서 사이의 거리 표현에 있어서 식 (7)에 $Delay_{n-l}$을 적용하였다. 식 (7)에서 T_c는 코히어런스 주기를 의미한다.

또한 견인 센서 배열이 가져야 하는 직선 경로에서 수중의 환경적 요인으로 인해 이상적인 직선 방향을 중심으로 이탈경로가 발생되는 시스템 에러는 다음과 같이 적용되는 새로운 식을 얻을 수 있다.[4].

$$v(m\tau) = \sqrt{v_o^2 - v_\perp(m\tau)^2}$$

$$v_{\perp}(m\tau) = v_o \sin\gamma \cos(2\pi m\tau / T_o) \quad (8)$$

여기서 $v_{\perp}(m\tau)$는 견인함의 직선경로 이동속도 v_o에 γ만큼의 이탈각을 가지는 속도성분이며, $v(m\tau)$는 $v_{\perp}(m\tau)$가 고려된 수정된 속도요소이다.

3. 모의 실험

본 논문의 모의 실험에서는 견인 선형 배열 및 Conformal 구조의 배열, 수차 모형 구조의 배열을 이용하여 각각 코히어런스 주기에 대한 성능 변화 및 견인함의 변동경로 주기 변화에 따른 추정 성능의 변화에 대해 분석하였다. 모의 실험에 대한 환경 조건으로는 배열에 존재하는 센서의 개수를 64개로 하였으며, 연속적인 빔 패턴 출력의 합성횟수는 40번으로 하였다. 또한 신호원의 중심 주파수를 330Hz로 고정하였으며 센서에 입사되는 신호의 입사각을 목표물이 하나라고 가정하였을 때 20°로 지정하였다.

그림 2는 견인 선형 배열에서의 코히어런스 주기 변화에 따른 성능 변화를 나타내고 있다. 즉, 그림 2에서 부엽 레벨이 -10dB이하로 떨어지게 되는 부엽 빈도 축적율이 $T_c = M \cdot \tau/2$일 경우 공간적 스팩트럼의 총 샘플수의 70%가 됨을 알 수 있다. 그림 2에서 알 수 있듯이 코히어런스 주기 T_c가 짧아질수록 SNR(Signal to Noise)에 대한 평균 레벨 축적율이 저조하여 성능이 저하되고 있음을 알 수 있다.

그림 3은 각각의 주어진 변동 경로주기 T_o에 대해 일정한 SNR 레벨 이하로 떨어지는 부엽들의 빈도 축적율을 나타내고 있다. 또한 편이각 γ의 변화에 따른 견인 센서 배열 성능 차이에 대한 비교를 위하여 모든 환경 조건을 $\gamma=2°$인 경우와 동일하게 하여 $\gamma=8°$인 경우에 있어서의 모의 실험을 수행해 보면 그림 4와 같은 모의 실험 결과가 나타난다.

부착 견인 Conformal 구조의 배열을 이용한 FFTSA 기법에서 코히어런스 효과에 대한 모의 실험 결과를 그림 5에 보였다. 또한 그림 6은 Conformal구조 견인 배열에서 주어진 변동 경로 주기 T_o에 대해 일정한 SNR 레벨 이하로 떨어지는 부엽들의 빈도 축적율을 나타내고 있다.

그림 7은 편이각 $\gamma=2°$인 경우와 $\gamma=8°$인 경우 견인함의 변동 경로 주기에 따른 성능 변화에 대해 모의 실험을 수행하였다. 그림 5와 그림 6 및 그림7의 모의 실험 결과에서 알 수 있듯이 견인 선형 배열을 사용했을 경우와는 달리 총 처리 시간에 비해서 T_c 및 T_o가 짧아짐에 따라 부엽의 평균 레벨이 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

그림 8은 본 논문에서 제안한 수차 모형 구조의 배열을 이용한 FFTSA 기법에 대해 코히어런스 효과에 대한 모의 실험 결과를 나타내고 있다. 그림 9는 견인함의 변동 경로 주기에 따른 수차 모형 배열의 성능 변화에 대해 나타내고 있다. 또한 이탈각 γ의 변화에 따른 성능 변화는 그림 10에 나타내고 있다. 그림 8과 그림 9 및 그림 10의 모의 실험 결과에서 알 수 있듯이 수차 모형 구조의 견인 배열을 이용했을 경우 T_c 및 T_o가 짧아짐에 따라 SNR에 따른 부엽의 평균 레벨의 변화가 발생함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 기존에 사용하였던 견인 선형 배열 및 Conformal 배열 구조를 이용했을 경우 실제 목표물 탐지에서 발생할 수 있는 오차를 최소화 하고자 실제 수중 환경의 역학적 특성을 잘 표현한 수차 모형을 이용하여 2차원 환경에서의 코히어런스 효과 및 변동 경로 주기 변화에 따른 성능 변화를 분석하였다.

모의 실험 결과에서 알 수 있듯이 수차 모형 구조 배열의 코히어런스 주기 변화 및 견인함의 변동 경로 주기에 따른 입사각 추정 성능은 부착 견인 Conformal 구조의 배열을 이용한 합성 기법에 비해 성능이 저하됨을 확인할 수 있었다. 단, 낮은 신호대 잡음비에서 부엽의 빈도 축적율이 기존의 배열 구조에 비해 향상되었음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 수중 음향 특화 센터에서 지원한 Synthetic Aperture Array 소나 신호처리 기술연구의 일환으로 수행된 것입니다.

참고문헌

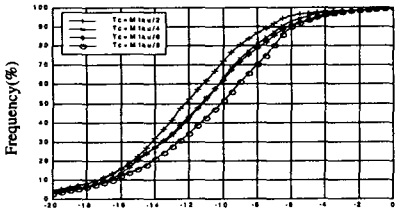
[1] Douglas A. Gray, Brian D. O. Anderson and Robert R. Bitmead, "Towed Array Shape Estimation Using Kalman Filters-Theoretical Model," IEEE J. Oceanic Eng., vol. 18, no.4, pp. 543-556, Oct. 1993.

[2] J. L. Riley and D. A. Gray, "Towed Array Shape Estimation Using Kalman Filters-experimental investigation," IEEE J. Oceanic Eng., vol. 18, pp. 572-581, Oct.1993.

[3] N. C Yen and Carey, "Application of synthetic-a perture processing towed-array data",J. Acoust. Soc. Am., vol. 86, pp. 754~765, 1989.

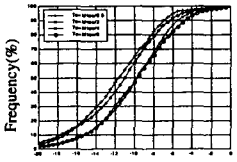
[4] Stergios Stergiopoulos and Heinz Urban, "A new passive synthetic aperture technique for towed arrays", IEEE J. of Oceanic Eng., vol. 17 no. 1, pp. 16~20, Jan. 1992.

[5] 김준환, 양인식, 김기만, 오원천, 도경철, "왜곡된 형상을 갖는 어레이를 위한 합성 처리 기법", 한국음향학회논문지, vol. 19, no. 4, May. 2000.



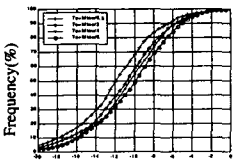
Level of side lobe

그림 2, 코히어런스 주기에 따른 성능변화



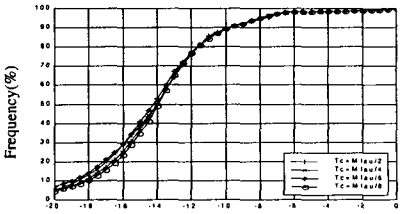
Level of side lobe

그림 3. 변동 경로 주기에 따른 성능 변화(γ=2°)



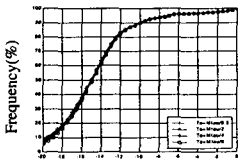
Level of side lobe

그림 4. 변동 경로 주기에 따른 성능 변화(γ=8°)



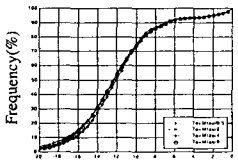
Level of side lobe

그림 5. 코히어런스 주기에 따른 성능변화



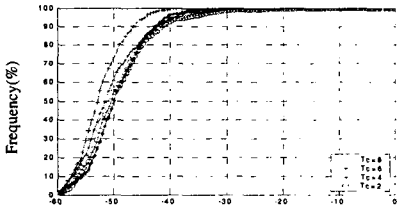
Level of side lobe

그림 6. 시스템 에러에 대한 성능 변화(γ=2°)



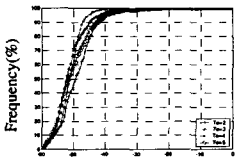
Level of side lobe

그림 7. 시스템 에러에 대한 성능 변화(γ=8°)



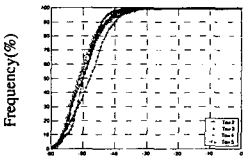
Level of side lobe

그림 8. 코히어런스 주기에 따른 성능 변화



Level of side lobe

그림 9. 변동 경로 주기에 따른 성능 변화(γ=2°)



Level of side lobe

그림 10. 변동 경로 주기에 따른 성능 변화(γ=8°)