

실측데이터를 이용한 빔 영역 합성처리 기법에 관한 연구

*강진석, *김기만, **강현우, ***이충용, ***윤대희, ****도경철, ****오원천, ****조정근

* 한국해양대학교 전파공학과

** 강남대학교 컴퓨터미디어 공학부

*** 연세대학교 전기전자공학과

**** 국방과학연구소

A Study on Synthetic Aperture Technique in Beam Domain using Real Data

Jin-Seok Gang, Ki-Man Kim, Hyun-Woo Kang, Chungyong Lee, Dae-Hee Youn, Kyoung-Cheol Do, Won-Tcheon Oh, Chom-Gun Cho

* Department of Radio Sciences & Eng., Korea Maritime University

** School of Computer and Media Eng., Kangnam University

*** Dept. of Electrical and Electronic Eng., Yonsei University

**** Agency For Defense Development

요 약

소나 시스템의 표적 탐지 성능을 향상시키기 위해 물리적으로 제한된 길이의 어레이를 확장하는 합성 어퍼처 소나에 대한 연구와 실험이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 왜곡된 어레이의 형상을 추정하여 왜곡을 보정한 후에 빔 영역에서 어레이를 합성하는 FFTSA(Fast Fourier Transform Synthetic Aperture) 기법의 성능을 분석하였다. 실험 데이터로는 한국 근해에서 견인 어레이로부터 획득한 데이터를 이용하였으며 실측된 데이터로 부어레이 간의 시공간적인 위상 차이를 보상함으로써 어레이 길이를 확장하였다.

중요한 요소로, 어레이 어퍼처 길이가 길수록 어레이 시스템의 성능이 향상되지만 물리적으로 긴 길이의 어레이를 운용한다는 것은 많은 제약이 따르게 된다[1]. 이를 해결하기 위해 견인 어레이(towed array)를 이용하여 한정된 길이의 어퍼처로부터 입력되는 신호를 코히런트하게 합성함으로써 어퍼처 길이를 확장한 것과 같은 효과를 얻을 수 있는 합성 어퍼처 소나(SAS : Synthetic Aperture Sonar) 기술이 개발되었다[2][3][4].

SAS기법은 크게 어퍼처 영역에서 신호를 처리하는 방법과 빔 영역에서 처리하는 방법으로 나눌 수 있다. 어퍼처 영역에서 처리하는 대표적인 방법으로는 ETAM(Extended Towed Array Measurement) 기법이 있고 [2], 빔 영역에서 대표적인 기법은 Yen과 Carey 기법 [3]과 FFTSA(Fast Fourier Transform Synthetic Aperture) 기법등이 있다[4]. ETAM 기법은 견인 어레이를 이동시키면서 일정 시간 간격으로 연속적으로 얻어지는 부어레이 신호들 사이에 중첩되는 부분의 데이터들을 중첩 상관기(overlap correlator)를 이용하여 위상 보정 성분을 구하고, 이를 이용하여 어퍼처의 길이를 확장시키는 방법이다. Yen과 Carey 기법은 신호원과 수신기의 상대 속도를 이용하여 위상 보정 성분을 구함으로써 부어레이의 빔을 코히런트하게 합성하는 기법이다. FFTSA 기법은 Yen과 Carey 기법에서 요구되는 상대

1. 서 론

수중 환경은 지상 환경보다 복잡한 특성을 갖고 있으며, 이는 수중의 목표물을 원거리에서 조기에 탐지하여 사전에 효율적인 조치를 취할 수 있도록 하는 수중 조기경보 체계의 구성을 어렵게 한다. 따라서 보다 정확한 목표물의 감시, 추적에 위해 수신된 자료를 적절한 신호처리 기법을 통하여 그 탐지 확률을 증대시켜야 한다.

수중 음향 시스템에서 선형 어레이는 수중 음원의 방향을 탐지하기 위해 널리 이용된다. 저주파 신호를 검출하여 신호 처리하는 선형 어레이 시스템에서는 신호 방향에 대한 각 분해 능력과 출력신호 대 잡음비(SNR)가

속도를 직접 사용하지 않고, 연속적인 시간 간격으로 얻어지는 부어레이 신호를 FFT변환함으로써 빔 영역에서 코히런트하게 합성하는 기법이다.

실제 해양 환경에서 SAS 기술을 이용하여 어레이를 합성하는 실험 논문들이 발표되었다[5][6]. 이 논문들은 모두 어레이를 견인하는 견인선의 속도가 일정하고, 어레이가 선형을 유지한다는 가정을 하고 있다. 하지만 실제 상황에서는 견인선의 방향전환 및 속도 변화, 조류나 파도의 영향등으로 인해 어레이가 선형을 유지하기는 불가능하고, 이로 인해 방향 탐지 성능의 저하가 불가피하게 된다[7]. 따라서 전처리단에서 어레이 형상 추정기법을 이용하여 형상이 왜곡된 어레이의 하이드로폰 위치를 추정하여 형상 왜곡을 보정한 후에 어레이를 합성하는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 실측 데이터를 이용하여 빔 영역에서 어레이를 합성하는 실험을 하였다. 실험 데이터로는 한국 근해에서 선형 견인 어레이로부터 획득한 데이터를 이용하였으며, 견인선의 속도 성분을 이용하여 중첩되는 부어레이간의 시간, 공간적인 위상 차이를 보상함으로써 어레이의 길이를 확장하였다.

II. 빔 영역에서의 어레이 합성

그림1과 같이 각각의 부어레이의 출력들을 FFT를 통하여 주파수 영역으로 변환하고 특정시간 t_i 에서 계산되는 빔 패턴 $b(f, \theta_s)_{t_i}$ 는 다음과 같다.

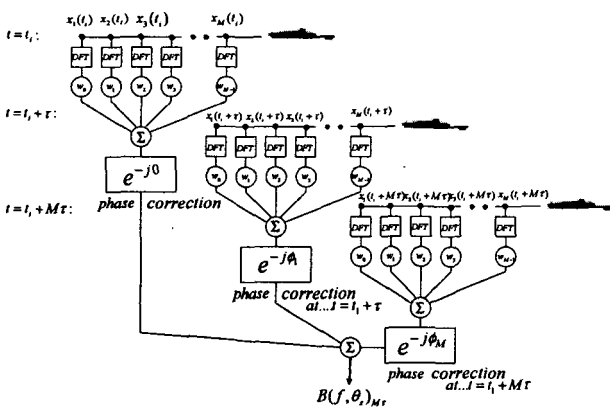


그림 1. FFTSA 방법에 의한 빔 영역 합성 처리 과정도

$$b(f, \theta_s)_{t_i} = \sum_{n=1}^N X_n(f) e^{j2\pi f \frac{\delta(n-1)}{c} \sin \theta_s}$$

여기서 $X_n(f)$ 는 시간 t_i 에서 n 번째 센서출력의 주파수 변환이며, θ_s 는 조절각, θ 는 신호의 입사각이다. 목표물이 부어레이의 위치와 상당한 거리가 있는 경우 식(1)에서 도플러 주파수는 입사신호의 중심주파수 f_0 및 부어레이의 이동속도 v 의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$f = f_0 \left(1 \pm \frac{v \sin \theta}{c}\right) \quad (2)$$

τ 시간 후에 n 번째 센서에서 수신된 신호 $x_n(t_i + \tau)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$x_n(t_i + \tau) = A e^{j2\pi f_0 \left(t_i + \tau - \frac{v_i + \delta(q+n-1)}{c} \sin \theta\right)} + \mathcal{E}_{n,t_i}^{\tau} \quad (3)$$

여기서 q 는 $\frac{v\tau}{\delta}$ 이다. 이제 τ 만큼의 시간경과 후에, 즉 $t_i + \tau$, 취득된 부어레이의 출력 신호들을 사용하여 계산된 빔 패턴 $b(f, \theta_s)_{t_i}$ 를 t_i 시각에서 구한 빔 패턴 $b(f, \theta_s)_{t_i}$ 으로 표현하면 다음과 같다.

$$b(f, \theta_s)_{t_i} = b(f, \theta_s)_{t_i} e^{j2\pi f_0 \tau \left(1 - \frac{v}{c} \sin \theta\right)} \quad (4)$$

식(4)에서 두 가지의 빔 패턴 간의 다른 점은 측정 시간간격 τ 에 의한 위상차가 존재한다는 사실이며 이를 보상하게 되면 마치 동일한 시각에서 동일한 부어레이를 사용한 빔 패턴을 갖는 효과를 얻을 수 있다. 식(4)을 참조하여 M 번째, 즉 시간상 $t_i + M\tau$, 신호취득과정에서 수신된 부어레이의 출력신호들을 사용하여 계산된 빔 패턴을 최초의 빔 패턴으로 나타내면 다음과 같다.

$$b(f, \theta_s)_{M\tau} = b(f, \theta_s)_{t_i} e^{j2\pi f_0 \tau \left(1 - \frac{v}{c} \sin \theta\right)} \quad (5)$$

이제 M 개의 부어레이를 사용하여 계산된 각각의 빔 패턴들을 위상 보정하여 합성된 빔 패턴 $B(f, \theta_s)_{M\tau}$ 는 아래와 같다.

$$B(f, \theta_s)_{M\tau} = \sum_{m=1}^M b(f, \theta_s)_{m\tau} e^{-j\Phi_m} \quad (6)$$

위의 식에서 위상 보정항 Φ_m 는 다음과 같다.

$$\Phi_m = 2\pi f_0 \left(1 \pm \frac{v \sin \theta_s}{c}\right) m\tau \quad (7)$$

SAS 신호 처리의 문제는 바로 이 위상 보정항을 얼마(1)나 정확하게 추정하느냐의 문제로 귀결된다. 실제 운용

시에는 각 부어레이가 충분한 coherency를 갖기 어려우며, 입사 신호의 중심 주파수를 미리 알고 있어야 하는 문제점들을 지니고 있다. 식 (7)에서 표현된 합성 빔 패턴을 사용하여 전체 합성 빔 전력 패턴을 정의하면 다음과 같다.

$$P(f_0, \theta_s)_{M\tau} = B(f_0, \theta_s) B^*(f_0, \theta_s) = \left\{ \frac{\sin[N \frac{\pi \delta}{\lambda} (\sin \theta_s - \sin \theta)]}{\sin[\frac{\pi \delta}{\lambda} (\sin \theta_s - \sin \theta)]} \cdot \frac{\sin[M \frac{\pi v \tau}{\lambda} (\sin \theta_s - \sin \theta)]}{\sin[\frac{\pi v \tau}{\lambda} (\sin \theta_s - \sin \theta)]} \right\}^2 \quad (8)$$

센서 간의 간격이 선형인 경우로 가정할 경우는 위 수식을 이용하지만, 실제 견인된 어레이는 항상 이동이 직선으로 되지 않는다. 이 경우 어레이 형상을 추정하기 위하여 이용한 보조 센서의 위치 정보와 실제 보조 센서의 위치 사이에는 오차가 발생하게 된다. 따라서 이러한 오차를 줄이기 위해 스플라인 보간법을 사용하여 얻어진 어레이 형상 추정 기법을 사용하여 보조 센서의 수평 좌표를 수정하고, 여기서 결정된 수평 좌표를 이용하여 다시 기존의 어레이 형상 추정 기법을 적용하는 반복 과정을 사용할 수 있다[8].

III. 실험 결과

실험에 사용된 데이터는 2003년 9월 한국 근해에서 선형 견인 어레이를 통해 획득한 데이터로 저주파 대역 신호에 맞추어진 어레이로부터 획득한 데이터를 사용하였으며, 견인선의 속도가 일정하게 유지되는 부분의 데이터를 사용하였다. 실측 데이터를 각 어레이의 목표 주파수 대역에 해당하는 대역 통과 필터를 통과시킨 후 견인선의 속도 성분을 이용하여 빔 영역에서 중첩되는 부어레이간의 공간적인 위상 차이를 보상함으로써 어레이의 길이를 신호 처리적으로 확장시켰다.

그림2는 80개의 어레이로 빔을 형성한 경우로 어레이 형상은 ULA(Uniformly Linear Array)로 가정하였다. 이때에는 160° 부근의 신호가 높게 잡히는 것을 알 수 있다. 그림3은 80개의 어레이를 50% 중첩시켜 한번 합성을 하였을 때이며, 그림4의 경우는 추가로 50% 중첩시켜 2번 합성을 하였을 때의 결과이다. 50% 중첩하시는데 소요되는 시간은 약 56초 정도이다.

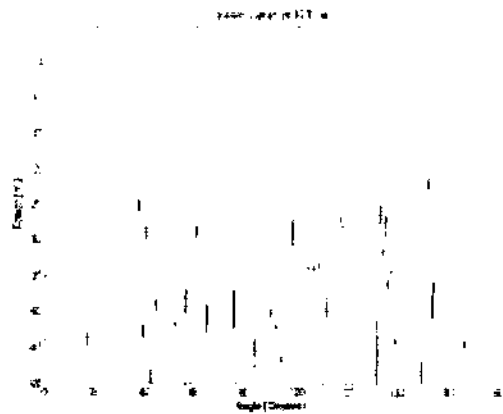


그림 2. 80개의 어레이를 쓴 경우 빔 패턴

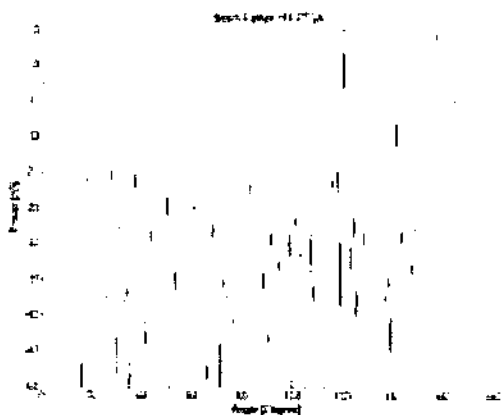


그림 3. 80개의 어레이를 사용하여 1회 합성한 경우 빔 패턴

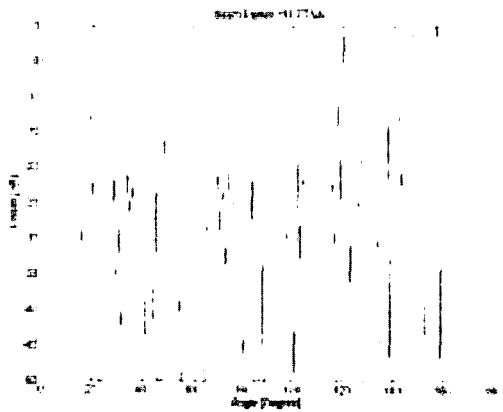


그림 4. 80개의 어레이를 사용하여 2회 합성한 경우 빔 패턴

위의 그림들에서 120° 신호가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 각 그림들을 비교 하였을 때, 160° 부근의 신호 이외에 120° 부근의 신호도 합성에 의해 나타나고 있다.

IV. 결 론

본 논문은 실측 데이터를 이용하여 어레이를 합성하는 실험을 하였다. 어레이를 합성하기 위해 중첩되는 부어레이간의 위상 차이를 코히어런트하게 보상함으로써 어레이의 길이를 가상적으로 늘리는 방법을 사용하였다. 합성 과정에서 견인선이 이동함에 따라 차이가 발생함을 확인하였다. 또한 합성 회수를 늘릴수록 방향 탐지 분해능이 좋아지는 것을 방향 탐지 결과로 알 수 있었다. 실험에 사용한 실측 데이터에 대해 시간,공간적 코히어런스를 측정한 결과 코히어런스가 전반적으로 좋지 않은 환경이었기 때문에 이상적인 환경의 실험 결과보다는 합성의 효과가 떨어지게 된다고 판단할 수 있었다. 다양한 환경의 경우에 대해 합성 효과 실험이 필요하며, 특히 견인선의 함속에 따라 코히어런스가 어느 정도 유지되는지에 관한 연구가 추후 필요하다. 또한 현재 어레이 형상 추정 결과를 사용하지 않았는데 이를 고려한 성능을 추후 확인하여야 한다.

참고 문헌

- [1] R.O. Nielsen, *Sonar Signal Processing*, Norwood, MA : Artech House, 1991.
- [2] S. Stergiopoulos and E. J. Sullivan, "Extended Towed Array Processing by an Overlap Correlator", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.86, No.1, pp.158-172, July 1989.
- [3] N. Yen and W. Carey, "Application of Synthetic-Aperture Processing to Towed-Array Data", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.86, No.2, pp.754-765, Aug. 1989.
- [4] S. Stergiopoulos and H. Urban, "A New Passive Synthetic Aperture Technique for Towed Arrays", *IEEE J. of Oceanic Eng.*, Vol.17, No.1, pp.16-25, Jan. 1992.
- [5] S. Stergiopoulos and H. Urban, "An Experimental Study in Forming a Long Synthetic Aperture at Sea", *IEEE J. of Oceanic Eng.*, Vol.17, No.1, pp. 62-72, Jan. 1992.
- [6] M. E. G. D. Colin and J. Groen, "Passive Synthetic Aperture Sonar technique in combination with tow ship noise canceling: application to a triplet towed array", *MTS/IEEE*

Ocean 2002, Vol.4, pp.2302-2309, Oct. 2002.

- [7] P. Felisberto and S. M. Jesus, "Towed-array Beamforming during Ship's Maneuvering", *IEE proceedings, Radar, Sonar and Navigation*, Vol.143, No.3, pp.210-215, June 1996.
- [8] 박희영, 김인익, 오원천, 윤대회, 이충용, "소나 시스템을 위한 어레이 형상 추정 기법의 성능 비교 및 개선", *한국음향학회지*, 제20권, 제4호, pp.12-16, 2001년 5월.

본 논문은 수중음향특화연구센터의 지원으로 이루어짐 (UA-22).