

역 빔형성기를 이용한 3중 선배열 시스템에서의 어레이 이득향상

Array Gain Improvement of Triple Line Array System Using Inverse Beamforming

오효성* · 강성현* · 김의준* · 고정태* · 김용득**

Hyo-Sung Oh* · Sung-Hyoun Kang* · Eui-Jun Kim* · Jeong-tae Ko* · Yong-Deak Kim**

요 약

다중경로가 존재하는 수중환경에서 표적으로부터 발생하는 신호의 도래방위를 정확히 예측하기 위한 방법으로, 최근 이론이 정립된 Inverse beamforming(역빔형성) integral equation의 해인 역빔형성기에 대한 이론적 고찰 및 simulation에 의한 방위탐지 성능분석을 수행하였고, 표적 도래방위의 좌우 구분을 위한 Cardioid 빔형성에 역빔형성 알고리즘을 적용한 IBF-Cardioid 빔형성기법을 고안하여 성능분석을 수행하였다. 이상적인 조건하에서 역빔형성기는 Conventional beamformer(고전빔형성기)에 비해 array noise gain이 3 dB 이상 향상됨을 이론적으로 검증하고, simulation을 통하여 이를 입증하였다. 도래방위 탐지의 정확도를 나타내는 빔폭도 고전빔형성기에 의한 빔폭의 0.68배 정도인 것으로 입증하였다. 역빔형성 알고리즘이 적용된 Cardioid 빔형성(IBF-Cardioid 빔형성)기법은 고전 알고리즘에 의한 탐지성능에 비해 탐지의 정확도, 분해능의 탐지성능이 우세함을 입증하였고, 특히, endfire 방향에 대한 정확한 방위탐지와 탐지성능이 향상됨을 입증하였다.

Abstract

To detect the precise direction of arrival of target signal in real ocean environments, Inverse beamforming(IBF) solutions to the Inverse beamforming integral equation are surveyed theoretically and the performance properties of the IBF are analyzed with simulations. IBF-Cardioid beamforming algorithm is proposed for port/starboard discrimination and the performance gains are studied with simulations. It is shown that IBF has a 3 dB array noise gain advantage over CBF under ideal conditions. This 3 dB array noise gain advantage is proven by theoretical studies and simulations. This array noise gain advantage leads to a minimum detectable level advantage for IBF output compared with CBF output. The fact that the IBF beamwidth is narrower than the CBF beamwidth by a factor of 0.68 proves the performance of detection and spatial resolution improvement. Comparing the simulation results of IBF-Cardioid beamforming and Conventional Cardioid beamforming, it is shown that IBF-Cardioid beamformer have performance enhancement in minimum detection level, detection accuracy and resolution.

*LG 정밀 연구소 6GR(R & D 6 Group, LG Precision Co., Ltd.)

**아주대학교 전자공학과(School of Electronics, Ajou University)

· 논문 번호 : 990527-046

· 수정완료일자 : 1999년 8월 13일

I. 서 론

선배열 센서에 수신된 신호의 directionality와 신호들간의 상관관계를 나타내는 식 (1)로 기술된 적분방정식은 1970년대 초반에 IBF Process를 시작으로 많은 연구가 진행되고 있다.

$$C(j, k, f_i) = \int_0^\infty N(f_i, \theta, \phi) \cdot e^{i\vec{k} \cdot (\vec{r}_j - \vec{r}_k)} d\theta \quad (1)$$

$C(j, k, f_i)$: 주파수 bin i 에서 선배열 센서 j 와 k 간의 covariance matrix element
 $N(f_i, \theta, \phi)$: 도래방위 θ 와 주파수 bin i 의 합수로써 평면파 신호의 밀도

\vec{r}_j : 선배열 센서 j 의 위치 vector

\vec{r}_k : 선배열 센서 k 의 위치 vector

\vec{k} : incoming signal vector

IBF 알고리즘은 array 센서에 수신된 신호들로부터 구해진 covariance matrix로부터 식 (1)의 역변환(inverse)을 수행하여 신호들의 directionality를 예측하는 알고리즘으로, 1970년대 초반에 수행된 초기연구에서는 integral equation의 역변환에 의해 (1) 식의 해를 구하는 과정에 있어서, 신호 공간에서 불연속적으로 관측된 spatial correlation에 관련된 최소자승 방정식의 해가 음수로 발생하는 ill-conditioning의 문제에 의해, 식 (1)의 해를 구하는 것은 수학적으로 부적합한 것으로 연구되어 실제 선배열 System에 IBF 알고리즘을 적용하기에는 많은 제약이 수반되었다. 그후로도 IBF Process에서 발생하는 ill-conditioning 문제를 해결하기 위한 많은 연구가 진행되었으며, 선배열 센서 쌍들의 separation에 대해 spatial coherence가 연속인 것으로 가정하고 IBF integral equation을 역변환하여 연속해를 구하고, 이 연속적인 해를 불연속적으로 근사화하여, 실제 선배열 system에 적용할 수 있는

근사적인 해^[1]를 구하였다. 이 과정으로부터 구해진 해에 대해서는 ill-conditioning 문제가 해결되고, 서로 상관(correlation)된 다중경로 신호의 영향을 배제하기 위해 다른 방향으로부터 도래하는 신호들은 상관되지 않는다는 가정 이외에는 신호공간에 대한 선행 정보가 요구되지 않으며, Fourier series가 의미하는 것처럼 평면파 신호 밀도의 예측에 대해 최소자승오차를 최소화^{[2],[3]}하게 된다. IBF의 해는 신호 대 잡음비가 상대적으로 높은 신호로부터 신호의 도래방위 분해능의 개선을 목적으로, 에너지가 낮은 주파수/방위 cell의 에너지를 왜곡시키는 high-resolution 알고리즘이나 adaptive 알고리즘^[4]을 사용하지 않고 신호공간의 spatial correlation으로부터 직접 평면파 신호 밀도를 예측한다.

많은 연구논문에서 기술되어진, IBF integral equation의 해로부터 신호들의 directionality를 예측하는 역빔형성 알고리즘에 대하여 이론적 배경을 기술하였다. 본 연구에서는 선배열 센서에 대한 역빔형성 알고리즘의 성능을 Conventional beamforming 알고리즘^[5]에 의한 성능과 이론적으로 비교 분석하였고, 시뮬레이션에 의해 검증을 수행하였다. 또한, 선배열 센서에 의한 신호 도래방위의 좌·우 ambiguity 문제를 해결하기 위해, France의 Thomson사에서 고안된 세 그룹의 선배열로 구성된 수동예인 선배열 청음기^[6]의 각 그룹센서에 수신된 신호에 Cardioid 가중상수를 적용하여 Cardioid 빔형성을 수행한 후, 그 결과에 대해 Conventional 빔형성을 수행하는 Cardioid 빔형성기법에 의한 성능향상을 위해 Cardioid 빔형성결과에 역빔형성을 수행함으로써 발생하는 좌·우 구분 방위탐지 성능향상을 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

II. 이론적 배경

2-1 역빔형성

방위각 θ 와 고각 ϕ 로부터 소음이 포함된 신호

가 도래하는 신호공간내에 놓여진 M 개의 센서로 구성된 선배열 센서의 출력으로부터 많은 2차 정보가 구해질 수 있다. 그러나 신호공간의 directionality $N(f, \theta, \phi)$ 의 예측을 위한 각 센서 쌍의 cross-spectral function $G_{kj}(f)$, $1 < k, j < M$ matrix 외에 각 센서의 출력에 대한 다른 정보들은 불필요하다. 신호공간의 directionality $N(f, \theta, \phi)$ 와 cross-spectral function $G_{kj}(f)$ 의 관계를 기술하기 위해, (θ, ϕ) 에 중심을 둔 solid angle $d\phi d\theta \sin \phi$ 에 대한 power density spectrum을 구하면

$$d\theta d\phi \sin \theta N(f, \theta, \phi) \quad (2)$$

으로 기술된다. k 번째 선배열 센서에 평면파 신호가 도달하기까지의 소요시간이 $\tau_k(\theta, \phi)$ 이면, 이 센서에 신호가 도달되는데 적용되는 전달함수는

$$\exp\{-j2\pi f \tau_k(\theta, \phi)\} \equiv H_k(f, \theta, \phi) \quad (3)$$

이 된다. 이때, 식 (2)에 의해 omnidirectional한 특성을 갖는 k 와 j 번째 센서 출력에 대한 cross spectrum은

$$\begin{aligned} d\theta d\phi \sin \theta N(f, \theta, \phi) H_k(f, \theta, \phi) H_j^*(f, \theta, \phi) \\ = d\theta d\phi \sin \theta N(f, \theta, \phi) \\ \cdot \exp\{-j2\pi f [\tau_k(\theta, \phi) - \tau_j(\theta, \phi)]\} \quad (4) \end{aligned}$$

으로 주어진다. 다른 방향으로부터 도래되는 소음들은 상관성이 없는 것으로 가정하면, k 와 j 번째 센서 출력에 대한 cross spectrum $G_{kj}(f)$ 은 모든 angular space에 대한 성분 (4)의 합으로 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} G_{kj}(f) = \int_0^\pi d\theta \int_{-\pi}^\pi d\phi \sin \theta N(f, \theta, \phi) \\ \cdot \exp\{-j2\pi f [\tau_k(\theta, \phi) - \tau_j(\theta, \phi)]\} \\ \text{for } 1 < \dot{k}, j < M \quad (5) \end{aligned}$$

$\sin \theta N(f, \theta, \phi)$ 는 단위 solid angle당 power로, 평면파 신호 밀도이다. 즉, θ 와 ϕ 에 대한 $\sin \theta N(f, \theta, \phi)$ 의 이중적분은 주파수 f 에서 총 수신된 power density이다.

모든 k, j 에 대해, 식 (5)는 선배열의 각 센서로부터 $N(f, \theta, \phi)$ 에 대한 총 정보를 내포한다. 문제는 $[G_{kj}(f)]$ 의 측정으로부터 $N(f, \theta, \phi)$ 를 예측하는 것이다. 모든 k 에 대해 $G_{kk}(f) = G_{11}(f)$ 이고, $G_{kj}(f) = G_{jk}^*(f)$ 이며, 성분 i, j 와 i', j' 이 모든 θ, ϕ 에 대해 $\tau_i - \tau_j = \tau_{i'} - \tau_{j'}$ 인 관계를 만족하면 식 (5)는 신호공간이 공간적으로 균일한 것으로 가정될 경우, $G_{ij}(f) = G_{i'j'}(f)$ 이 성립하므로 모든 $[G_{kj}(f)]$ 가 독립된 정보를 갖지는 않는다. 최적의 예측방법은 입력으로 matrix $[G_{kj}(f)]$ 를 받아들이고, 그 출력으로 $N(f, \theta, \phi)$ 을 예측해야 한다. 이런 과정으로부터 해를 구하는 것이 역범형성이다.

2-2 역범형성 Integral Equation Solution

모든 가능한 선배열 센서쌍의 separation과 방향에 대해 신호공간의 spatial correlation을 알고 있는 경우, 식 (5)로 주어진 integral equation을 역변환하여 해를 구한다. 먼저, 연속적으로 분포된 선배열 센서 쌍들에 대한 이론적인 해를 구한 후, 실제 선배열을 구성하는 센서 쌍들로부터의 spatial correlation을 사용하여 불연속적인 근사해를 구할 수 있다. 이 장에서는 수평 선배열 센서 시스템에 대한 해를 구한다. 선배열 센서는 그림 1과 같이 $\theta = 0$ 인 축에 놓인 것으로 가정한다. d_k 가 k 번째 선배열 센서까지의 길이라면, 신호의 도달시간은

$$\tau_k(\theta, \phi) = (d_k/c) \cos \theta \quad \text{for } 1 < k < M \quad (6)$$

로 기술된다. $\theta = 0$ 과 π 는 선배열의 endfire이고, c 는 음속이다. 식 (5)와 (6)으로부터

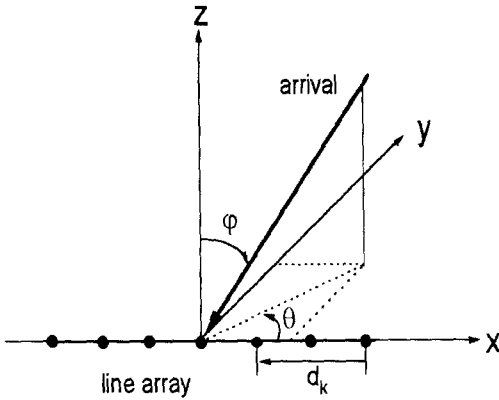


그림 1. 수평 선배열 센서 시스템의 구조도

$$\begin{aligned}
 G_{kj}(f) &= \int_0^\pi d\theta \int_{-\pi}^\pi d\phi \sin\theta N(f, \theta, \phi) \\
 &\quad \cdot \exp\left(-j2\pi f \frac{d_k - d_j}{c} \cos\theta\right) \\
 &= \int_0^\pi d\theta \sin\theta \exp\left(-j2\pi f \frac{d_k - d_j}{c} \cos\theta\right) \\
 &\quad \cdot \bar{N}(f, \theta) \quad \text{for } 1 < k < M \quad (7)
 \end{aligned}$$

인 관계가 구해지고, 적분된 신호공간의 directionality는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{N}(\theta, f) = \int_{-\pi}^\pi d\phi N(f, \theta, \phi) \quad (8)$$

그림 1에서 균일하게 분포된 선배열에 대해 $d_k = kd$, for $1 < k < M$ 로 기술될 수 있다. 여기서 d 는 선배열 센서간의 간격이다. 이때 식 (7)은

$$\begin{aligned}
 G_{kj}(f) &= \int_0^\pi d\theta \sin\theta \exp[-i\alpha(k-j)\cos\theta] \bar{N}(f, \theta) \\
 &= \int_{-1}^1 du \exp[-i\alpha(k-j)u] \bar{N} \\
 &\quad \cdot [f, \cos^{-1}(u)] \quad (9)
 \end{aligned}$$

로 기술되며, 여기서 $\alpha = \pi(f/f_0)$, $f_0 = c/2d$, $u = \cos\theta$ 이고, f_0 는 선배열의 design frequency

이다.

여기서, 편의상 다음과 같이 표기를 변환한다.

$$G(k-j) = \int_{-1}^1 du \exp[-i\alpha(k-j)u] B(u), \quad (10)$$

$$B(u) = \begin{cases} \bar{N}[f, \cos^{-1}(u)], & \text{for } -1 < u < 1 \\ 0, & \text{for } -1 < u < 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$C(p) = \int_{-1}^1 du \exp(-i\alpha pu) B(u) \quad (12)$$

식 (12)에서 주어진 spatial correlation $C(p)$ 는 $|p| < M$ 인 정수에서 뿐 아니라 모든 연속적인 p 에 대해 성립하는 것으로 생각하자. 식 (12)의 양변에 $\exp(i\alpha pu')$ $C(p)$ 를 곱하고, 모든 p 에 대해 적분을 취하면

$$\begin{aligned}
 &\int_{-\infty}^\infty dp \exp(i\alpha pu') C(p) \\
 &= \int_{-\infty}^\infty dp \exp(i\alpha pu') \int_{-1}^1 du \exp(i\alpha pu) B(u) \\
 &= \int_{-1}^1 du B(u) \frac{2\pi}{\alpha} \delta(u - u') \\
 &= \begin{cases} \frac{2f_0}{f} B(u'), & \text{if } -1 < u' < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)
 \end{aligned}$$

이 구해지며, directionality는 다음식으로 기술된다.

$$B(u) = \frac{f}{2f_0} \int_{-\infty}^\infty dp \exp(i\alpha pu) C(p) \quad \text{for } -1 < u < 1 \quad (14)$$

선배열에서 각 센서의 separation이 연속적으로 주어진 경우의 directionality를 나타내는 식 (14)를 일정한 간격으로 배열된 M 개의 센서로 구성된 수평선배열에 대해 불연속 화하면 실제 선배열 시스템에 적용할 수 있는 해가 구해진다.

$$B_{inv}(\theta, f) = \frac{1}{2M-1} \sum_{p=1-M}^{M-1} C(p, f) e^{i2\pi f d \cos \theta / c}, \quad (15)$$

$$C(p, f) = \frac{1}{M-|p|} \sum_{n=0}^{M-1-p} C(n, n+p, f), \quad 0 < p < M-1 \quad (16)$$

여기서

f : 주파수 (Hz),

c : 음속,

d : 센서간의 간격,

p : 센서 쌍의 separation,

$j-k, j, k=1, 2, \dots, M,$

θ : 방위각,

$C(p, f)$: Toeplitz covariance matrix이다.

III. 이론적 성능분석

3-1 Array Gain

M 개의 등간격으로 배열된 선배열 센서에 대해 고전빔형성기에 의한 신호공간의 directionality^[5]는

$$B_{cbf}(\theta, f) = \frac{1}{M} \sum_{p=1-M}^{M-1} \left(1 - \frac{|p|}{M}\right) \cdot C(p, f) e^{i2\pi f d \cos \theta / c} \quad (17)$$

로 기술되며, covariance matrix는 식 (16)에 의해 주어진다. 식 (15)와 식 (17)로부터, 이상적인 경우에서의 고전빔형성기의 array gain AG 는

$$AG_{cbf} = 10 \log M \quad (18)$$

으로 주어지고, 역빔형성기에 대한 array gain은

$$AG_{inv} = 10 \log (2M - 1) \quad (19)$$

으로 주어지므로, 역빔형성기는 고전빔형성기에 비해 대략 3dB 성능이 향상됨을 알 수 있다.

$$\frac{AG_{inv}}{AG_{cbf}} = 10 \log \left(\frac{2M-1}{M} \right) \approx 3 \text{dB} \quad (20)$$

따라서 소음과 신호에 대한 역빔형성기의 array gain과 최소 탐지 준위는 고전빔형성기에 대해 3 dB 향상된다.

3-2 Beamwidth

그림 2는 두 방법에 의해 예측된 규격화된 주파수 0.234375인 신호에 대한 broadside beam pattern이다. beam pattern은 신호의 도래방향에 대해 규격화되었고, 실제로, array gain의 성능향상은 역빔형성기의 beam pattern 곡선의 아래 면적이 고전빔형성기에 의한 beam pattern 곡선의 아래면적보다 대략 3dB 정도 적음을 볼 수 있다. 이것은 array noise gain에 의한 array gain의 성능향상으로, 소음이 적음을 의미한다. 그림 2는 linear scale로 도시하였는데, 그 이유는 역빔형성기에 의한 beam pattern의 일부가 음의 값을 갖기 때문이다. 역빔형성 beam pattern의 빔폭은 고전빔형성기에 의한 빔폭의 대략 68% 정도로 좁으며, beam pattern의 main lobe 외부의 일부영역에서 음의 값을 보이는데, 이것은 intensity가 음임을 의미한다. 음값의 intensity가 초래되는 원인은 Fourier series의 기본 특성에 기인하는 현상이다. 임의의 연속함

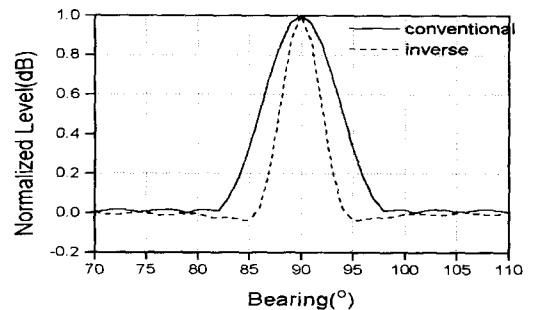


그림 2. 역빔형성기와 고전빔형성기에 의한 규격화 주파수 0.234375인 신호의 broadside array beam pattern

수가 주어졌을 때, Fourier series는 임의의 연속함수와 직교특성을 갖는 sine과 cosine 함수들의 한정된 series간의 최소자승에 의해 오차를 최소화하려는 특성을 갖는다. 일반적으로 한정된 수의 Fourier series 항을 사용한 Dirac delta function의 Fourier series 예측은 음이 될 수 있다는 사실이 잘 알려져 있다. 즉, 평면파 신호 밀도는 모든 방위각과 고각에서 양의 값이지만 최소자승의 견지에서 오차를 최소화하는 Fourier series 예측에 근거한 역빔형성기에 의해 예측된 평면파 신호 밀도는 음이 될 수 있다.

IV. Simulation에 의한 성능분석

그림 3은 선배열의 좌·우 도래방위를 구분하기 위해 Thomson사에서 고안된 좌·우 방위구분을 위한 선배열 센서 시스템의 개략도이다.

역빔형성의 성능을 분석하기 위해 그림 3에 도시된 형태의 센서로 구성된 3중 선배열 시스템에 대해 simulation을 수행하였다. 그림 4와 그림 5는 각각 역빔형성과 고전빔형성에 의한 beam pattern을 보여준다. 앞에서 언급된 것처럼 역빔형성에 의한 beam pattern은 고전빔형성에 대한 것보다 대략 3.5 dB 이상의 탐지 성능 향상을 보임을 알 수 있고, 특히, 역빔형성의 결과에서는 정확한 방위 탐지 결과를 보이는데 반해, 고전빔형성의 결과는 0°에서 30° 부근까지 방위탐지가 정확하지 않음을 보인다. 특히, endfire 근처에서는 상당히 큰 방위

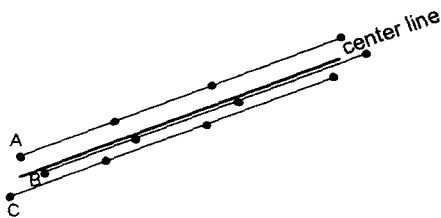


그림 3. Simulation 수행을 위해 도입된 좌·우 분리를 위한 선배열 시스템의 개략도

탐지 오차 결과를 보인다. 그림 6은 신호대 잡음비가 -9 dB인 경우의 broadside에 대한 두 결과의 intensity level을 보여준다. 역빔형성의 결과는 음의 intensity를 갖기 때문에 편의상 intensity가 0보다 큰 경우에 대한 결과를 그림으로 표시하였다. 식 (20)에서 언급된 것처럼, 주 탐지 방위에 대해서는 역빔형성기에 의한 결과가 고전빔형성기에 의한 결과에 비해 대략 3.5 dB 이상의 성능 향상을 보이며, 대칭 방위에 대해서는 Conventional beam-former의 경우 -40 dB를 나타내나 Inverse beam-former에 의한 결과는 음의 intensity를 나타낸다.

탐지 성능 향상을 보임을 알 수 있고, 특히, 역빔형성의 결과에서는 정확한 방위 탐지 결과를 보이는데 반해, 고전빔형성의 결과는 0°에서 30° 부근까지 방위탐지가 정확하지 않음을 보인다. 특히, endfire 근처에서는 상당히 큰 방위탐지 오차 결과

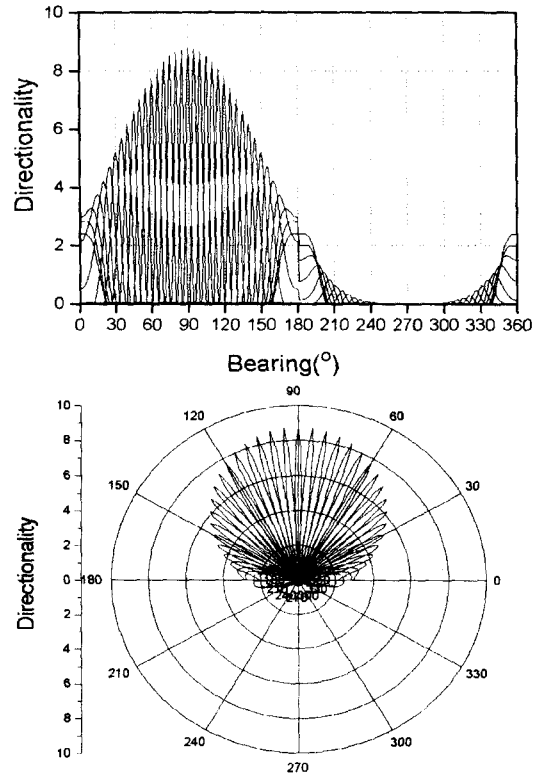


그림 4. 역빔형성에 의한 beam pattern

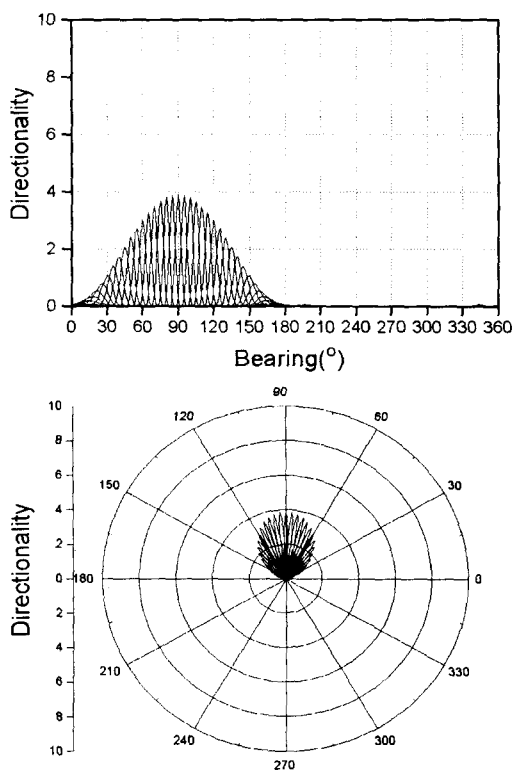


그림 5. 고전빔형성에 의한 beam pattern

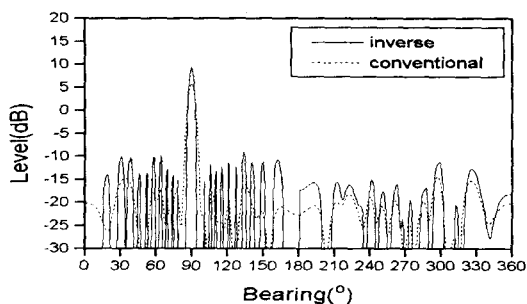


그림 6. 역빔형성과 Conventional beamformer에 의한 broadside 방위 탐지 결과의 Intensity Level(신호대 잡음비 -9dB)

를 보인다. 그림 6은 신호대 잡음비가 -9dB인 경우의 broadside에 대한 두 결과의 intensity level을 보여준다. Inverse beamforming의 결과는 음의 intensity를 갖기 때문에 편의상 intensity가 0보다 큰 경우에 대한 결과를 그림으로 표시하였다. 식 (20)

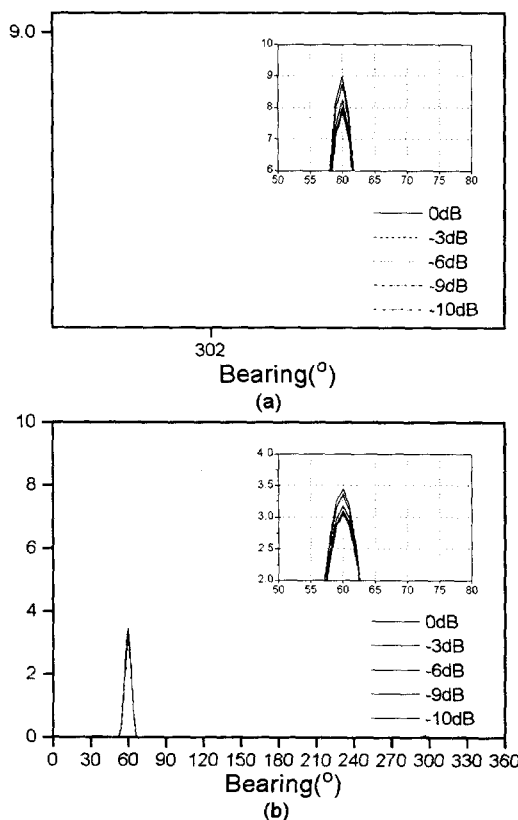


그림 7. 신호대 잡음비의 변화에 따른 빔형성 성능비교 (규격화주파수:0.234375). (a) 역빔형성 결과, (b) 고전빔형성결과

에서 언급된 것처럼, 주 탐지 방위에 대해서는 역빔형성기에 의한 결과가 고전빔형성기에 의한 결과에 비해 대략 3.5 dB 이상의 성능 향상을 보이며, 대칭 방위에 대해서는 Conventional beamformer의 경우 -40 dB를 나타내나 Inverse beamformer에 의한 결과는 음의 intensity를 나타낸다.

그림 7은 신호 대 잡음비의 변화에 따른 두 beamformer에 의한 성능을 비교한 결과이다. simulation은 규격화 주파수 0.234375, 60°인 경우에 대해 수행하였으며 신호 대 잡음비는 0 dB에서 -10 dB 까지의 Gaussian noise를 변화시켜 방위 탐지 성능을 분석하였다. 두 경우 모두 신호 대 잡음비의 감소에 따라 intensity가 다소 감소되나, 역빔형

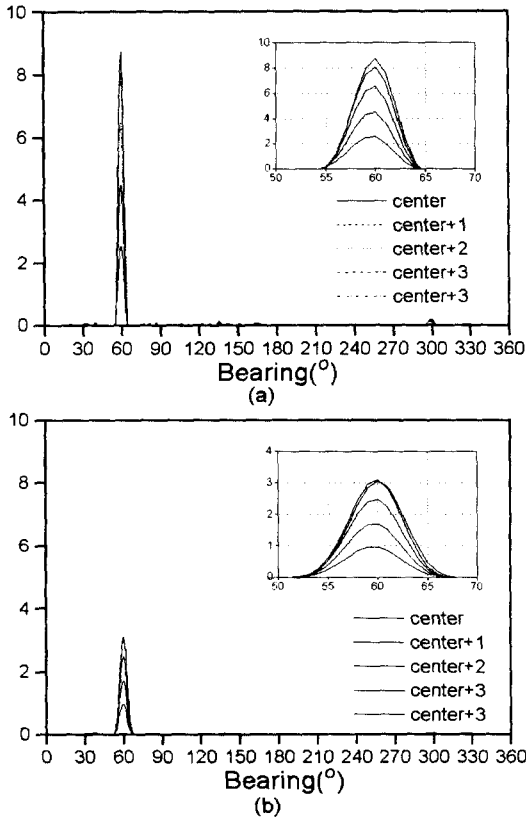


그림 8. 도래신호의 주파수가 빔형성기의 bin의 중심 주파수와 일치하지 않는 경우의 빔형성 성능 (신호대잡음비: -9 dB, 도래방위: 60° , 규격화주파수: 0.234375). (a) 역빔형성 결과, (b) 고전빔형성 결과

성기에 의한 방위탐지성능이 상당히 우수함을 볼 수 있다.

도래하는 신호의 주파수가 주파수 bin의 중심주파수와 일치하지 않음으로써 발생하는 오차를 분석하기 위해, 주파수 bin에 대해 신호 대 잡음비가 -9 dB인 경우에 임의의 주파수 bin의 중심주파수와 1 Hz 간격으로 4 Hz까지 중심주파수로부터 벗어난 신호를 60° 방위로 발생하여 두 beamformer에 의한 탐지성능을 비교하였다. 그림 8에 표시된 결과에서 볼 수 있는 것처럼 주파수의 부정확도에 따라 두 beamformer 모두 탐지성능이 감소함을 보

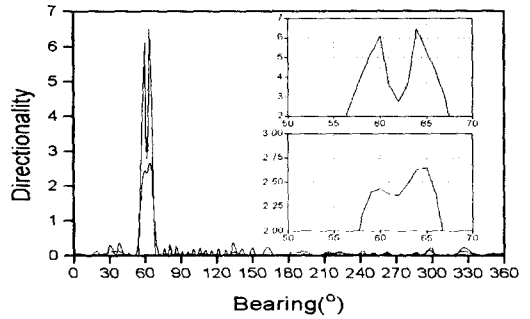
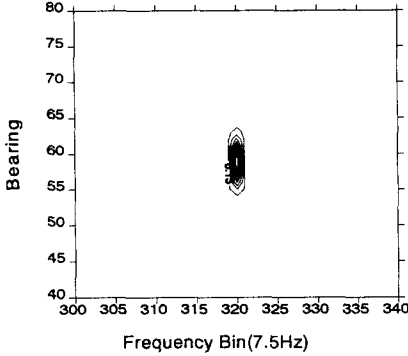
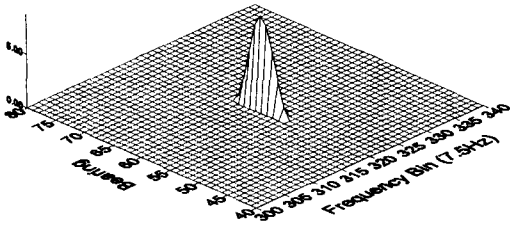


그림 9. 도래하는 신호의 인접방위 분해 성능(신호의 신호대 잡음비: -9 dB, 도래 방위: 60° , 64° , 규격화주파수: 0.234375). (a) 역빔형성, (b) 고전빔형성에 의한 방위탐지

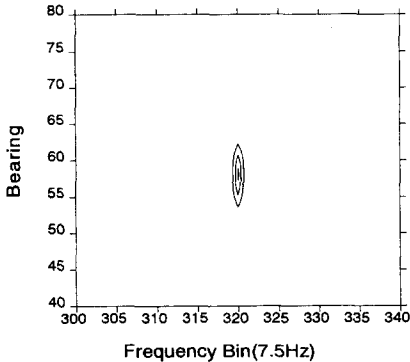
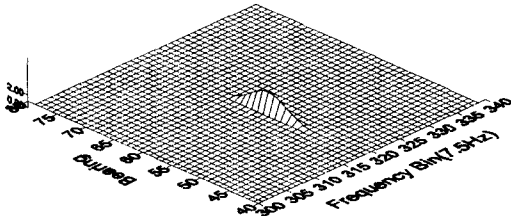
이나 고전빔형성기에 의한 결과보다는 역빔형성기에 의한 성능이 우수함을 볼 수 있다.

그림 9는 여러개의 표적이 인접하여 도래하는 경우의 두 방법에 의한 인접방위 분해성능을 분석하기 위하여 신호 대 잡음비가 -9 dB로 주어진 경우에 대해 60° 와 64° 로 신호가 도래하는 경우의 탐지방위 분리성능 분석결과를 보여준다. 분석결과 역빔형성기는 명확히 좌·우 방위가 구분되는데 반해 고전빔형성기는 방위 분리뿐 아니라 정확한 방위 탐지도 되지 않음을 명백히 보여준다. 두 beamformer 모두 주파수와 신호 대 잡음비 및 센서의 수에 따라 방위분해 성능이 결정되나, 고전빔형성기에 비해 역빔형성기에 의한 성능이 상당히 우수함을 알 수 있다.

그림 10은 신호 대 잡음비가 -9 dB로 주어진 경우, 60° 방위에서 신호가 도래하는 경우에 대한 (a) 역빔형성기법과 (b) 고전빔형성기법에 의해 예측된 FRAZ(frequency to azimuth) curve를 보여준다. 결과에서처럼, 고전빔형성기에 의한 결과에 비해 역빔형성기에 의한 결과는 도래방위의 분해능과 탐지이득이 향상됨을 명확하게 나타낸다. 이 결과는 낮은 신호대잡음비인 표적의 신호로부터 정확한 도래방위의 예측이 가능함을 의미하며, 표적의 도래방위 탐지를 위한 신호처리방법으로써 보편적으로 사용되는 LOFAR의 성능을 향상시킬



(a)



(b)

그림 10. 신호 대 잡음비가 -9 dB이고, 규격화주파수가 0.234375 인 신호가 60° 의 방위로 도래하는 경우에 대해 (a) 역빔형성기법과 (b) 고전빔형성기법에 의해 simulation된 FRAZ curve.

수 있음을 의미한다.

V. 결 론

복잡한 다중경로 환경하에서 표적으로부터 발생되는 신호의 방위를 탐지하기 위한 알고리즘으로써 역빔형성을 도입하여, 이론적 고찰 및 simulation을 통한 성능을 분석하였고, 그 결과를 선배열 센서 system에 가장 보편적으로 사용하는 알고리즘인 고전빔형성에 의한 simulation 결과와 비교 분석하였다. 또한, 표적신호의 도래방위의 좌·우구분을 위한 Conventional-Cardioid 빔형성 알고리즘에 IBF 알고리즘을 적용한 IBF-Cardioid 빔형성 알고리즘을 제안하고, 그 탐지성능을 비교분석하였다. 분석결과 IBF에 의한 성능은 CBF에 비해 최소 탐지 준위가 신호의 도래방향에서 3 dB 이상 향상됨을 입증하였고, 표적신호의 도래방위를 정확하게 탐지 할 수 있는 빔폭이 고전빔형성기에 의한 빔폭의 68% 정도로써 정확한 방위 분해능을 가짐을 입증하였다. IBF 알고리즘이 적용된 IBF-Cardioid 빔형성기에 의한 성능은 Conventional Cardioid 빔형성기에 의한 성능과 비교하여, 최소탐지 준위, 탐지분해능, 탐지방위의 정확도의 성능이 향상됨을 입증하였고, 특히 선배열의 endfire에서 정확하게 빔이 형성되어 정확한 탐지가 수행됨을 증명하였다.

참 고 문 헌

[1] J. H. Wilson, "Signal Detection and Localization Using the Fourier Series Method and Cross-Sensor Data," *J. Acoust. Soc. Am.*, **73**, pp. 1648-1656, 1983.
 [2] C. W. Helstrom, *Statistical Theory of a Signal Detection*, (Pergamon, Oxford, 1960), pp. 37-44.
 [3] W. S. Burdick, *Underwater Acoustic System*

Analysis, (Prentice Hall, New Jersey, 1991), pp. 390-417.

- [4] J. Carpon, "High-resolution frequency-wave-number spectrum analysis," *IEEE Proc.*, **57**, pp. 1408-1418, 1969.
- [5] R. O. Nielsen, *Sonar Signal Processing*, Artech House, Boston & London, 1991, pp.

51-94.

- [6] G. W. M. Van Mierlo, S. P. Beerens, R. Been, Y. Doisy, and E. Trouve', "Port/Starboard discrimination by hydrophone triplets in active and passive towed arrays," *UDT Proc.*, pp. 176-181, 1997.

오 효 성



1986년 2월: 경희대학교 전자공학과 (공학사)
 1990년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학석사)
 1999년 8월: 아주대학교 전자공학과 (공학박사)
 1986년~현재: LG정밀 책임연구원

[주 관심분야] 수중음향 신호처리, 방향탐지

강 성 현

1983년 2월: 서강대학교 전자공학과(공학사)
 1985년 2월: 서강대학교 전자공학과(공학석사)
 1985년~현재: LG정밀 책임연구원
 [주 관심분야] 레이더/소나 신호처리, 영상신호처리

김 의 준

1987년 2월: 성균관대학교 물리학과(이학사)
 1989년 2월: 성균관대학교 대학원 물리학과(이학석사)
 1997년 2월: 성균관대학교 대학원 물리학과(이학박사)
 1996년~현재: LG정밀 선임연구원
 [주 관심분야] 소나 신호처리, 영상신호처리

고 정 태

1978년 2월: 한양대학교 전자공학과(공학사)
 1985년 9월: 한양대학교 전자공학과(공학석사)
 1996년 7월: 퍼스픽웨스턴 대학 전기공학과(공학박사)
 [주 관심분야] 수중음향 신호처리, 방향탐지

김 용 득

1971년: 연세대학교 전자공학과(공학사)
 1973년: 연세대학교 대학원(공학석사)
 1978년: 연세대학교 대학원(공학박사)
 1973년~1974년: 프랑스 ESE연구원
 1978년~1980년: 미국 Stanford대학교 연구교수 재직
 1978년~현재: 아주대학교 전자공학과 교수
 [주 관심분야] 디지털 시스템에 관련된 하드웨어 응용
 특히 FA, OA 네트워크 응용과 접속방안, 멀티미디어 시스템 구축과 화상전송방식, ISDN망 접속, 소나신호처리