

표적의 이동에 의한 영향을 극복하기위한 광대역 정합장처리

박정수*, 김재수**, 김성일*, 김영규*

*국방과학연구소, **한국해양대학교

Wide-band Matched Field Processing Against Source Motion : STMV

J.S. Park*, J.S. Kim**, S.I. Kim*, Y.G. Kim*

*Agency for Defense Development, **Korea maritime University

js.park@add.re.kr

요약

정합장처리를 이용한 표적의 탐지는 다양한 종류의 간섭표적들이 존재하는 환경에서 수행될 가능성이 크며, 따라서 분해능이 높은 적응 정합장처리를 사용이 요구된다. 반면 빠르게 움직이는 고소음의 간섭표적이 존재할 경우에는 적응정합장처리를 수행하기위한 신호단편(snapshot) 수를 충분하게 사용할 수 없는 상황에 직면하게 된다. 제한된 신호단편을 이용하여 적응정합장처리의 CSDM (cross-spectral density matrix)을 안정적으로 추정하기위한 목적으로 선형범형성에서 제안되었던 광대역 STMV (steered minimum variance) 기법을 도입하였다. MAPLE03 실험환경을 이용하여 STMV의 적응정합장처리 수치실험을 수행하고 특성을 분석하였다.

데, 이 결과는 가중벡터의 적응 억제 성능을 저하시킨다. 또한 제한된 신호단편으로부터 rank가 부족한 CSDM을 추정하게 되면 적응 정합장처리의 파워 출력이 낮아지는 바이어스가 발생한다[1].

신호벡터가 부족하여 full rank CSDM을 사용할 수 없는 경우에 적응정합장처리를 수행할 수 있는 몇몇 기법들이 개발되어왔다. 가장 일반적인 두 방법은 대각 부하(diagonal loading) 과 부공간 기법이다. 최근에는 COX는 소수의 신호단편만으로 강한 간섭표적을 탐지하고 null을 만든 다음에 많은 신호단편을 사용하여 저소음의 정지 표적에 대한 적응 정합장처리를 하는 MRABF (multi-rate adaptive beamformer) 기법을 제안하였다[2]. Song 등[3] 은 Mailloux[4]와 Zatman[5] 이 제안했던 영 확장 (null broadening) 기법을 이용하여 이동음원에 의한 신호단편 부족문제를 해결하고자 했다.

1. 서론

다중표적을 탐지하고 위치를 파악하기위한 고분해능의 MVDR (minimum variance distortionless response) 적응 정합장처리 기법은 배열신호의 표본공분산 역산으로부터 계산한 적응 가중벡터를 사용하여 강한 간섭표적에 null을 만들고 부엽을 낮춘다. 그러나 적응 정합장처리의 성능은 표적의 이동과 오정합 등으로 인하여 이론적인 경우보다 매우 낮다. 표적의 이동을 고려하여 제한된 수의 신호단편을 사용하더라도 표적의 에너지가 인접한 빔들에 퍼지게 됨으로서 저소음 표적의 신호출력 파워가 낮아지고 표적의 탐지와 위치 추정이 어려워진다. 즉, 간섭표적의 이동은 간섭하는 부공간을 넓게 하는

정합장처리에서도 이와 같은 연구들이 진행되어왔다. Kim 등[6]은 도파관 불변성 (waveguide invariant)을 이용하여 거리방향으로 영을 넓히는 시도를 하였다. 또 다른 방법인 NSP 기법은 탐색공간에서 특정 신호성분을 필터링한다[7]. Lisa 등[7]은 이동에 의하여 표적의 침단값이 낮아지고 부엽이 넓어지는 현상을 보상하기 위하여 NSP 기법을 이용하여 수신신호 또는 복계음장으로 CSDM에서 특정 방위의 간섭표적을 필터링한 후에 빔형성 함으로서 인접한 저소음 표적의 탐지 성능을 향상시켰다. 박 등은 MCM (multiple constraint method)를 이용하여 고소음 간섭표적을 제거함으로써 저소음 표적을 탐지할 수 있음을 보였다[8].

본 논문에서는 신호단편이 부족할 때 CSDM의 rank를 높이기 위하여 STMV (steered minimum variance) 기법[9,10]을 정합장치에 적용하고 성능을 분석하였다. STMV는 광대역의 신호를 선정합시켜 CSDM에 반복적으로 더해줌으로써 rank를 증가시킨다. Maple03의 환경자료를 이용한 정합장치 수치실험으로부터 STMV의 성능을 분석하고 결과를 기술하였다.

2. 정합장치

2.1 신호단편 부족 문제

수신센서가 N개인 배열에서 정합장치의 파워 출력은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$P = \vec{w}^H K_f \vec{w} \quad (1)$$

여기서 \vec{w} 는 Nx1 가중벡터이고 K 는 NxN CSDM이다.

MVDR은 조향위치의 신호는 이득의 왜곡이 없게 하고 다른 위치의 신호와 소음의 이득은 최소로 만드는 단일 구속조건을 사용하는 최적의 적응 알고리즘이며, 복제음장과 CSDM에 따라 달라지는 가중벡터를 아래와 같이 계산한다[11].

$$\vec{w}_{MVDR} = \frac{K_f^{-1} \vec{d}}{\vec{d}^H K_f^{-1} \vec{d}} \quad (2)$$

여기서 \vec{d} 는 복제음장 벡터이다. 일반적으로, CSDM K 는 아래와 같이 신호단편 L 개를 ensemble 평균하여 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{K}_f &= E \{ x_f(i) x_f^H(i) \} \\ &= \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L x_f(i) x_f^H(i) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $x_f(i)$ 는 수신센서에 수신된 특정주파수 f 의 i 번째 신호단편의 복소푸리에 진폭벡터이다.

표적이 움직일 때는 short-term stationary 가정 때문에 분해능설의 제한이 생기고, 따라서 한번에 이용 가능한 신호단편 수가 제한된다. 반면에, Reed 등에 의하면

적용처리를 위한 조건은 $L > 2N$ 이다. 일반적으로는 여러 개의 이동표적이 존재하기 때문에 이 조건이 만족될 수 없다. Cox는 효과적인 영을 만들기 위해서는 신호단편이 최소한 강한 간섭음원의 두 배가 되어야 한다고 했다.

적용처리에서 신호단편 수와 대각부가가 부족하면 출력이 저하되는 등의 중대한 바이어스가 발생한다. Baggeroer 등에 의하면 바이어스는 신호 방향과 무관하고, $L < N$ 일 때 커진다. 특히, 바이어스는 신호단편 수가 감소할수록 증가한다. 그러나 오정합이 존재하면 강한 신호는 약한 신호에 비하여 과도하게 억제되므로, 이때는 바이어스가 신호의 방향과 상관성을 보인다. 신호단편 수의 부족과 오정합에 의한 중대한 바이어스는 WNC (white noise constraint)를 적용하여 일부 해결할 수 있다.

2.2 STMV

도파관에서 전달되어 i 번째 수신센서에 수신된 대역 제한 (band-limited) 신호출력 $x_i(t)$ 는 같이 대역 BN에 포함된 여러 개의 주파수 합으로 표현된다.

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^{BN} P_k(r_i, z_i) e(j\omega_k t) \quad (4)$$

$$P_k(r_i, z_i) = \sum_{m=1}^M \sqrt{2\pi} \exp(-jk_m r_i) \psi_m(z_i) \psi_m(z_i) / \sqrt{k_m r_i} \quad (5)$$

여기서 $P_k(r_i, z_i)$ 는 표적에서부터 i 번째 수신센서까지 (r_i, z_i) 전달된 복소음장이다.

따라서 식 (6)과 같이 주파수 ω 에 해당하는 신호벡터 $P_k(r_i, z_i)$ 에 수신센서별 음파전달 모델로부터 계산한 위치 (r_i, z_i) 의 복제음장의 위상을 보상해주면 수신센서 배열 평면에서 입사하는 평면파 신호로 변환됨을 의미한다.

$$P_k(r_i, z_i) = D(r_i, z_i, f_k) P_k(r_i, z_i) \quad (6)$$

여기서 $P_k(r_i, z_i)$ 는 선정합 신호 (pre-matching data)

이고, $D(r_i, z_i, f_k)$ 는 (r_i, z_i) 위치에 해당하는 복제음장의 위상으로 구성된 선정합 행렬 (pre-matching matrix) 이며 아래와 같다.

$$D(r_i, z_i, f_k) = \text{diag}[D_1, D_2, \dots, D_N] \quad (7)$$

식 (6)을 이용하여 아래와 같이 STCSDM (steered CSDM)을 구할 수 있게 된다.

$$\hat{K}_{st} = \frac{1}{BN} \sum_{k=1}^{BN} D(r_i, z_i, f_k) \hat{K}(f_k) D^H(r_i, z_i, f_k) \quad (8)$$

식 (8)에서 구한 STCSDM을 사용하여 정합장치처리하면 같은 신호단편 수를 기준으로 주파수 분해능이 BN배 향상된다. 또한 STCSDM의 rank가 CSDM 보다 향상될 수 있음을 알 수 있다.

하지만 STMV 기법이 협대역 에너지를 추정하기 위하여 전체주파수에 대한 정보를 이용하여 적응 가중벡터를 추정하기 때문에 인접방위의 원하지 않는 주파수의 간섭이 존재할 수 있다.

3. 수치실험 결과

2003년 10월 수심이 약 140m인 동해 연안에서 길이가 수직선배열과 예인음원을 이용하여 정합장실험인 MAPLE03을 실시하였다. 본 논문에서는 MAPLE03의 해양환경을 그대로 사용하여 수치실험을 수행하였다.

수직선배열의 센서는 수심 30m에서 110m사이에 위치하도록 수중 설치하였다. 표적 주파수는 100Hz에서 300Hz 까지 1Hz 간격으로 21개의 다중주파수 토날을 사용하였다. 음원 수심은 20m와 110m 이고, 표적 이동경로의 수심 변화는 없다. 수온구조를 살펴보면, 표층 혼합층이 약 20m 두께로 존재하고, 20m~50m 사이에는 강한 수온 약층이 존재한다. 수치실험은 단일 표적과 한 개의 간섭표적이 존재하는 경우에 대하여 수행하였으며, 간섭표적 신호가 표적신호에 두 표적이 독립된 경우와 완벽하게 상관된 경우를 가정하였다. 신호대잡음비(snr)는 백색가우시안잡음을 사용하여 0, -5, -10dB를 각각 사용하였고, 오정합은 없다고 가정하였다.

주어진 관측신호에 대하여 MVDR은 3개의 신호단편과 7개의 주파수를 사용하였으며, Bartlett과 STMV에서

는 1개의 신호단편과 21개의 주파수를 모두 사용하였다. STMV는 주파수 상호간의 간섭을 줄이기 위하여 부대역의 사용을 병행하였다. MVDR과 부대역을 사용할 때의 STMV의 CSDM 추정 과정에서 안정된 행렬역산을 위하여 대각부가를 사용하였다.

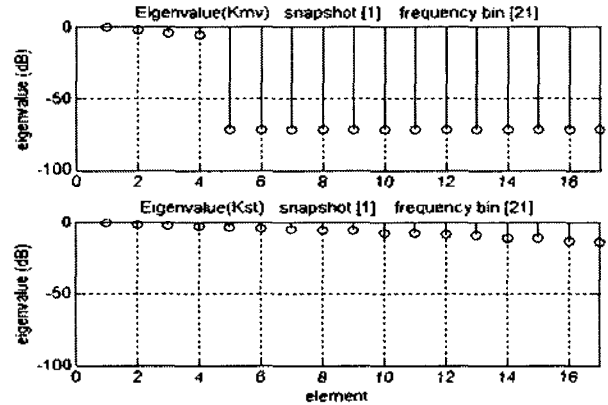


그림 2. MVDR과 STMV의 CSDM의 고유치

먼저 비상관 잡음에 의한 snr이 0dB인 표적신호만 수심 20m에 존재하는 경우의 수치실험결과이다. 그림 1은 식 (3)과 식 (8)을 이용하여 추정된 MVDR과 STMV의 CSDM의 고유치를 크기 순으로 나타낸 것이다. MVDR의 경우 값이 큰 고유치가 3개이지만 STMV의 경우는 모든 고유치가 크다. 이것으로부터 STMV 광대역의 신호를 선정합 시켜 CSDM에 반복적으로 더해짐으로써 rank가 증가되었음을 알 수 있으며, 여러 개의 간섭신호가 존재할 경우에 성능을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 정합장치처리 결과에서는 전반적으로 부엽준위는 STMV의 경우가 가장 높고, 성능도 낮게 나타났다.

4. 요약 및 결론

다수의 고소음의 간섭표적이 존재하는 환경에서 적응 정합장치처리를 위한 CSDM의 rank를 개선할 수 있는 STMV 기법을 정합장치처리에 적용하고자 하였다.

STMV 광대역의 신호를 선정합 시켜 CSDM에 반복적으로 더해짐으로써 rank가 증가됨을 알 수 있으며, 여러 개의 간섭신호가 존재할 경우에 성능을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 수치실험 결과 주파수 상호간의 간섭이 도파관의 경우에 매우 심한 것으로 나타났다. 만약, CSDM의 rank를 줄이는 부대역을 사용하면

주파수간의 간섭은 줄고 SBNR이 현저히 향상되었다.

앞으로 지속적으로 정합장치에서 STMV의 성능을 다양하게 살펴보고, 실제 실험 자료에 적용해볼 계획이다.

37, pp. 1481-1494, 1989.

11. J. Capon and N. Goodman, "Probability distributions for estimations of frequency wavenumber spectra," in Proceeding of the IEEE, 58, pp. 1785-1786, 1970.

참고문헌

1. I. Reed, J. Mallett, and L. Brennan, "Rapid convergence rate of adaptive array," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 10, pp. 853-863, 1974.
2. H. Cox and R. Pitre, "Robust DMR and multi-rate adaptive beamforming," in Proc. 31st Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, IEEE Computer Society, 1997, pp. 920-924, 1997.
3. H.C. Song, W.A. Kuperman, W.S. Hodgkiss, P. Gerstoft, and J.S. Kim, "Null broadening with snapshot-deficient covariance matrices in passive sonar," IEEE J. Oceanic Eng., 28(2), pp. 250-261, 2003.
4. R. J. Mailloux, "Covariance matrix augmentation to produce adaptive array pattern troughs," Electron. Lett., vol. 31, no. 10, pp. 771-772, 1995
5. M. Zatman, "Production of adaptive array troughs by dispersion synthesis," Electron. Lett., vol. 31, no. 25, pp. 2141-2142, 1995
6. J.S. Kim, W.S. Hodgkiss, W.A. Kuperman, and H.C. Song, "Null-broadening in a waveguide," J. Acoust. Soc. Am. 88(4), pp. 1851-1862, 2001
7. Lisa M. Zurk, Nigel Lee, and James Ward, "Source motion mitigation for adaptive matched field processing," J. Acoust. Soc. Am. 113(5), pp. 2719-2731, 2003
8. 박정수, 김재수, 김성일, 김영규, " Source motion mitigation for adaptive matched field processing," 한국음향학회지, pp. 2719-2731, 2003
9. D. N. Swingler, "A low complexity MVDR beamformer for use with short observation times," ~~IEEE Trans. Signal Processing, 47, pp. 1154-1160, 1999.~~ ¹¹ ~~IEEE Trans. Signal Processing, 47, pp. 1154-1160, 1999.~~
10. J. Krolik and D. Swingler, "Multiple broadband source location using steered covariance matrices," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing,