

예인선배열 센서를 이용한 전방위 표적방위 탐지기 구현

Implementation of the omnidirectional target bearing detector utilizing towed linear arrays

이 성 은* 천 승 용* 황 수 복* 이 형 옥*
 Lee, Sung-Eun Chun, Seung-Yong Hwang, Soo-Bok Lee, Hyeong-Uk

ABSTRACT

Passive sonar system forms the various beams in any desired directions to obtain the improvement in Signal-to-Noise(S/N) ratio, bearing detection and localization of targets, and the attenuation of interferences from other directions. Detection of modern underwater targets is becoming increasingly difficult as noise reduction technology leads to considerably low-level acoustic emissions. Therefore, the improvement of beamforming is very important to detect modern underwater targets at the long range in the complex environmental sea. Also, to react to the fast attack mobiles such as torpedoes, port and starboard discrimination is required to be performed very quickly.

In this paper, we proposed the implementation of omnidirectional target bearing detector without port and starboard ambiguity to detect effectively the low-level underwater targets. The port and starboard discrimination is performed by cardioid processing and the improvement of beamforming utilizes the cross correlation matrix of individual hydrophone pairs of linear array sensors. The sea test result shows that the system implemented is good for the detection of the low-level underwater targets.

주요기술용어 : Linear Array Passive Sonar(선배열 수동 소나), Beamforming(빔형성), Port/Starboard Discrimination(좌/우 구분), Cross Correlation Matrix(상호 상관 행렬), Beamwidth(빔폭), Array Gain(배열 이득)

1. 서 론

수동 소나 시스템에서 빔형성은 신호대 잡음비를 향상시켜 표적의 방위 탐지, 추적 및 식별 능력을 향

상시킨다.

선배열 수동 소나 시스템에서는 빔 특성이 좌/우 대칭이므로 표적 출현 방위의 좌/우 구분이 실시간으로 해결할 수가 없고 표적 기동분석 기법에 의해서 수분 이상 장시간이 소요된다.

그러나 어뢰와 같이 고속으로 자함을 공격하는 경

* 국방과학연구소

우 신속한 표적 탐지에 의한 대응 조치를 취하기 위해서는 실시간 좌/우 방위 탐지가 선행되어야 한다. 또한 최근이 표적들이 매우 저소음화 됨에 따라 원거리에서 저소음의 표적을 탐지하기 위한 빔 지향 특성을 개선하고자 하는 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 실시간으로 표적의 360° 전방위에 대해 신속히 좌/우 방위 구분을 위한 카디오이드 이론의 적용 기법과 저소음의 표적을 원거리에서 탐지하기 위한 상호 상관 행렬을 이용한 표적방위 탐지기 구현에 대하여 기술한다. 시스템 구현상에서 보면, 실제 해역에서 선배열 수동 소나를 예인하게 되면 센서 배열 축을 중심으로 회전이 되거나 또는 비틀림 현상이 발생될 수 있기 때문에 이를 해결하기 위해 센서 비틀림에 따른 보상 기법으로 센서 재배치 기법과 이에 따른 회전각의 재계산 방법을 제시하고, 기존의 빔 형성 기법보다 배열 이득과 방위 정확도를 나타내는 빔폭의 분해능을 훨씬 개선한 각 센서 쌍들의 상호 상관 행렬을 이용한 빔형성 알고리즘을 시스템에 적용한 구현 방법을 제시한다. 또한 구현된 실제 시스템을 이용하여 해상시험을 수행하였으며, 시험 결과 구현된 방위 탐지기의 성능이 우수함을 확인하였다.

2. 전방위 표적 방위 탐지기 구현

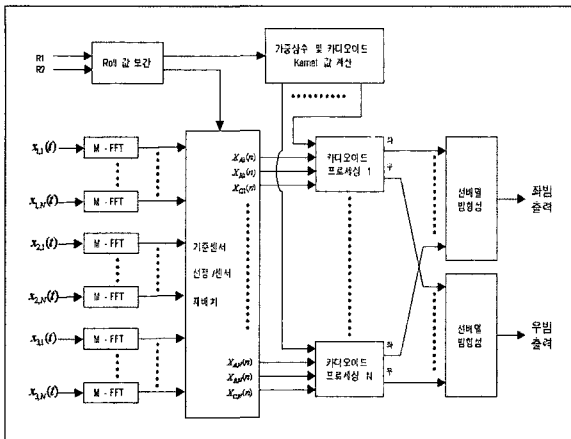
두 개의 센서 신호를 이용하여 좌/우 방위 구분을 위한 이론은 한쪽 센서의 가중상수를 -1로 하고 일정량의 위상지연 후 합함으로써 좌/우 한쪽에 Null을 만드는 카디오이드 빔을 형성하여 얻을 수 있다^[1~2]. 그러나 실제 환경에서는 센서를 예인하는 모함의 기동하게 되면 센서가 일정하게 유지되지 못하고 센서

배열 축을 중심으로 회전이 되거나 비틀림 현상이 발생되기 때문에 이에 대한 보상 방안이 적용되어야 한다. 또한 저소음의 표적을 원거리에서 탐지할 수 있도록 하기 위하여 빔 지향 특성을 개선할 필요가 있다.

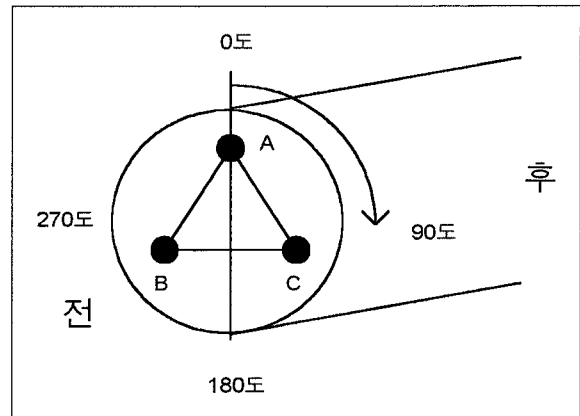
선배열 센서 구성은 예인시 발생될 수 있는 불규칙성 변화를 보상할 수 있도록 N 개 그룹으로 구성하고, 각 그룹당 120° 간격으로 3개의 음향센서를 배치하였고, 전체 센서 배열 중 음향센서 배열의 앞뒤에 롤 센서를 두어 기동에 따른 센서배열의 변화를 측정하여 실시간적으로 보상할 수 있도록 하였다. 그리고 좌/우 방위 구분을 위한 카디오이드 기법의 적용은 선배열 빔형성 후 지향각별로 카디오이드 빔을 형성하는 방안과 카디오이드 빔을 고정하고 선배열 빔을 형성하는 방안 두가지로 검토하여 시뮬레이션을 수행한 결과, 첫째 방안이 좌/우 분리 신호 크기차가 훨씬 우수하나 주빔의 신호 크기가 작아 탐지성능이 다소 제한되며 하드웨어 구현 측면에서도 두 번째 방안에 비해 연산량이 2배가 되는 제한이 있었다. 두 번째 방안의 경우 좌/우 분리 신호 크기차가 적지만 충분히 시스템이 요구하는 6dB차 이상을 만족하는 성능을 얻을 수 있었다. 따라서 본 논문에서 적용한 선배열 소나에서 실시간적으로 좌/우 방위 분리가 가능한 전방위 표적 방위 탐지기에 대한 구조는 그림 1과 같이 구성하였다.

그림 1로부터 선형으로 배열된 각 센서에 수신되는 신호를 f_s 로 샘플링하여 M 개 만큼 수집하고 각 센서에 대한 채널별 M -FFT를 취한 다음, 각 주파수 빈에 대해 좌/우 각각에 카디오이드 빔을 형성하는데, 각 그룹별 3개의 센서를 이용한 카디오이드 빔형성 원리는 그림 2와 같다.

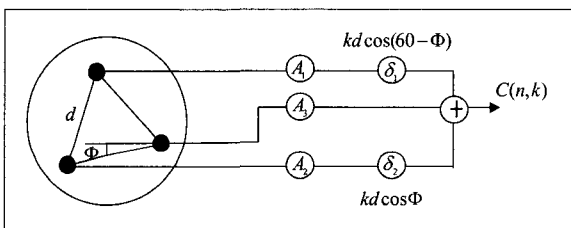
여기서 d 는 3개 센서간의 간격이고, θ 는 회전각도, A_1, A_2, A_3 는 각각 1번, 2번, 3번 센서에 대한



[그림 1] 전방위 표적방위 탐지기 구조



[그림 3] 센서 뒤틀림이 없을 때의 센서 기준배치



[그림 2] 적용된 카디오이드 빔형성 구조

가중상수를 나타낸다. 또한 δ_1, δ_2 는 1번, 2번 센서와 3번 센서간의 시간 지연으로 파수 K 의 함수로 표시된다.

기준센서인 3번 센서에 대해 Φ 각도 만큼 기울어졌을 때 센서의 회전을 보상한 n 번째 그룹의 k 번째 주파수 빈에 대한 카디오이드 빔출력은 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 C(n, k) = & A_1 X_{nA}(k) \exp \left\{ -j \frac{2\pi F_s k d}{M c} \cos(60 - \Phi) \right\} \\
 & + A_2 X_{nB}(k) \exp \left\{ -j \frac{2\pi F_s k d}{M c} \cos(\Phi) \right\} \\
 & + A_3 X_{nC}(k) \exp \left\{ -j \frac{2\pi F_s k d}{M c} \right\}
 \end{aligned} \quad (1)$$

[표 1] 회전각에 따른 센서 재배치

회전각(도)	센서 A	센서 B	센서 C
0 ~ 30	1	2	3
30 ~ 60	3	2	1
60 ~ 90	3	1	2
90 ~ 120	2	1	3
120 ~ 150	2	3	1
150 ~ 180	1	3	2
180 ~ 210	1	2	3
210 ~ 240	3	2	1
240 ~ 270	3	1	2
270 ~ 300	2	1	3
300 ~ 330	2	3	1
330 ~ 360	1	3	2

실제 환경에서는 센서의 뒤틀림에 따른 센서 재배치와 이에 따른 회전각의 재계산이 필요하며 센서가 뒤틀림이 없을 때의 기준배치는 그림 3과 같다. 표 1

[표 2] 센서 재배치 후의 회전각

실제 회전각 (Φ)	0~30	30~60	60~90	90~120	120~150	150~180
재배치 회전각 (θ)	Φ	60- Φ	Φ -60	120- Φ	Φ -120	180- Φ
실제 회전각 (Φ)	180~210	210~240	240~270	270~300	300~330	330~360
재배치 회전각 (θ)	Φ -180	240- Φ	Φ -240	300- Φ	Φ -300	360- Φ

은 회전각에 따른 센서 재배치를 나타내었으며, 표 2는 센서 재배치에 따른 적용될 회전각을 나타내었다.

좌/우 방위에 대한 카디오이드 빔출력을 이용하여 각 주파수 빈에 대해 사전 정의된 좌/우 방위에 대한 주파수영역 선배열 빔을 형성하는데, 고전적인 빔형성 기법보다 배열 이득과 방위 정확도를 나타내는 빔폭의 분해능을 훨씬 개선한 각 센서쌍들의 상호상관 행렬을 이용한 빔형성 기법을 적용하였다.

n 번째 센서의 주파수 k 빈에 대한 값을 $C(n,k)$ 라 하면 각 센서 쌍 (n, l) 에 대한 상호상관 행렬은 식 (2)과 같이 구해진다^{3~6)}.

$$S(n,k) = \begin{cases} \frac{1}{N-|n|} \sum_{l=0}^{N-1-n} C(l,k) C(l+n,k), n=0, \dots, N-1 \\ \frac{1}{N-|n|} \sum_{l=0}^{N-1-n} C(l,k) C(l+n,k)^*, n=-1, \dots, -(N-1) \end{cases} \quad (2)$$

식 (2)의 상호상관 행렬을 이용하여 주파수 k 에서의 방위 θ 에 대한 위상지연을 보정한 빔형성 출력은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$B(k, \theta) = \frac{1}{2N-1} \sum_{n=1-N}^{N-1} w_n S(n,k) e^{-j\Delta_{nk}} \quad (3)$$

여기서 w_n 은 n 번째 상호상관 행렬 요소의 가중치, Δ_{nk} 는 주파수 k 에서의 n 번째 센서의 위상 지연 값으로 식 (4)와 같이 정의된다.

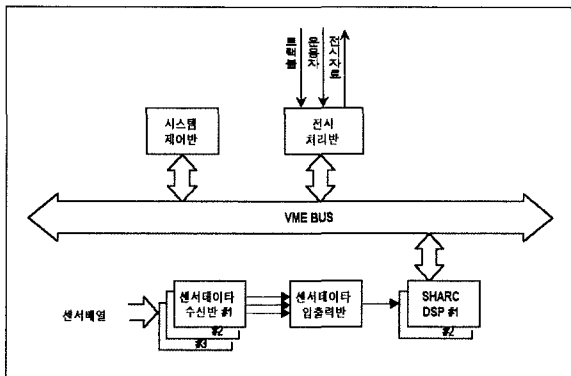
$$\Delta_{nk} = \frac{2\pi n k F_s}{M} \cdot \frac{\cos \theta}{c} \quad (4)$$

N 개의 그룹 센서가 등간격으로 배열된 선배열 센서에서 배열 이득은 이상적인 경우 식(5)와 같이 주어지므로 기존 빔형성 기법에 비해 약 3dB 성능이 향상되고, 빔 폭은 센서 갯수가 N 개에서 $(2N-1)$ 개로 증가된 것과 같은 효과를 가져오므로 식(6)에 따라 0.5배 정도가 됨을 알 수 있다⁷⁾.

$$AG_{scbf} = 10 \log(2N-1) \quad (5)$$

$$\frac{BW_{cbf}}{BW_{scbf}} = \frac{N}{2N-1} \approx 0.5 \quad (6)$$

그림 1과 같은 전방위 표적방위 탐지기의 구조로부터 하드웨어 구현은 VME64 Bus 구조에 시스템 전체 제어를 위하여 SPARC-II 프로세서가 내장된 SBC 보드의 시스템제어반, 3그룹의 배열 센서로부터 공급되는 디지털 입력 신호를 수신하기 위한 센서대



[그림 4] 하드웨어 구조

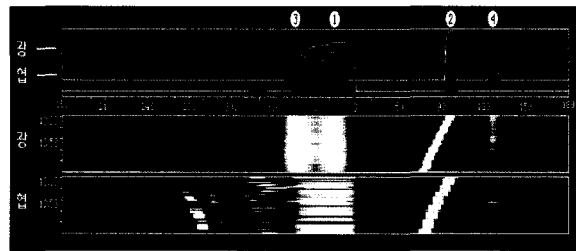
이타 수신판, 센서데이터 수신판으로부터 배열별 센서 데이터를 정렬하고 SHARC DSP로 데이터를 제공하기 위한 센서데이터 입출력판, 주파수 신호 분석, 센서 신호 보상처리, 카디오이드 프로세싱 및 선배열 빔형성 처리를 위해 ADSP-21060 프로세서 4개가 탑재된 SHARC DSP 보드 2장을 사용하여 구현하였고, 결과는 VME64 인터페이스 규격의 전시처리판을 통해 모니터에 전시하도록 하였다. 구현된 하드웨어 구조는 그림 4와 같다.

3. 실험 및 고찰

구현된 전방위 표적 탐지기의 성능 검증을 위하여 해상시험을 실시하였다. 선배열 센서는 좌/우 방위 분리를 위하여 각 그룹당 3개의 센서로 구성된 32개 채널로 배열하였고, 센서 간격은 중심주파수를 2400Hz로 하여 $2/\lambda$ 로 배치하였다. 시험 표적으로는 정량적인 표적 방사소음 준위를 발생시키는 예인 신호발생장치인 SOUND TRAK II를 사용하여 표 3과 같은 표적 신호를 발생시켰다. 이때 시험함은 15노트 속력으로 일직선 기동하면서 선배열 센서를 시험함으로부터

[표 3] 표적신호 발생

구 분	신호주파수(Hz)	크기(dB)
광대역 신호	0 ~ 1,000	125
	1,000 ~ 2,000	120
	2,000 ~ 4,000	117
	4,000 ~ 10,000	115



[그림 5] 예인신호발생장치를 이용한 해상시험 결과

터 약 500m 후미에서 수심 45m 깊이로 예인하였고, 예인 신호발생장치는 4노트의 속력으로 예항체는 15m 깊이로 예인하였다.

그림 5는 해상시험 결과로서 $0^\circ \sim 360^\circ$ 전방위에 걸쳐서 탐지 및 추적되고 있는 표적의 탐지 방위를 보여 주고 있다. $0^\circ \pm 30^\circ$ 부근은 선배열 센서가 함미에서 예인됨으로 자함의 방위를 나타내고, 방위 $50^\circ \sim 90^\circ$ 표적이 예인 신호발생장치를 나타내는 시험 표적이며, 초기 탐지거리는 약 3km이다. 표적신호 발생시 협대역 신호를 인가하지 않았기 때문에 표적의 협대역 방위가 탐지되지 않고 있고, 광대역 탐지 방위에 의해 좌/우 방위가 명확히 구분, 추적되고 있다.

이와 같이 구현한 전방위 표적방위 탐지기는 아주 미약한 신호 크기를 가지는 표적의 경우에도 원거리에서 탐지/추적이 효율적으로 이루어짐을 볼 수 있다.

4. 결 론

선배열 수동 소나 시스템에서 주변환경이 복잡한 해양에서 저소음의 표적을 원거리에서 탐지 및 추적을 잘 수행하기 위해서는 실시간으로 좌/우 방위 구분이 가능한 지향성 빔의 특성을 향상시키는 것이 매우 중요하다.

본 논문에서는 실시간으로 표적의 전방위에 대해 신속히 좌/우 방위 구분 탐지를 위하여 선배열 센서 운용시 예인에 따라 발생하는 회전이나 뒤틀림을 보상한 카디오이드 빔의 적용과 저소음의 표적을 원거리에서 탐지하기 위한 상호 상관 행렬을 이용한 빔형성 기법을 적용한 전방위 표적방위 탐지기의 구현을 제시하였다. 시뮬레이션 결과 이상적인 조건하에서 기존의 빔형성 기법에 비해 배열 이득이 3dB 이상 향상되고, 방위 정확도를 나타내는 빔폭도 0.5배 정도로 정확한 방위 분해능을 가진다. 실제 수중에서 해상시험 결과, 1~10KHz 까지 주파수 대역별로 125~115dB의 아주 미약한 광대역 신호만을 발생시키는 시험 표적에 대하여 실시간으로 원거리에서 좌/우 방위 분리 탐지가 잘 이루어지고 추적이 정상적임을 확인함으로써 구현된 시스템의 우수한 성능을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Donail E. Hall, "Basic Acoustics", John Wiley & Sons, chapter 17, 1987.
- [2] 이형욱외. "좌/우분리 빔형성 기법 연구", NWSD-513-93218, 국방과학연구소, pp.9~45, 1993.
- [3] William S. Burdic, "Underwater Acoustic System Analysis", Prentice Hall, New Jersey, pp.303~338, 1991.
- [4] Richard O. Nielsen, "Sonar Signal Processing", Artech House, pp.51~140, 1991.
- [5] Richard Shiavi, "Introduction to Applied Statistical Signal Analysis", IRWIN, Boston, pp.399~449, 1991.
- [6] Don H. Johnson, "Array Signal Processing : Concepts and Techniques", Prentice Hall, New Jersey, pp.40~55, 1993.
- [7] James H. Wilson, "Applications of inverse beamforming theory", J. Acoust. Soc. Am. 98(6), pp.3250~3261, December 1995.