

광대역 좌/우 분리 빔 형성 기법 연구

○
 천 승 용, 이 형 옥, 황 수 복, 윤 경 식
 국방과학연구소

(A Study of Wideband Beamforming for Left/Right Discrimination)

○
 Chun, S.Y., Lee, H.O., Hwang, S.B. and Yoon, G.S.
 Agency for Defence Development

요 약 문

일반적인 빔 형성기는 표적의 방위탐지가 가능하지만, 구조적인 특성상 대칭적인 빔을 형성하므로 표적의 좌/우 방위 구분이 불가능하기 때문에 표적의 정확한 방위를 탐지하고자 할 때 좌/우 구분이 가능한 빔 형성이 필요하다.

좌/우 분리 빔 형성 기법으로는 카디오이드(Cardiod) 빔 형성기법을 일반적인 빔 형성기에 적용시키는 방법이 최적으로 알려져 왔다. 그러나 좌/우 분리 빔을 형성하기 위해서는 많은 연산량과 하드웨어 설계에 대한 고려가 있어야 한다.

본 논문에서는 좌/우 분리 빔 형성을 위하여 주파수 빔 형성기법과 카디오이드 빔 형성기법을 합성하여 적용하였다. 주파수 빔 형성 기법은 짧은 수행시간 동안에 표적의 정보추출을 위하여 고려되었으며, 카디오이드 빔 형성기법은 3개의 센서를 이용하여 센서의 기울기를 보상하여 수행하는 기법을 적용하였다. 또한 방향성 있는 시뮬레이션 신호를 생성하여 좌/우 분리 빔 형성 시뮬레이션을 수행하였다.

1. 서 론

일반적인 빔 형성기는 표적의 방위탐지가 가능하지만, 구조적인 특성상 배열축을 중심으로 대칭적인 빔을 형성하여 좌/우에서 들어오는 신호가 같은 크기로 나타나기 때문에 기존의 빔 형성기법에 의한 방법으로는 좌/우 방위 구분이 불가능하다[1]. 좌/우 구분을 위한 방법으로는 통계적 처리방법과 카디오이드 빔 형성 방법이 연구되어 왔다. 통계적 처리방법은 1981년에 Wagstaff 와 Zamasca가 제안한 방법으로 탐지구역내의 소음원 분포를 모델링하여 통계적 처리하는 것으로 이는 탐지구역과 고려된 소음원 모델이 정확하지 않을 경우 좌/우 분리 능력이 상당히 떨어지는 제약점이 있다[2]. 카디오이드 빔 형성방법은 2개의 센서를 이용하여 배열축에 미리 좌/우에 대한 빔을 형성하여 빔 형성기에 적용시키는 방법으로 이는 빔 형성기에 좌/우 구분 능력을 가능하게 하지만 센서의 예민성 발생하는 센서의 기울어짐에 대한 고려가 필요하다[3]. 본 연구소에서는 3개의 센서를 이용하여 센서의 기울어짐을 보상할 수 있는 카디오이드 빔 형성 기법을 제안한 바 있다. 그러나 3XN 센서에 대

한 연산량 및 연산방법과 이를 비교적 단순한 하드웨어 구성방안이 고려되어야한다[4].

본 논문에서는 좌/우 분리 빔 형성을 위하여 주파수 영역 빔 형성기법과 카디오이드 빔 형성기법을 합성하여 적용하였다. 주파수 빔 형성 기법은 카디오이드 빔 형성을 위한 전단계 과정으로 고속의 샘플율을 필요로 하는 시간 영역 빔 형성기법과는 달리 나이퀴스트(Nyquist) 샘플을 만으로 충분하며, 또한 표적의 정보 추출을 위해 필요한 FFT처리과정이 불필요하므로 신호처리 수행시간이 시간이 짧은 장점이 있어 적용하였으며[5][6], 3XN 센서에 대한 Data 처리를 중심하여 수행하였다. 카디오이드 빔 형성 기법은 3개의 센서를 이용하여 센서의 기울기를 보상 할 수 있는 기법을 적용시켰다. 이를 검증하기 위하여 방향성 있는 시뮬레이션 신호를 생성하였으며, 생성된 시뮬레이션 신호를 좌/우 분리 빔 형성에 적용하였다.

2. 주파수 영역 빔 형성기법

주파수 빔 형성기법은 일정간격으로 d로 배열된 센서에 수신되는 신호를 FFT를 수행한 후 주파수에 따른 위상 편이량을 계산함으로써 주파수에 대한 빔을 형성하는 기법이며, (그림 1)은 8개의 센서를 이용한 주파수 영역 빔 형성 구조를 나타낸 것이다.

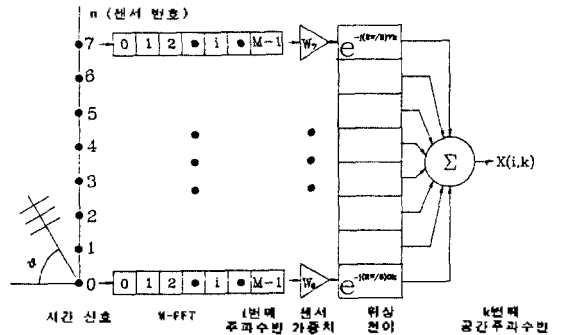


그림 1. 8개 센서에 대한 주파수 영역 빔 형성 구조
 (그림 1)에서 보면 각 센서에 수신되는 신호를 수행하고자 하는 주파수 대역의 나이퀴스트 샘플을 F_s 로 샘플링하여 M 개 만큼 수집한 다음 채널별 M -FFT를 수행한다. M -FFT를 수행한 후, i 번째 주파수 f_i 의 k 번째 빔 지향각 θ_k 에 대한 식은 식(1)과 같다.

일반 주파수 빔 형성기와 거의 동일한 형태를 이루지만 전 바위에 대한 카디오이드 처리를 위하여 테이타를 2배로 확장하여 넘겨준다.

5. 시뮬레이션

지향성 있는 시뮬레이션 신호를 만들기 위해서는 좌/우 방향 및 3개의 센서에 도착하는 시간 지연들을 계산해야 한다. 본 논문에서는 센서 1을 중심으로 하여, 센서 2와 3에 도착하는 시간 신호의 시간지연을 계산하였으며, 좌/우 방향성을 가지도록 하였다.

(그림 9)는 배열센서를 위에서 바라보았을 때의 그림이며, (그림 9)와 같이 신호가 입사할 때 센서 2에 수신되는 신호시간은 센서 1에 수신되는 신호시간에 비해 $t_1 = (d_1/2) \cos \theta$; 만큼 빠르며, 센서 3은 t_1 만큼 센서 1의 신호도달 시간보다 늦다. 이를 식으로 나타내면 식(8)과 같이 각 센서에 시간 지연을 첨가하여 나타낼 수 있다.

$$X_i(n) = \sum_{j=0}^{N-1} \sin(2\pi f_i(j + (f_s \cdot i - d \sin \theta)/f_s + a)) \quad (8)$$

센서 1 :

$$X_{a1}(n) = X_i(n), \quad a = 0$$

센서 2 :

$$X_{a2}(n) = X_i(n), \quad a = D \cdot i / C \cdot f_s$$

$$D = \begin{bmatrix} -1 : 좌 \\ 1 : 우 \end{bmatrix}$$

센서 3 :

$$X_{a3}(n) = X_i(n), \quad a = D \cdot i / C \cdot f_s$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 : 좌 \\ -1 : 우 \end{bmatrix}$$

이와 같은 방법으로 생성된 모의신호는 좌/우 방향 및 신호 입사 방향 정보를 가지고 있으므로, 좌/우 분리 빔 형성기법에 적용시켜 시뮬레이션 하였다. (그림 10)은 좌/우 각각 90° 방향에 대한 빔 패턴을 나타낸 것이다.

6. 결 론

일반적인 빔 형성기는 표적의 방위탐지가 가능하지만, 구조적인 특성상 대칭적인 빔을 형성하므로 표적의 좌/우 방위구분이 불가능하기 때문에 표적의 정확한 방위를 탐지하고자 할 때 좌/우 구분이 가능한 빔 형성기가 필수적이다.

본 논문에서는 좌/우 분리 빔 형성을 위하여 주파수 빔형성기법과 카디오이드 빔 형성기법을 합성하여 적용하였으며, 센서의 기울어짐을 보정하기 위하여 3개의 센서 불사용함에 따라 이를 수행하기 위한 주파수 빔 형성기 불보완하여 카디오이드 빔 형성에 적용하였다. 또한 방향성 있는 시뮬레이션 신호를 생성하는 방법을 제안하였고, 이 신호를 이용하여 적용한 결과 일반 빔 형성기와는 달리 좌/우 분리가 가능함을 보였다. 그러나 본 논문에서 적용한 시뮬레이션 신호는 배열센서와 동일 선상에서 표적이 접근하는 경우 인데 표적이 배열센서와 동일 선상에 존재하지 않는 경우가 고려되어야 하며, 주파수 빔 형성 기법 수행시 발생하는 분실 빔에 대한 고려도 필요하다.

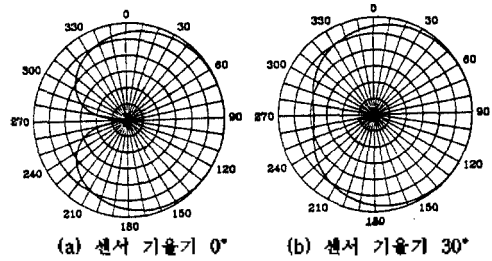


그림 6. 위상지연 $\delta = kd$ 인 경우 카디오이드 빔출력

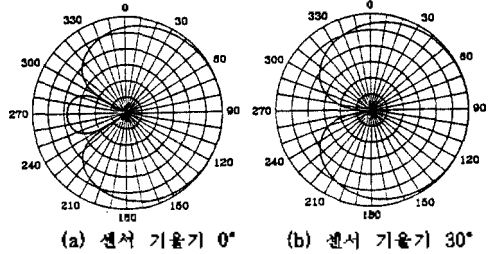


그림 7. 위상지연 $\delta = kd \cos 30^\circ$ 인 경우 카디오이드 빔출력

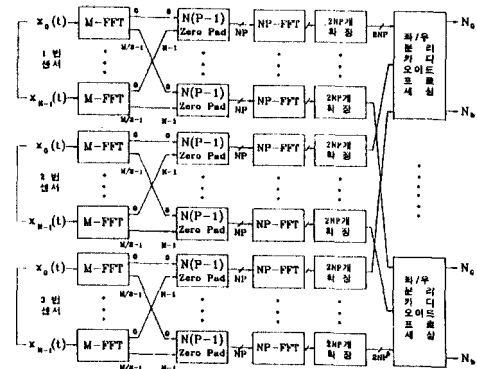


그림 8. 좌/우 분리 빔 형성 구조

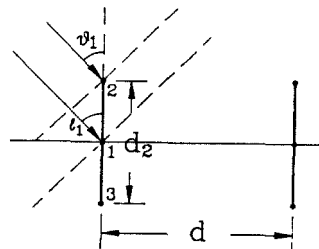


그림 9. 3XN 센서에 전달되는 음파의 지연시간

$$B(f_s, \theta_{s1}) = \sum_{n=0}^{N-1} W_n X_n(i) \exp(-j(2\pi n f_s r(\theta_{s1}))) \quad (1)$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} W_n X_n(i) \exp(-j(2\pi n f_s d \sin \theta_{s1} / c))$$

$B(f_s, \theta_{s1})$: 주파수 f_s 에 대한 지향각 θ_{s1} 의 빔 출력
 W_n : 센서 n 의 가중 상수
 $X_n(i)$: n 번째 센서의 FFT 출력 신호
 N : 센서의 총 개수

식(1)에서 $r(\theta_{s1})$ 는 입사되는 신호가 각 센서에 도달하는 시간 지연이다. 또한 식(1)은 DFT식과 동일한 형태이므로 이를 FFT 방법을 이용하면 다음과 같다.

$$B(i, k) = \sum_{n=0}^{N-1} W_n X_n(i) \exp(-j(2\pi/N)nk) \quad (2)$$

여기서 식(1)의 f_s 와 θ_{s1} 는 식(2)의 i 와 k 에 대응하면, FFT 수행후 i 번째 빈에 대한 k 번째 빔 지향각은 식(3)과 같이 표현된다.

$$2\pi \cdot n \cdot f_s \cdot d \sin \theta_{s1} / C = 2\pi \cdot n \cdot k / N$$

$$\sin \theta_{s1} = \frac{1}{f_s} \cdot \frac{C}{d} \cdot \frac{k}{N} \quad (3)$$

$$= \frac{1}{f_s} \cdot \frac{M}{N} \cdot \frac{k}{i} \cdot \frac{C}{d}$$

(그림 2)는 11개의 주파수와 빔 수 8인 경우에 방위계수가 존재하는 곳을 나타낸 것이다.

식(3)에서 구해진 방위각 θ_{s1} 는 i 번째 주파수 f_s 의 k 번째 빔 지향각이 된다. 그러나 식(2)와 같이 FFT를 이용한 빔 출력의 방위각은 요구하는 방위각 θ_s 에 직접 적용할 수 없다. 왜냐하면 FFT방법은 각 주파수에 대한 방위각이 식(3)과 같이 고정되기 때문이며, 식(3)에서 주파수와 방위각의 변화가 서로 역비례의 관계를 가지고 있음을 볼 수 있다. 이를 파수 K 와 주파수 f 의 관계식으로 표현하면 식(4)과 같다.

$$K = 2\pi f d / C \sin \theta = \pi (f / f_s) \sin \theta \quad (4)$$

K : 파수(Wavenumber)
 f : 수신 신호 주파수
 θ : 신호 입사각
 f_s : 배열의 최대 차단 주파수 (Cutoff Frequency)

(그림 2)는 11개의 주파수와 빔 수 8인 경우에 방위계수가 존재하는 곳을 나타낸 것이다.

(그림 2)에서 알 수 있듯이 최대 차단 주파수에서는 모든 샘플을 사용할 수 있으나, 주파수가 낮을수록 사용 가능한 샘플수가 적어서 분실 빔이 증가됨을 알 수 있다.

본 논문에서는 분실빔을 줄이기 위한 방법으로 Zero-padding을 이용하여 FFT를 취하는 FFT방법을 적용하였다. 이때 구해지는 방위 θ_m 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있으며, (그림 3)은 분실빔이 없는 상태에서 방위 계수가 존재하는 형태를 표현한 것이다.

$$\theta_m = \sin^{-1}(C/NPd \cdot M/f_s \cdot k/i) \quad (5)$$

앞에서 설명한 과정들을 종합하여 N 개의 센서에 대한 주파수 빔 형성구조를 표현하면 (그림 4)와 같이 나타낸다.

3. 카디오이드 빔 형성기법

카디오이드 빔 형성기법은 수평면 상의 배열축과 수직 방향으로 2개의 센서를 배열하여 좌/우 방위에 대하여 지향성을 가지는 카디오이드 빔을 형성하여 좌/우 구분을

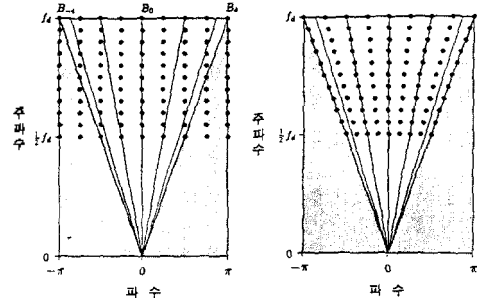


그림 2. 11개의 주파수, 빔수 8인 경우의 주파수대 파수 격자
 그림 3. 분실 빔이 없는 상태의 주파수 대 파수격자

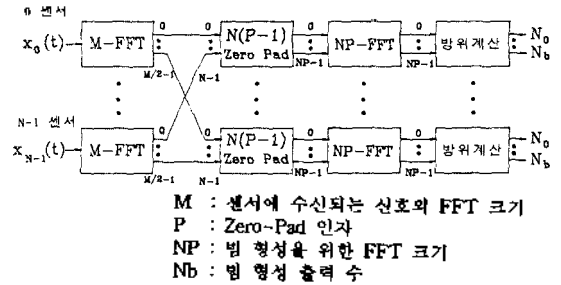


그림 4. N개의 센서에 대한 주파수 영역 빔 형성구조

가능토록 하는 방법이다. 그러나 센서의 예인시 2개의 센서가 기울어지는 것에 대한 보상이 필요하다. 이를 보상하기 위한 방법은 3개의 센서를 정삼각형으로 배치하고 수평면 상의 중간에 있는 센서를 기준으로 나머지 2개 센서의 가중 상수값을 조정하여 수평면 상에 2개의 센서를 존재토록 하여 카디오이드 빔을 형성하는 방법이다.

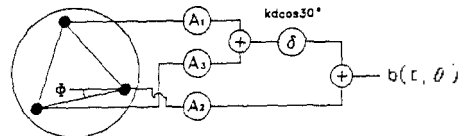


그림 5. 3개의 센서를 이용한 카디오이드 빔 형성 원리

(그림 5)는 3개의 센서를 이용하여 카디오이드 빔을 형성하는 그림이며, 식 (6)와 식 (7)은 각 센서에 적용되는 가중상수의 값과 카디오이드 빔 출력을 나타낸 것이다.

$$A_1 = 1 - \sin \theta$$

$$A_2 = -1$$

$$A_3 = \sin \theta \quad (6)$$

$$B(f, \theta) = A_1 \cdot x(f) \exp(jKd \cos \theta \cos \theta) + jKd \cos 30^\circ$$

$$+ A_2 \cdot x(f) \exp(jKd \cos(60^\circ - \theta) + Kd \cos 30^\circ)$$

$$+ A_3 \cdot x(f) \quad (7)$$

이와 같은 방법으로 카디오이드 빔을 형성하였을 때 $\theta = kd$ 로 한 경우와 $\theta = kd \cos 30^\circ$ 로 한 경우는 각각 (그림6)과 (그림7)과 같다.

4. 좌/우 분리의 빔 형성구조

본 논문에서 제안하는 좌/우 분리 빔 형성의 전체적인 구조는 (그림 8)과 같다. 3XN 센서에 수신되는 신호를 빔 형성하기 위하여 주파수 영역 빔 형성기는 먼저 각 센서에 대하여 FFT 처리 및 Zero-padding 과정까지는

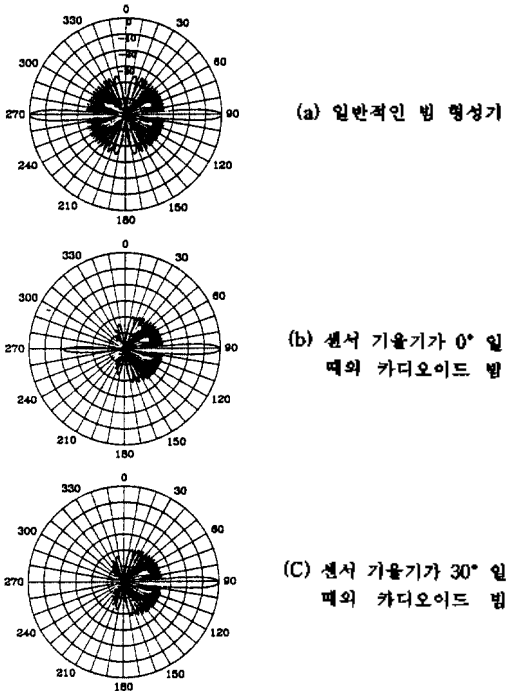


그림 10. 지향각 90° 에서 센서 기울기에 따른 빔 패턴

참 고 문 헌

- [1] Richard O.Nielsen, "Sonar Signal Processing", A-rtch House Inc.,1991.
- [2] Wagstaff, R.A. "Horizontal Directionality Estimation Considering array tilt and noise field vertical-arrival structure", J. Acoust. Soc. Am. 67(4), 1980, PP1287-1294.
- [3] Charles .Lebianc, "Handbook of Hydrophone Element Design Technology", NUSC, 1978.
- [4] 이형욱, 노경호, 이성운, "과/우 빔 형성기법 연구", 수중음향 학술 발표회, 1992년 6월.
- [5] R.A.Mucci,"A Comparison of Efficient Beamforming Algorithm", IEEE Trans. on Acoust, Speech and Signal Proc, Vol.ASSP-32, No.3, June, 1984.
- [6] DeFatta, Lucas, Hodgkiss, Digital Signal Processing : A System Design Approach, JOHN WILEY & SONS, INC., 1988.