

빠른 속도로 기동하는 표적 환경에 적합한 조향각 오차 보정기법

Steering Angle Error Compensation Algorithm Appropriate for Rapidly Moving Sources

박 규 태*, 박 도 현**, 이 정 훈*, 이 균 경**

(Gyu-Tae Park*, Do-Hyun Park**, Jung-Hoon Lee*, Kyun-Kyung Lee**)

*LG 이노텍(주), **경북대학교 전자전기공학부

(접수일자: 2004년 2월 16일; 채택일자: 2004년 3월 25일)

본 논문에서는 수중에서 빠른 속도로 기동하는 표적 환경에 적합한 조향각 오차 보정기법을 제안한다. 기존의 협대역 조향각 오차 보정기법에서는 다수의 시간 데이터 단편을 이용한 반면, 제안한 기법은 하나의 시간 데이터 단편에서 다수의 주파수 성분들로부터 모드 공분산행렬을 구성하고, 이를 이용하여 얻어진 광대역 MVDR (Minimum Variance Distortionless Response) 빔출력을 최대화시키는 조향각 오차를 추정함으로써 짧은 관측시간 내에 정확한 표적의 방위각을 추정할 수 있다. 모의신호와 실제 해상 실험 데이터를 이용하여 제안한 기법의 성능을 기존의 기법과 비교, 분석하였다.

핵심용어: MVDR, 조향각 오차 보정기법, 이동 표적, 짧은 관측시간, 모드공간기법

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

This paper presents a steering angle error compensation (SAEC) algorithm that is appropriate for rapidly moving sources. The proposed algorithm utilizes a modal covariance matrix from multiple frequency components instead of the multiple snapshots in a narrowband SAEC, and estimates the steering error by maximizing the wideband MVDR output power using a first-order Taylor series approximation of the modal steering vector in terms of the steering error. As such, the steering error can be compensated with short observation times. Several simulations using artificial and sea trial data are used to demonstrate the performance of the proposed algorithm.

Keywords: MVDR, SAEC, Moving target, Short observation times, Modal space processing

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.6)

I. 서론

강한 간섭 소음원의 영향이 심한 항만 환경의 경우 일반적인 지연합 빔형성기법 (delay sum beamforming)의 표적 방위각 추정성능은 크게 저하된다. 반면 MVDR 기법은 미리 가정된 조향방향의 빔출력은 일정상수로 고정시키고 원하지 않는 방향의 간섭신호의 영향을 최소화하는 적응 빔형성기법 (adaptive beamforming)으로서 강한 간섭 신호원이 많이 존재하는 항만 환경에 적합한 빔형성

기법이다. 그런데 실제 환경에서는 제한된 개수의 방향으로 조향 빔을 형성하기 때문에 미리 가정된 조향방향과 실제 신호가 배열센서에 입사하는 방향이 정확하게 일치하지 않을 수 있다.

이러한 경우 MVDR 빔형성기는 실제 신호를 간섭신호로 잘못 판단하여 이를 억제함으로써, 신호제거현상 (signal cancellation)이 발생하고 이는 곧 MVDR의 성능 저하를 가져오게 된다. 이러한 조향각 오차에 의한 MVDR 빔형성기의 성능 저하를 줄이기 위하여 여러 가지 기법들이 제안되었다[1-3]. 이들 중 Er 등은 조향각이 신호 입사 방향과 일치하게 되면 MVDR 빔출력이 극부 최대값을 가진다는 사실을 이용하여 비교적 간단하게 조향각 오차를 보정하는 기법을 제안하였다[3]. Er 등은 제안한 조향각 오차

책임저자: 이 균 경(kklee@ee.knu.ac.kr)
702-701 대구광역시 북구 신격동 1370
경북대학교 공과대학 전자전기공학부
(전화: 053-950-5546; 팩스: 053-950-5505)

보정기법 (SAEC: Steering Angle Error Compensation)에서 조향 벡터를 조향각 오차에 대하여 1차 테일러 급수로 근사화시키고 이를 이용하여 표현되는 MVDR 빔 출력을 최대화시키는 조향각 오차를 추정하였다. 그러나, 이 기법은 안정된 공분산행렬을 추정하기 위해서 긴 관측 시간동안의 시간 데이터를 필요로 하기 때문에 빠른 속도로 기동하는 표적 환경에는 적합하지 않다.

짧은 관측시간 데이터를 가지고 안정된 공분산행렬을 구하는 방법으로 초점 (focused) 빔형성기법(4), STMV (STeered Minimum Variance) 기법(5), 모드공간기법 (modal space processing)(6) 등이 제안되었다. 이들 기법은 각 주파수 별로 다수의 시간 데이터 단편을 이용하는 대신에 한 데이터 단편 내 다수의 주파수 정보를 이용함으로써 짧은 관측시간 내에 안정된 공분산행렬을 구할 수 있다.

본 논문에서는 초점 빔형성기법에서 발생하는 방위각 추정 바이어스 문제가 없고 STMV와 달리 SAEC기법에 적용하기 쉬운 모드공간기법을 이용하여 조향각 오차를 보정하는 기법을 제안한다. 모드공간기법은 주파수에 따라 서로 다른 조향 벡터를 주파수와 무관한 모드 조향 벡터로 변환시키는 모드 변환 행렬을 이용하여, 신호의 주파수 대역 내 각각의 주파수에서의 배열센서 출력과 모드 변환 행렬과의 곱들의 평균의 형태로 모드 공분산행렬을 구성한다. 다수의 주파수 정보를 이용하여 구성된 모드 공분산행렬과 모드 조향 벡터를 이용하여 단 하나의 데이터 단편을 가지고도 광대역 MVDR 빔 에너지를 얻을 수 있다.

제안한 조향각 오차 보정기법은 조향각 오차에 대하여 1차 테일러 급수로 근사화시킨 모드 조향 벡터를 이용하여 표현되는 광대역 MVDR 빔출력 에너지를 최대화시키는 조향각 오차를 추정하고, 추정된 조향각 오차를 보정함으로써 하나의 데이터 단편만 가지고 효과적으로 표적의 방위각을 정확하게 추정할 수 있다.

II. 협대역 조향각 오차 보정기법 (협대역 SAEC)

배열센서 중심 $x_0 = 0$ 을 중심으로 각각 x_{-Q} , x_{-Q+1} , ..., x_0 , ..., x_{Q-1} , x_Q 거리만큼 떨어진 $2Q+1$ 개의 센서로 구성된 등간격 선형 배열센서에 L 개의 광대역 신호가 입사되는 경우, m 번째 주파수선 f_m 에서의 배열센서 출력은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(k_m) &= \sum_{i=1}^L \mathbf{a}(\theta_i; k_m) s_i(k_m) + \mathbf{n}(k_m) \\ &= \mathbf{A}(\Theta; k_m) \mathbf{s}(k_m) + \mathbf{n}(k_m) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $k_m = 2\pi f_m / c$ 는 파수 (wave number)이고 c 는 음파의 전달 속도이다. 그리고, θ_i 은 i 번째 표적 신호의 입사 방위각, $s_i(k_m)$ 은 i 번째 음원으로부터 배열센서 중심센서로 입사된 신호이고, $\mathbf{n}(k_m)$ 은 잡음 벡터이다. 신호 벡터 $\mathbf{s}(k_m)$ 와 방향 행렬 $\mathbf{A}(\Theta; k_m)$ 는 각각 다음의 식과 같다.

$$\mathbf{s}(k_m) = [s_1(k_m) \ s_2(k_m) \ \dots \ s_L(k_m)]^T \quad (2)$$

$$\mathbf{A}(\Theta; k_m) = [\mathbf{a}(\theta_1; k_m) \ \mathbf{a}(\theta_2; k_m) \ \dots \ \mathbf{a}(\theta_L; k_m)] \quad (3)$$

식 (3)에서 조향 벡터 $\mathbf{a}(\theta; k_m)$ 는 다음 식과 같다.

$$\mathbf{a}(\theta; k_m) = [e^{jk_m x_{-Q} \cos \theta} \ e^{jk_m x_{-Q+1} \cos \theta} \ \dots \ e^{jk_m x_Q \cos \theta}]^T \quad (4)$$

여기서 위첨자 T 는 전치 (transpose)를 의미한다. m 번째 주파수선 f_m 에서의 협대역 MVDR 빔출력은 다음과 같다.

$$\mathbf{Z}(\theta; k_m) = 1/\mathbf{a}^H(\theta; k_m) \mathbf{R}^{-1}(k_m) \mathbf{a}(\theta; k_m) \quad (5)$$

여기서 위첨자 H 는 복소 공액 전치를 의미하며, $\mathbf{R}(k_m) = E[\mathbf{r}(k_m) \mathbf{r}^H(k_m)]$ 은 공분산행렬, $E[\cdot]$ 는 기대값을 의미한다. 빔출력은 조향각이 입사 방위각과 일치할 때 국부 최대값을 가진다(3).

미리 가정한 조향각 θ_0 주위의 작은 영역 $\Delta\theta$ 에서 조향 벡터 $\mathbf{a}(\theta; k_m)$ 는 식 (6)과 같이 1차 테일러 급수로 근사화시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{a}(\theta; k_m) &= \mathbf{a}(\theta_0 + \Delta\theta; k_m) \\ &\approx \mathbf{a}(\theta_0; k_m) + \Delta\theta \cdot \mathbf{a}_\theta(\theta_0; k_m) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{a}_\theta(\theta_0; k_m) = \left. \frac{\partial \mathbf{a}(\theta; k_m)}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_0}$ 는 조향 벡터 $\mathbf{a}(\theta; k_m)$ 의 $\theta = \theta_0$ 에서의 θ 에 대한 미분이다. 식 (5)의 빔출력을 최대화시키는 것은 분모 $\mathbf{a}^H(\theta; k_m) \mathbf{R}^{-1}(k_m) \mathbf{a}(\theta; k_m)$ 를 최소화시키는 것과 동일하므로, 조향각 오차는 다음의 비용함수를 최소화시키는 $\Delta\theta$ 를 추정함으로써 구할 수 있다(3).

$$J(\Delta\theta) = \{\mathbf{a}(\theta_0; k_m) + \Delta\theta \cdot \mathbf{a}_\theta(\theta_0; k_m)\}^H \times \mathbf{R}^{-1}(k_m) \{\mathbf{a}(\theta_0; k_m) + \Delta\theta \cdot \mathbf{a}_\theta(\theta_0; k_m)\} \quad (7)$$

식 (7)을 최소화시키는 $\Delta\theta_0$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\theta_0 = -\frac{\text{Re}\{\mathbf{a}^H(\theta_0; k_m)\mathbf{R}^{-1}(k_m)\mathbf{a}_\theta(\theta_0; k_m)\}}{\mathbf{a}_\theta^H(\theta_0; k_m)\mathbf{R}^{-1}(k_m)\mathbf{a}_\theta(\theta_0; k_m)} \quad (8)$$

여기서 $\text{Re}\{\cdot\}$ 는 실수 부분을 의미한다.

협대역 SAEC기법에서는 다수의 시간 데이터 단편을 이용하여 식 (9)와 같이 표본 공분산행렬 (sample covariance matrix)을 추정한다. 표본 공분산행렬 추정과정을 그림 1에 나타내었다.

$$\mathbf{R}(k_m) = \sum_{t=1}^T \mathbf{r}_t(k_m)\mathbf{r}_t^H(k_m) \quad (9)$$

여기서 $\mathbf{r}_t(k_m)$ 은 m 번째 주파수선에 대한 t 번째 데이터 단편이고, T 는 전체 시간 데이터 단편들의 개수이다. 공분산행렬이 특이 행렬 (singular matrix)이 되지 않기 위해서는 많은 개수의 데이터 단편들이 필요하다. 그러나 빠른 속도로 기동하는 표적이 존재하는 실제 환경에서는 표적이 정상적 (stationary)인 시간 구간이 짧기 때문에 짧은 관측시간 내에 빔출력을 만들어내야 하므로 식 (9)의 공분산행렬 추정은 적합하지 않다[7].

III. 광대역 조향각 오차 보정기법 (광대역 SAEC)

Jacobi-Anger 전개에 따르면, 조향 벡터 내 각 센서의 위상편이를 나타내는 $e^{ikr\cos\theta}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있

다(8).

$$e^{ikr\cos\theta} = \sum_{n=0}^{\infty} i^n (2n+1) j_n(kr) P_n(\cos\theta) \quad (10)$$

여기서 $j_n(\cdot)$ 은 구면 베셀 (spherical Bessel) 함수, $P_n(\cdot)$ 은 Legendre 함수이다. 제한된 개수의 센서를 이용하여 제한된 대역폭을 가지는 신호의 방향을 추정할 경우, 식 (10)의 무한급수 전개는 식 (11)과 같이 N 항까지의 유한급수로 근사화할 수 있다.

$$e^{ikr\cos\theta} \approx \sum_{n=0}^N i^n (2n+1) j_n(kr) P_n(\cos\theta) \quad (11)$$

여기서 N 은 유효 모드 개수로서 다음과 같이 설정할 수 있다(6).

$$N = k_1 x_0 \cdot e/2 \quad (12)$$

여기서 k_1 은 신호 대역 내 최소 파수이고 x_0 는 배열센서 중심에서 Q 번째 센서까지의 거리이다.

식 (11)의 전개를 이용하여 조향 벡터 $\mathbf{a}(\theta; k)$ 를 다음의 식과 같이 조향각에 대한 Legendre 함수 부분과 주파수와 센서위치에 대한 구면 베셀 함수 부분의 곱으로 표현할 수 있다(6).

$$\begin{aligned} \mathbf{a}(\theta; k) &= \mathbf{J}(k) \cdot \mathbf{P}(\theta) \\ &= \begin{bmatrix} i^0(1)j_0(kx_{-Q}) & \dots & i^N(2N+1)j_N(kx_{-Q}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ i^0(1)j_0(kx_Q) & \dots & i^N(2N+1)j_N(kx_Q) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0(\cos\theta) \\ \vdots \\ P_N(\cos\theta) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

$\mathbf{G}(k) = [\mathbf{J}^H(k)\mathbf{J}(k)]^{-1}\mathbf{J}^H(k)$ 를 $\mathbf{J}(k)$ 의 유사 역행렬로 정의

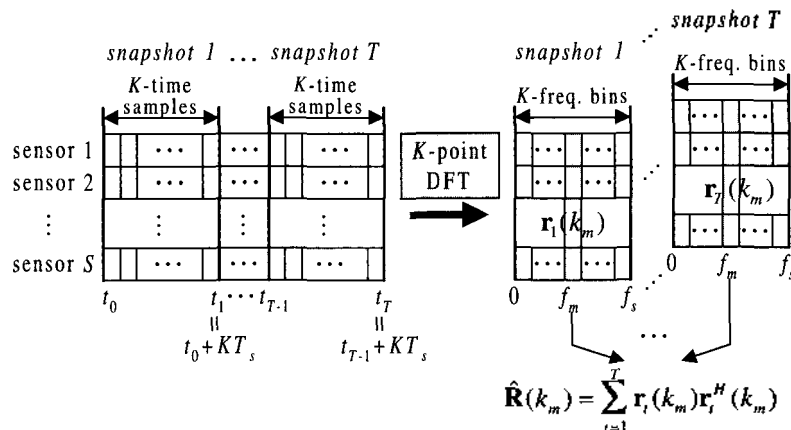


그림 1. 표본 공분산행렬 추정
Fig. 1. Sample covariance matrix estimation.

하면, 식 (13)으로부터 다음의 식을 유도할 수 있다.

$$\mathbf{G}(k) \mathbf{a}(\theta; k) = \mathbf{P}(\theta) \tag{14}$$

$\mathbf{G}(k)$ 는 식 (14)에서와 같이 조향 벡터 $\mathbf{a}(\theta; k)$ 를 주파수와 무관한 모드 조향 벡터 $\mathbf{P}(\theta)$ 로 변환시키는 모드 변환 행렬 역할을 한다. 이를 이용하여 배열센서 출력 벡터 $\mathbf{r}(k_m)$ 은 다음과 같이 모드 데이터 벡터 $\mathbf{y}(k_m)$ 으로 변환될 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(k_m) &= \mathbf{G}(k_m) \mathbf{r}(k_m) \\ &= \mathbf{G}(k_m) \mathbf{A}(\Theta; k_m) \mathbf{s}(k_m) + \mathbf{G}(k_m) \mathbf{n}(k_m) \\ &= \mathbf{P}(\Theta) \mathbf{s}(k_m) + \mathbf{n}_G(k_m) \end{aligned} \tag{15}$$

여기서 모드 방향 행렬 $\mathbf{P}(\Theta)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{P}(\Theta) = [\mathbf{P}(\theta_1) \ \mathbf{P}(\theta_2) \ \dots \ \mathbf{P}(\theta_L)] \tag{16}$$

각 주파수의 모드데이터 벡터들로부터 모드 공분산행렬을 다음과 같이 정의할 수 있다(6).

$$\hat{\mathbf{R}} = \sum_{m=1}^M \mathbf{y}(k_m) \mathbf{y}^H(k_m) \tag{17}$$

여기서 M 은 신호의 주파수 대역 내의 주파수선들의 개수이다. 그림 2는 모드 공분산행렬의 추정 과정을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 모드 공분산행렬은 많은 시간 데이터 단편들 대신 다수의 주파수 성분들을 사용함으로써 하나의 데이터 단편만으로도 특이 행렬이 되지 않게 추정할 수 있다. 모드 공분산행렬을 이용한 MVDR의 적응 가중벡터는

$$\hat{\mathbf{w}} = \frac{\hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{P}(\theta)}{\mathbf{P}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{P}(\theta)} \tag{18}$$

와 같으며, m 번째 주파수선에서의 θ 방향 빔출력 에너지는 다음의 식과 같다.

$$Z(\theta; k_m) = |\hat{\mathbf{w}}^H \mathbf{G}(k_m) \mathbf{r}(k_m)|^2 \tag{19}$$

식 (19)의 협대역 에너지를 이용하여 광대역 MVDR 에너지를 구하면 다음의 식과 같다.

$$\begin{aligned} P(\theta) &= \sum_{m=1}^M Z(\theta; k_m) \\ &= 1/\mathbf{P}^H(\theta) \hat{\mathbf{R}}^{-1} \mathbf{P}(\theta) \end{aligned} \tag{20}$$

2장의 협대역 조향각 오차 보정기법에서와 유사한 방법으로 조향각 θ_0 주위의 작은 영역 $\Delta\theta$ 에서 모드 조향 벡터 $\mathbf{P}(\theta)$ 는 다음과 같이 1차 테일러 급수로 근사화시킬 수 있다.

$$\mathbf{P}(\theta) = \mathbf{P}(\theta_0 + \Delta\theta) \approx \mathbf{P}(\theta_0) + \Delta\theta \cdot \mathbf{P}_\theta(\theta_0) \tag{21}$$

여기서 $\mathbf{P}_\theta(\theta_0) = \left. \frac{d\mathbf{P}(\theta)}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_0}$ 는 모드 조향 벡터 $\mathbf{P}(\theta)$ 의 $\theta = \theta_0$ 에서의 θ 에 대한 미분이다. 조향각 오차 $\Delta\theta_0$ 는 다음의 1차 최적화 문제를 만족시키는 해 $\Delta\theta$ 를 추정함으로써 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\theta_0 &= \arg \min_{\Delta\theta} \{ [\mathbf{P}(\theta_0) + \Delta\theta \cdot \mathbf{P}_\theta(\theta_0)]^H \\ &\quad \times \hat{\mathbf{R}}^{-1} [\mathbf{P}(\theta_0) + \Delta\theta \cdot \mathbf{P}_\theta(\theta_0)] \} \end{aligned} \tag{22}$$

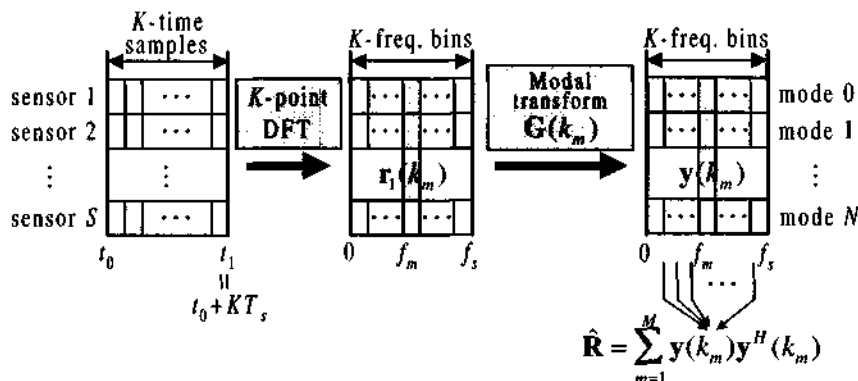


그림 2. 모드 공분산행렬 추정
Fig. 2. Modal covariance matrix estimation.

표 1. 협대역, 광대역 경우에 대한 MVDR 기법과 스플라인 보간기법, SAEC 기법들의 방위각 추정치 평균제곱오차

Table 1. RMSE of DOA estimate for MVDR without compensation, SAEC and spline interpolation in narrowband and wideband cases.

	DOA = 50°			DOA = 70°		
	MVDR without compensation(*)	With compensation		MVDR without compensation(*)	With compensation	
		SAEC(◇)	Spline interpolation(Δ)		SAEC(◇)	Spline interpolation(Δ)
Wideband (1 snapshot)	1.318°	0.250°	0.892°	1.972°	0.304°	0.936°
Narrowband (50 snapshots)	1.318°	0.388°	1.134°	1.845°	0.224°	0.684°

위 식을 만족하는 조향각 오차 $\Delta\theta_0$ 는 다음과 같다.

$$\Delta\theta_0 = -\frac{\text{Re}(\mathbf{P}^H(\theta_0)\hat{\mathbf{R}}^{-1}\mathbf{P}_0(\theta_0))}{\mathbf{P}_0^H(\theta_0)\hat{\mathbf{R}}^{-1}\mathbf{P}_0(\theta_0)} \quad (23)$$

VI. 모의실험

4.1 모의신호를 이용한 모의실험

제한한 광대역 SAEC기법의 성능을 검증하기 위하여 모의실험을 수행하였다. 신호 주파수 대역이 100Hz~200 Hz이고 신호 대 잡음비 (SNR)가 0dB인 신호가 배열센서에 50°와 70° 방향으로 입사한다. 배열센서는 최대 주파수의 반파장 간격으로 배열된 17개의 센서를 가지는 등간격 선배열센서이다. 표본화 주파수는 512Hz로 설정하였고, 256 FFT를 수행하여 대역 내 50개의 주파수선이 존재하도록 하였다. 협대역 모의실험에서는 150Hz 신호의 50개 데이터 단편을 사용하였고, 광대역 모의실험에서는 하나의 데이터 단편 내에 50개의 주파수선을 사용하였다. 사용한 빔의 개수는 33개로 cosine공간에서 등간격으로 배치하였고, 광대역 모드공간기법에 사용된 모드의 개수는 식 (12)를 이용하여 17개로 설정하였다.

그림 3은 제한한 광대역 SAEC기법의 결과를 스플라인 보간기법 (spline interpolation)과 비교하여 보여주고 있다. 스플라인 보간기법은 한정된 빔 개수가 모든 방향을 다 나타내지 못할 경우 빔과 빔 사이의 에너지를 보간하기 위하여 일반적으로 사용되는 기법이다. 그림 3에서 33 빔의 MVDR 빔출력은 × 표시로, MVDR 빔출력의 첨두치는 * 표시로, 스플라인 기법의 결과는 실선으로, 그 첨두치는 Δ 표시로 나타내고, 제안한 기법의 결과는 ◇ 표시로 나타내었다. 실제의 빔출력과 비교하기 위하여 실제의 입사 방위각과 1801 빔의 MVDR 빔출력 에너지를 각각 점선과 파선으로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, MVDR 빔출력과 스플라인 기법의 결과는 실제의 입사각

과 상당한 차이를 보인 반면, 제안한 기법의 결과는 실제 값과 근소한 차이를 보임을 알 수 있다.

표 1은 200회의 몬테칼로 모의실험을 통해 MVDR 첨두치, SAEC기법의 결과, 스플라인 기법의 결과의 실제 값과의 평균제곱오차를 협대역의 경우와 광대역의 경우로 나누어 나타낸 것이다. 제안한 1개의 단편을 이용한 광대역 SAEC기법은 스플라인 기법에 비해 더 좋은 성능을 보일 뿐만 아니라, 50개의 데이터 단편을 이용한 협대역 SAEC기법과 비견할 만한 성능을 보임을 알 수 있다.

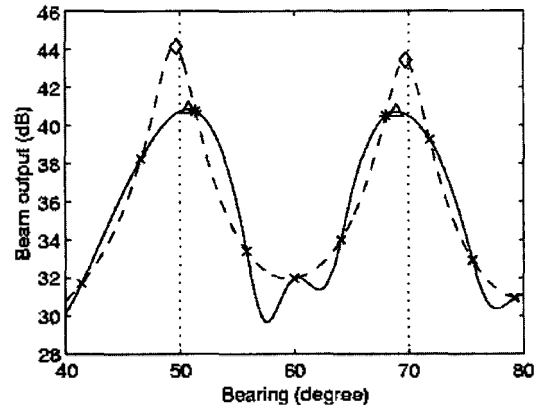


그림 3. 제안한 기법과 스플라인 기법의 비교

×	MVDR 빔출력 (33개 빔)
*	MVDR 빔출력의 첨두치 (33개 빔)
—	스플라인 보간기법
Δ	스플라인 보간기법의 첨두치
◇	제안한 SAEC 기법
...	실제 입사각 (50°, 70°)
·	MVDR 빔출력 (1801개 빔)

Fig. 3. Typical run of proposed algorithm and spline interpolation.

×	MVDR output (33 beams)
*	peak of MVDR output (33 beams)
—	spline interpolation
Δ	peak of spline interpolation
◇	proposed SAEC output
...	True DOA (50°, 70°)
·	MVDR output (1801 beams)

그림 4는 기동하지 않는 표적, 느린 속도로 기동하는 표적 그리고 빠른 속도로 기동하는 표적에 대한 협대역 스플라인 보간기법, 협대역 SAEC 기법, 광대역 스플라인 보간기법 그리고 제안한 광대역 SAEC 기법들의 방위각 추정 결과이다. 기동하지 않는 표적의 방위각은 $\theta_1(t) = 65^\circ$ 에 고정하였고, 느린 속도로 기동하는 표적과 빠른 속도로 기동하는 표적의 t 시각에서의 방위각은 각각 $\theta_2(t) = 2\cos(\pi t/50) + 78^\circ$, $\theta_3(t) = 5\cos(\pi t/25 + \pi/6) + 100^\circ$ 로 설정하였다. 세 표적의 SNR은 10dB로 설정하였고, 나머지 환경변수는 앞의 모의실험의 경우와 동일하게 설정하였다. 그림에서 점선은 시간에 따른 각 표적의 실제 방위각 궤적을 나타내고, 실선은 각 기법들의 방위각 추정 결과를 나타낸다.

그림 4 (a)와 (b)에서 협대역 스플라인 보간기법과 협대역 SAEC 기법은 기동하지 않는 표적의 방위각 추정시 약간의 바이어스가 발생하였다. 또한 기동하는 표적의 경우 이들 두 기법은 실제 방위각 궤적과 추정치 사이에 많은 오차가 발생하였다. 특히 빠른 속도로 기동하는 표적의

경우 방위각 추정치가 갑자기 변화하는 구간이 존재함을 볼 수 있다.

그림 4 (c)는 광대역 스플라인 보간기법의 방위각 추정 결과이다. 그림에서 광대역 스플라인 보간기법의 추정치는 실제 방위각과 오차가 발생함을 볼 수 있다. 반면 그림 4 (d)의 제안한 광대역 SAEC 기법은 실제의 방위각 궤적을 거의 오차 없이 추정함을 볼 수 있다.

4.2 해상 실험 데이터를 이용한 모의실험

실제 해상 실험 데이터를 이용하여 제안한 기법의 성능을 분석하였다. 사용한 데이터는 LF (Low Frequency) 대역의 최고 주파수의 반파장 간격으로 32개의 센서가 등간격으로 배치된 선배열 소나에서 관측한 것이다. 표본화 주파수는 최고 주파수의 2.56배가 되게 설정하였고, 2048 FFT를 통하여 대역 내 800개의 주파수선을 가지도록 설정하였다. 사용한 빔의 개수는 cosine공간에서 33개로 등간격으로 배치하였고, 광대역 모드공간기법에 사용

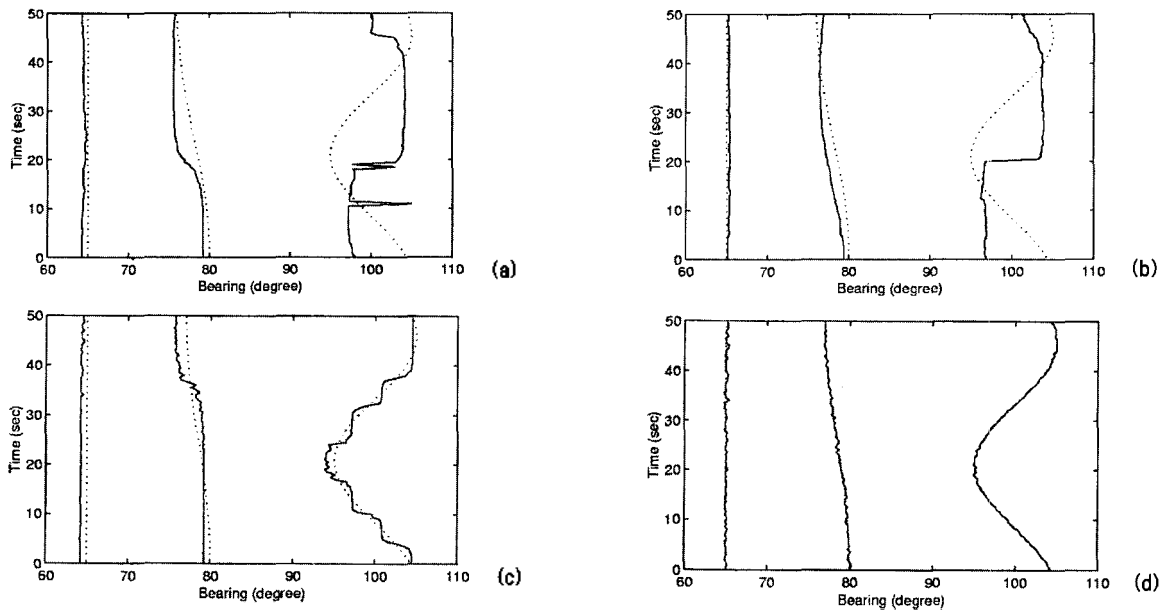


그림 4. 기동하지 않는 표적 및 기동 표적 방위각 추정

(- : 방위각 추정치, ... : 실제 입사각)

(a) 협대역 스플라인 보간기법 (b) 협대역 SAEC 기법

(c) 광대역 스플라인 보간기법 (d) 광대역 SAEC 기법

Fig. 4. DOA estimates for non moving and moving targets.

(- : DOA estimate, ... : true DOA)

(a) Narrowband spline interpolation (b) Narrowband SAEC

(c) Wideband spline interpolation (d) Wideband SAEC

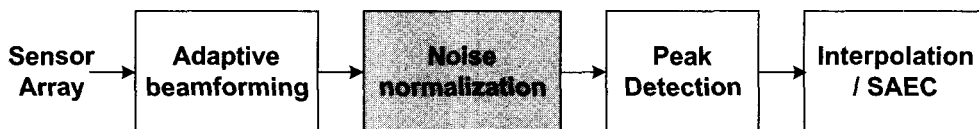


그림 5. 실제 해상 데이터 환경에서의 초기속정차 추출 과정

Fig. 5. Procedure for primary detection in sea trial data environment.

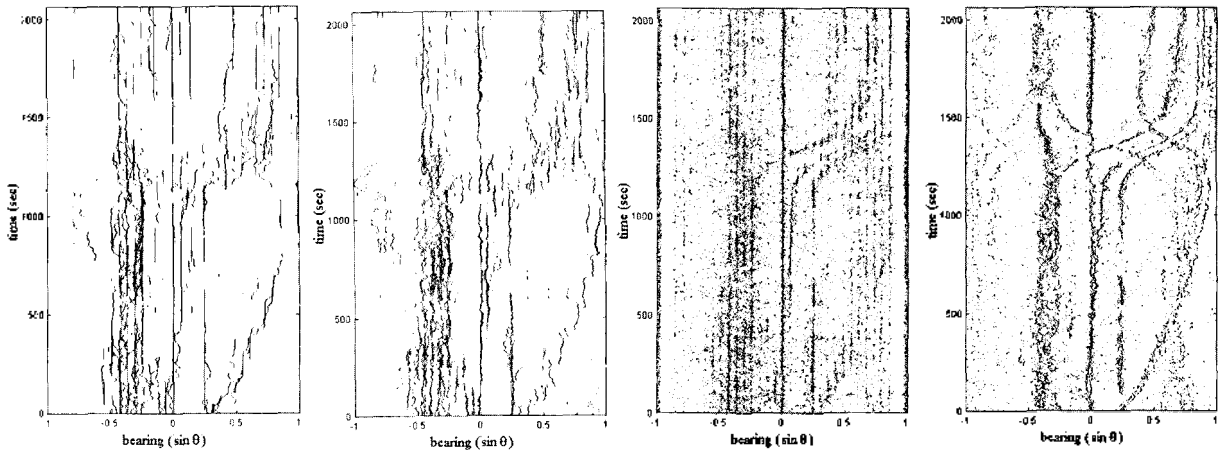


그림 6. 해상 실험 데이터를 이용한 각 기법들의 초기추정치

- (a) 협대역 스플라인 보간기법
- (b) 협대역 SAEC 기법
- (c) 광대역 스플라인 보간기법
- (d) 광대역 SAEC 기법

Fig. 6. Primary detection using sea trial data.

- (a) Narrowband spline interpolation
- (b) Narrowband SAEC
- (c) Wideband spline interpolation
- (d) Wideband SAEC

된 모드의 개수는 26개로 설정하였다. 광대역 모드공간기법에서 전체 대역을 16개의 부대역으로 나누어 각 부대역별 주파수선의 개수를 50개로 설정하고 각 부대역별로 적용 가중상수를 구하도록 설정하였다. 협대역 MVDR의 경우 각 주파수 별로 50개의 데이터 단편을 이용하여 공분산행렬을 구성하였다.

실제 해상 환경에서는 배경잡음이 모의신호 환경과 같이 백색 가우시안 잡음이 아니라 주파수 별로 크기가 서로 다른 비균일한 스펙트럼을 가지게 된다. 따라서 일정한 문턱값을 이용한 표적탐지 성능 향상을 위하여 배경잡음을 크기가 1인 백색잡음으로 만드는 잡음 정규화기법 (noise normalization)이 필요하다. 잡음 정규화기법을 포함한 실제 해상 데이터 환경에서의 초기추정치 (primary detection)를 얻는 과정은 그림 5와 같다.

배열센서 데이터들은 첫 번째 단 'Adaptive beamforming'에서 협대역 MVDR 기법 또는 광대역 모드공간기법을 이용하여 빔형성한 다음 두 번째 단 'Noise normalization'에서 배경잡음을 백색잡음화하는 과정을 거친다. 그런 다음 세 번째 단 'Peak detection'에서 빔출력 에너지값이 일정 문턱값을 넘는 방위각을 추정하고, 마지막 단 'Interpolation/SAEC'에서 보다 정확한 방위각을 추정한다.

그림 6은 협대역 스플라인 보간기법, 협대역 SAEC 기법, 광대역 스플라인 보간기법 그리고 광대역 SAEC 기법들의 실제 해상 실험 데이터를 이용한 방위각 추정 결과이다. 그림 6 (a)와 (b)로부터 협대역 기법들은 표적이 기

동하는 구간에서 보정된 침두치들이 뚜렷한 궤적을 형성하지 못하고 분산되어 있음을 알 수 있다. 제한한 광대역 SAEC 기법의 경우 그림 6 (d)에서와 같이 표적이 기동하는 구간에서 침두치들의 궤적이 뚜렷하면서도 부드럽게 연결되는 반면, 스플라인 보간기법의 경우 그림 6 (c)에서 나타나듯이 궤적이 끊어져서 나타남을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 짧은 관측시간 내에 조향각 오차를 보정하여 정확한 방위각을 추정하는 기법을 제안하였다. 제한한 기법은 다수의 시간 데이터 단편 대신에 하나의 시간 데이터 단편의 다수의 주파수 성분들을 이용하여 조향각 오차를 보정함으로써 제한된 개수의 빔을 가지고도 비교적 정확한 방위각을 추정할 수 있다. 모의신호와 실제 해상 실험 데이터를 이용한 모의실험을 통해 제안한 광대역 SAEC 기법이 기존의 스플라인 보간기법이나 협대역 SAEC 기법에 비하여 우수한 성능을 가짐을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 경북대학교특성화사업팀 (KNURT) 연구비에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

1. M.H. Er, "Adaptive antenna array under directional and spatial derivative constraints," Proc. IEE, pt. H, 135(6), 414-419, 1988.
2. K.M. Buckley and L.J. Griffiths, "An adaptive generalized sidelobe canceller with derivative constraints," IEEE Trans. Antennas Propag. AP(34), 311-319, 1986.
3. M.H. Er and B.C. Ng, "A new approach to robust beamforming in the presence of steering vector errors," IEEE Trans. Signal Process. 42 (7), 1826-1829, 1994.
4. H. Hung and M. Kaveh, "Focussing matrices for coherent signal subspace processing," IEEE Trans. Acoust. Speech, Signal Process. 36 (8), 1272-1281, 1988.
5. D.N. Swingler, "A Low complexity MVDR beamformer for use with short observation times," IEEE Trans. Signal Process. 47 (4), 1154-1160, 1999.
6. T.D. Abhayapala and H. Bhatta, "Coherent broadband source localization by modal space processing," ICT 2003, IEEE 10th Int. Conf. Telecommunications, 3, 1617-1623, 2003.
7. T.C. Yang, "Motion compensation for adaptive horizontal line array processing," Journal of Acoustical Society of America, 113, (1), 245-260, 2003.
8. D.Colton and R. Kress, *Inverse Acoustic and Electromagnetic Scattering Theory*, Springer, New York, 1997.

저자 약력

• 박규태 (Gyu Tae Park)



1997년 2월: 경북대학교 공과대학 전자공학과(공학사)
 1999년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 2004년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
 2004년 2월~현재: LG 이노텍㈜ 선임연구원
 * 주관심분야: 수중음향신호처리, 표적위치추정, 표적탐지 및 추적

• 박도현 (Do Hyun Park)

현재: 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료
 한국음향학회지 제20권 제8호 참조

• 이정훈 (Jung Hoon Lee)



1997년 2월: 경북대학교 공과대학 전자공학과(공학사)
 1999년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 2004년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
 2000년 3월~2004년 4월: 수중음향특성연구센터 연구원
 2004년 4월~현재 : LG 이노텍㈜ 선임연구원
 * 주관심분야: 수중음향신호처리, 표적위치추정, 표적탐지 및 추적

• 이균경 (Kyun Kyung Lee)

현재: 경북대학교 전자전기공학부 교수
 한국음향학회지 제17권 제4호 참조