

수중 장애물 탐지에서의 특이 값 차이를 이용한 LFM 잔향 감소 기법 적용 연구

Application of LFM Reverberation Suppression Using Difference of Singular Values in the Underwater Obstacle Detection

이 형 수*, 권 범 수**, 조 점 군***, 이 균 경**

(Hyung Soo Lee*, Bum Soo Kwon**, Chom Gun Cho***, Kyun Kyung Lee**)

*LIG넥스원(주), **경북대학교 전자전기컴퓨터학부, ***국방과학연구소

(접수일자: 2009년 9월 2일; 수정일자: 2009년 10월 8일; 채택일자: 2009년 10월 14일)

본 논문에서는 근거리에서 위치한 수중 장애물의 탐지 성능을 향상시키기 위해 잔향의 영향을 감소시키는 여러 기법 중 특이 값 차이를 이용한 잔향 감소 기법을 적용한다. 특이 값 차이를 이용한 잔향 감소 기법은 중심 빔 신호에 잔향과 표적이 포함되어 있다고 가정하고 인접한 빔 신호를 참조 신호로 사용하여 중심 빔 신호와의 특이 값 차이를 이용함으로써 잔향 신호를 감소시킨다. 그리고 한국 근해에서 십자형 구조의 송수신 장치를 통해 얻어진 실측 데이터를 이용하여 수중 장애물 탐지에서의 제시한 기법의 타당성을 검증한다.

핵심용어: 능동소나, 잔향 감소, LFM, 특이 값, 수중장애물 탐지

투고분야: 수중음향 분야 (5,6)

In this paper, we apply a reverberation suppression method using difference of singular values to improve the short distance underwater obstacle detection probability in reverberation environment induced by a linear frequency modulation signal. The reverberation suppression method using difference of singular values suppresses LFM reverberation based on subtracting the singular values for a reference beam, assumed to contain only the reverberation, from those for the current beam of interest, assumed to contain the reverberation and target echo. For the validation, the reverberation suppression method using difference of singular values is applied to real oceanic data, which are acquired using the cross type array.

Keywords: Active Sonar, Reverberation Suppression, LFM, Singular Value, Underwater Obstacle

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5,6)

I. 서론

아함의 안전한 기동을 위해 해저 지형 및 기뢰 등과 같은 수중 장애물을 탐지하는 것은 중요한 문제이다. 중주파수 대역의 송신 펄스를 사용하여 탐지하고자 하는 수중 장애물은 주로 아함의 진행 방향에 위치한 움직이지 않는 소형물체이다. 따라서 아함과 비교적 가까운 거리에 위치하는 포인트 소스로 인식될 수 있으며, 이러한 정지된 소형 물체를 탐지하기 위해서는 짧은 펄스길이와 넓은 대역폭을 갖는 선형주파수 변조 (LFM: Linear

Frequency Modulation) 펄스를 주로 사용한다. 또한 근 거리에 위치하는 수중 장애물 탐지의 경우 목표로 하는 표적의 크기가 소형이므로 낮은 SNR을 가지기 때문에 잔향에 의한 탐지 성능의 저하가 필연적이며 정합필터 (matched filter)와 같은 고전적인 탐지 방법으로 표적을 탐지하는 것은 매우 어려운 문제이다 [1]. 잔향의 영향을 감소시키기 위한 방법으로는 Dechirping 변환을 이용해 LFM 잔향을 백색화 하는 기법과 [2], 수많은 점 신호체에 의해 발생된 반사 신호들의 합으로 잔향을 모델링 하는 PCI (principal component inverse) 기법이 연구되었다 [3]. PCI 기법은 높은 간섭 성분들 중에서 약한 신호성분을 찾기 위한 목적으로 사용되며 정합필터를 적용시키기 전에 수신된 빔 신호를 표적 부 공간 (subspace)과 잔향

책임 저자 이 균 경 (kklee@ee.knu.ac.kr)
702-701 대구광역시 북구 신격3동 경북대학교 전자전기컴퓨터학부
(Tel.: 053-940-8846, Fax: 053-950-5505)

부 공간으로 분리한 후, 이로부터 잔향 신호를 추정하여 제거시키는 전처리 신호처리 기법이다. 표적 부 공간과 잔향 부 공간을 분리할 때, 분리 기준으로 표적의 에너지 정보를 이용하는데 표적의 에너지 정보는 현실적으로 알 수 없기 때문에 실제 소나 운용 시 PCI 기법을 적용하는 것은 어려운 일이다. 사전에 표적의 에너지 정보를 필요로 하는 문제점을 극복하기 위해 특이 값 (singular value)의 차이를 이용한 잔향 감소 기법이 제안되었다 [4]. 특이 값의 차이를 이용한 잔향 감소 기법은 잔향과 표적이 포함되어 있다고 가정한 중심 빔 신호에 인접한 빔 신호를 참조 신호 (reference signal)로 사용하여 중심 빔 신호와의 특이 값의 차이를 이용함으로써 잔향 신호를 감소시키는 기법이다. 이 기법의 경우 표적 부 공간과 잔향 부 공간을 분리하는데 표적의 에너지 정보를 이용할 필요가 없다.

본 논문에서는 특이 값 차이를 이용한 잔향 감소기법을 십자형 구조의 송수신 장치들 이용해 얻어진 실측 데이터를 적용하여 수중 장애물 탐지에 적용하여 성능을 확인하였다.

II. 특이 값 차이를 이용한 잔향 감소 기법

PCI 기법과 특이 값 차이를 이용한 잔향 감소 기법은 부 공간 방법들 중의 하나로, 잔향 부 공간을 추정함으로써 잔향 신호와 표적 신호를 분리한다. 여기서, 잔향은 수많은 점 산란체에 의해 발생된 반사 신호들의 합으로 모델링 되며, 잔향 부 공간과 표적 부 공간을 분리하기 위해 잔향 에너지는 표적 에너지보다 훨씬 크다고 가정한다. 또한, 효과적인 분리를 위해 잔향 부 공간을 생성하는 (span) 행렬의 계열 (rank)은 작다고 가정한다 [3]. 부 공간 방법은 수신 신호로부터 행렬을 형성해야 하는데, Kumaresan 등 [5]은 수신 신호 x 를 N 개의 구간으로 나누어 i 번째 구간 X_i 로부터 식 (1)과 같은 전방행렬 (forward matrix) Y_i 를 생성하였다.

$$Y_i = \begin{bmatrix} X_i(p) & X_i(p-1) & \dots & X_i(1) \\ X_i(p+1) & X_i(p) & \dots & X_i(2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_i(L) & X_i(L-1) & \dots & X_i(L-p+1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, L 은 구간의 길이이며 p 는 $L/2$ 에 가장 가까운 값으로 선택한다. Y_i 는 잔향 부 공간을 생성하는 행렬 Y_i^m 과 표적 부 공간을 생성하는 행렬 Y_i^o 로 분리될 수

있으며 다음과 같이 표현 된다.

$$Y_i = Y_i^m + Y_i^o \quad (2)$$

여기서, m 은 잔향 부 공간의 계열이고 o 는 표적과 백색잡음을 더한 부 공간의 계열이다. Y_i 의 계열은 m 과 o 를 더한 것으로, 여기서는 R 로 정의한다. 잔향 에너지가 표적 에너지보다 훨씬 크다고 가정하였기 때문에 Y_i^m 은 Y_i 의 가장 큰 m 개의 특이 값들로 구성된다. Y_i 는 SVD (singular value decomposition)에 의해 식 (3)과 같이 표현된다.

$$Y_i = U_i \Sigma_i V_i^H = \begin{bmatrix} U_i^m & U_i^o \\ \mathbf{0} & \Sigma_i^o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_i^m & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_i^o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i^m & V_i^o \end{bmatrix}^H \quad (3)$$

여기서, U_i 와 V_i 는 각각 Y_i 의 좌/우 특이벡터 (singular vector)에 해당되며 Σ_i 는 내림차순으로 정렬된 Y_i 의 특이 값들 ($\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_R$)을 대각행렬 (diagonal matrix)로 나타낸 것이다.

PCI 기법의 경우, 잔향 부 공간과 표적 부 공간을 분리하기 위해 잔향 부 공간의 계열을 추정해야 한다. 잔향 부 공간의 계열은 Y_i 의 특이 값들의 합과 문턱 값 (threshold) P 를 비교함으로써 추정할 수 있다. 즉, 식 (4)를 만족시키는 M 이 존재할 경우 PCI 기법이 구간 X_i 에 적용되고 $R - M + 1$ 이 잔향 부 공간의 계열 m 이 된다.

$$\sum_{q=0}^M \sigma_{R-q}^2 > P \quad (4)$$

Y_i^m 으로부터 i 번째 구간의 잔향 신호 X_i^m 이 추정되고, 추정된 모든 구간의 잔향 신호를 연결함으로써 전체 잔향 신호 x^m 이 추정된다. 마지막으로, 수신 신호 x 에서 추정된 잔향 신호 x^m 을 뺀 후 정합필터를 적용하여 표적을 탐지한다. 그러나, 잔향 부 공간의 계열을 추정하는데 필요한 문턱 값 P 는 표적의 에너지 정보에 의해 결정된다. 표적의 에너지 정보는 현실적으로 알 수 없기 때문에 실제 소나 운용 시 PCI 기법을 적용하는 것은 어려운 일이다.

본 논문에서는 잔향 신호를 효율적으로 감소시키기 위해서 잔향과 표적이 포함되어 있다고 가정한 중심 빔 신호에 인접한 빔 신호를 참조 신호로 사용하여 중심 빔 신호와의 특이 값 차이를 이용함으로써 잔향 신호를 감소시키는 기법을 수중 장애물 탐지에 적용한다. 특이 값 차이를 이용한 잔향 감소 기법은 잔향과 표적이 포함되어 있다고 가정한 중심 빔 신호에 인접한 좌/우 빔 신호들

참조 신호로 사용하기 때문에 표적 부 공간과 잔향 부 공간을 분리하는데 표적의 에너지 정보를 이용할 필요가 없다. 즉, 특이 값 차이를 이용한 잔향 감소 기법은 PCI 기법과 달리 표적의 에너지 정보를 이용하지 않고 잔향 신호를 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 인접 빔 신호를 이용하여 효과적으로 잔향 신호를 감소시키기 위해서는 공간적으로 인접한 구간의 신호 간 에너지 특성이 일정하게 유지된다는 국부 정상에 대한 가정 (local stationary assumption)이 필요하다. 인접한 빔 신호들간의 정상 정도는 3장의 실험 결과 및 성능 분석에서 설명한다.

특이 값 차이를 이용한 잔향 감소 기법에서는, PCI 기법에서 사용된 수신 신호 x 를 중심 빔 신호로 정의하고 잔향과 표적이 모두 포함되어 있다고 가정한다. 그리고, 중심 빔 신호에 인접한 빔 신호를 참조 신호로 사용하고 잔향만 포함되어 있다고 가정한다. 참조 신호의 i 번째 구간으로부터 형성된 전방행렬 Y_R 는 식 (5)와 같이 잔향 부 공간을 생성하는 행렬 Y_R^u 과 백색잡음 부 공간을 생성하는 행렬 Y_R^w 로 분해된다.

$$Y_R = Y_R^u + Y_R^w \quad (5)$$

여기서, n 과 w 는 각각 참조 신호에서의 잔향 부 공간의 계열과 백색잡음 부 공간의 계열을 나타낸다. Y_R 의 계열은 중심 빔 신호의 i 번째 구간에서의 계열과 동일한 R 이다. Y_R 는 SVD에 의해 식 (6)과 같이 표현된다.

$$Y_R = U_R \Sigma_R V_R^H = \begin{bmatrix} U_R^u & U_R^w \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Sigma_R^u & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Sigma_R^w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R^u \\ V_R^w \end{bmatrix}^H \quad (6)$$

고유 대역폭 (intrinsic bandwidth)은 두 개의 LFM 신호를 분리할 수 있는 가장 작은 대역폭으로, 신호 길이 T , 대역폭 B 인 LFM 신호의 경우 $\sigma \approx (B/T)^{1/3}$ 로 정의된다 [6]. 동일 시간 구간에서 인접 빔들은 국부 정상에 대한 가정에 의해 유사한 잔향 에너지를 가지므로, 식 (2)

에서의 Y_i^u 과 식 (5)에서의 Y_R^u 은 유사한 특이 값들을 가지게 된다. 또한, 한 데이터 구간에서의 계열은 그 구간에 포함된 고유 대역폭의 수와 동일하므로 [3], Y_i^u 과 Y_R^u 은 동일한 계열을 가지게 된다. 즉, Σ_i^u 과 Σ_R^u 은 유사한 값을 가지며, m 과 n 이 동일하게 된다. 그러므로, 식 (3)의 Σ_i 로부터 식 (6)의 Σ_R 를 빼으로써 중심 빔 신호의 Σ_i 에 서 잔향 신호에 해당하는 특이 값들 Σ_i^u 이 제거되고, 표적 신호에 해당하는 특이 값들만을 포함한 대각행렬 $\tilde{\Sigma}_i$ 가 추정된다. 이 과정에서 특이 값의 차이가 음이 되면 그 값은 0으로 대체한다. 식 (3)에서 Σ_i 를 추정된 $\tilde{\Sigma}_i$ 로 대체함으로써 전방행렬 \tilde{Y}_i 가 다음과 같이 추정된다.

$$\tilde{Y}_i = U_i \tilde{\Sigma}_i V_i^H \quad (7)$$

\tilde{Y}_i 로부터 i 번째 구간의 추정된 표적 신호 \tilde{x}_i 가 계산되고, 모든 구간의 추정된 표적 신호를 연결함으로써 추정된 중심 빔 신호 \tilde{x} 가 만들어진다. 마지막으로, \tilde{x} 에 정합필터를 적용하여 표적을 탐지한다.

그림 1은 특이 값 차이를 이용한 LFM 잔향 감소 기법의 블록선도이다. 이때 σ_h^C , σ_h^A 는 중심 빔과 인접 빔의 i 번째 블록에서 h 번째 특이 값을 나타낸다.

그림 1의 특이 값 차이를 이용한 잔향 감소 기법은 요약하면 다음과 같다.

- Step 1. 표적이 존재하는 중심 빔에 대한 참조 신호로 사용할 인접 빔 신호를 선택한다.
- Step 2. 중심 빔과 인접 빔에 대해 동일한 크기로 구간화 한다.
- Step 3. 중심 빔과 인접 빔에서 동일한 시간 구간에 대해 각각 식 (1)과 같이 전방행렬을 생성한다.
- Step 4. 각각의 구간에 대해 SVD를 통해 특이 값들을 구한다.

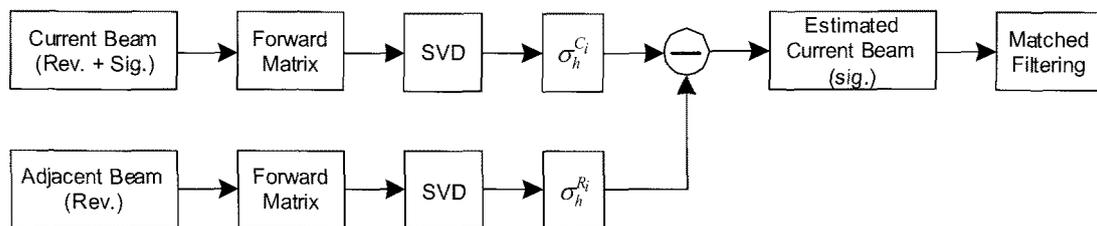


그림 1. 특이 값 차이를 이용한 LFM 잔향 감소 기법 블록선도
 Fig. 1. Block diagram of LFM reverberation suppression using difference of singular values.

- Step 5. 중심 빔에 대한 특이 값들에서 인접 빔에서 구한 특이 값들의 차이를 구한다.
- Step 6. 전방향별 생성의 역 과정을 통해 잔향이 감소된 신호를 추정한다.
- Step 7. 정합필터를 통해 표적을 탐지 한다.

III. 실험 결과 및 성능 분석

수중 장애물 탐지에서 특이 값 차이를 이용한 잔향 감소 기법을 십자형 구조의 수직 빔 송/수신 장치를 이용해 획득한 실제 해상 실험 데이터에 적용하여 실험을 수행하였다. 표적은 8번 빔에 약 0.4초 (300m) 부근에 존재한다. 실험에서 사용된 십자형 구조의 송/수신 장치는 수직 축과 수평 축에 각각 11개의 센서를 사용하며, 수직 축과 수평 축의 가운데 센서가 중복되는 구조로 총 21개의 센서가 배열되어 있다. cosine 영역에서 -0.7에서 0.7까지 0.1의 등 간격으로 15개의 수평 빔 출력 신호를 얻으며, 빔 형성 기법은 일반적인 시간영역 지연 합 (delay-sum) 빔 형성 기법을 사용하였다 [7]. 신호 처리시, 연산량 감소를 위해 빔 신호를 기저 대역으로 대역 이동하고 데시메이션 하였다. 또한 특이 값 차이를 이용한 잔향 감소 기법에 사용된 구간 길이 L 은 하나의 블록에 대한 대역폭이 고유 대역폭보다 커야 하며, 식 (1)에서 Y 의 행렬의 계열 p 가 한 블록에 포함된 잔향의 부 공간을 생성하는 행렬의 계열보다 충분히 크다는 가정을 만족하도록 결정하였다.

그림 2는 표적이 존재하지 않는 실험 잔향 데이터에서 두 빔 신호들 간의 특이 값 거리를 나타낸 것이다. i 번째 구간에서의 특이 값 거리는 식 (8)과 같이 정의 된다.

$$d_i = \sum_{k=1}^m |\sigma_k^i - \sigma_k^{i+1}| \quad (8)$$

여기서, σ_k^i 와 σ_k^{i+1} 는 각각 i 번째 구간에서의 중심 빔 신호와 참조 빔 신호의 k 번째 특이 값을 나타내며, m 은 잔향 부 공간의 계열이다. 한 데이터 구간의 계열은 그 구간에 포함된 고유 대역폭의 수와 동일하므로 실험에서는 $m = 2$ 로 설정하였다. 그림 2(a)는 공간적으로 인접한 두 빔 신호들 간의 특이 값 거리를 나타낸 것으로서 k 번째 빔을 중심 빔 신호로 선택하였으며 $(k-1)$ 번째 빔을 참조 신호로 선택하였다. 인접한 빔 신호들 간의 특이 값 거리가 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 이는 공간적

으로 인접한 구간의 신호 간 에너지 특성이 일정하게 유지된다는 국부 정상에 대한 가정을 만족시킨다. 그림 2 (b)는 중심 빔 신호로 선택된 8번 빔과 참조 신호로 선택된 다른 빔 신호들 간의 특이 값 거리를 나타낸 것이다. 대체로 중심 빔 신호로 선택된 8번 빔과 빔 간격이 커질수록 특이 값 거리가 커짐을 볼 수 있다. 이는 국부 정상에 대한 가정이 빔 간격이 커질수록 약해짐을 알 수 있다. 그리고 중심 빔과 가장 근접해 있는 7, 9번 빔에는 표적 신호가 나타날 가능성이 존재하므로 국부 정상에 대한 가정을 만족하면서 표적 신호가 나타날 가능성이 희박한 6번 빔과 10번 빔이 참조 신호로 적합함을 알 수 있다.

그림 3은 표적이 존재하는 8번 빔 신호에 대한 표적 탐지 결과를 나타낸다. 이때, 참조 신호는 6번 빔을 선택하였다. 그림 3의 (a), (b)는 각각 전처리 신호처리 기법을 적용하지 않은 정합필터의 출력과 특이 값 차이를 이용한 잔향감소 기법 적용 후의 정합필터 출력을 나타낸

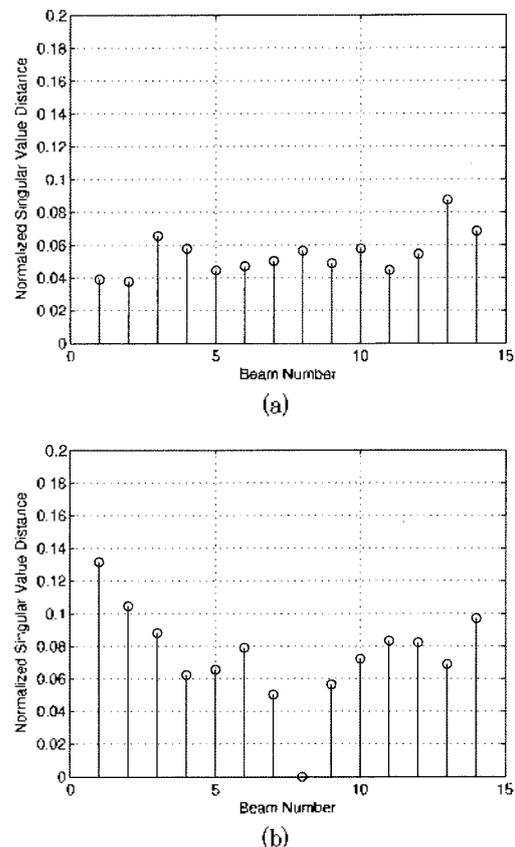


그림 2. 두 빔들 간의 특이 값 거리
 (a) 인접한 두 빔들 간의 특이 값 거리
 (b) 빔 8번과 다른 빔들 간의 특이 값 거리
 Fig. 2. Average singular value distance between two beams.
 (a) Average singular value distance between two successive beams
 (b) Average singular value distance between beam 8 and other beams

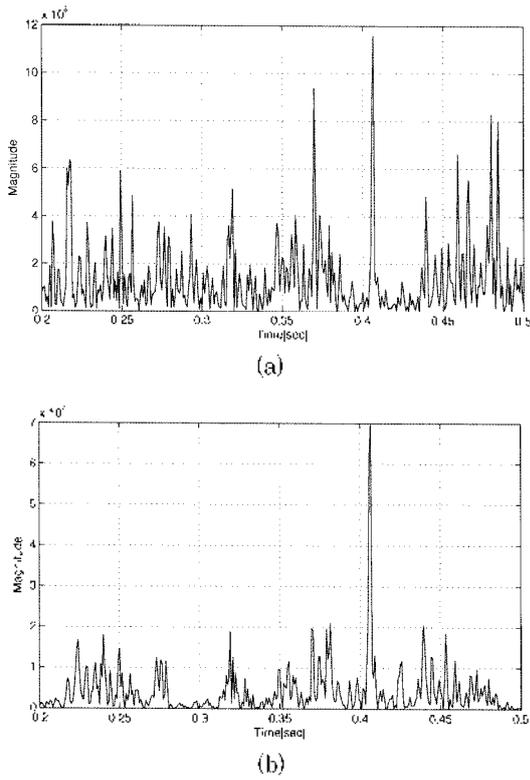


그림 3. 표적 탐지 결과
 (a) 정합필터 출력
 (b) 제안한 기법 적용 후 정합필터 출력
 Fig. 3. Target detection results.
 (a) Conventional matched filter output
 (b) Matched filter output with proposed method

다. 그림 3 (a)에서는 표적 신호뿐만 아니라 잔향에 의해 발생하는 큰 신호들이 존재함을 볼 수 있다. 그러나 그림 3 (b)에서는 잔향의 영향으로 큰 세기를 갖는 신호들이 제거됨으로써 표적의 탐지 성능이 향상되었음을 확인할 수 있다. 그림 4는 k 번째 빔을 중심 빔 신호로 ($k=2$)번째 빔을 참조 신호로 선택 하였을 때의 방위와 거리에 대한 표적 탐지 결과를 나타낸다. 그림 4의 (a), (b)는 각각 전처리 신호처리 기법을 적용하지 않은 정합필터의 출력과 특이 값 차이를 이용한 잔향감소 기법 적용 후의 정합필터 출력을 나타낸다. 거리와 방위에 대한 출력결과에서도 특정 방위의 신호뿐만 아니라 모든 빔 신호에 대해 특이 값 차이를 이용한 잔향감소 기법을 적용한 경우 잔향의 영향으로 큰 세기를 가지는 신호들이 제거됨으로써 표적의 탐지 성능이 향상되었음을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 근거리에서 위치하는 수중 장애물 탐지에

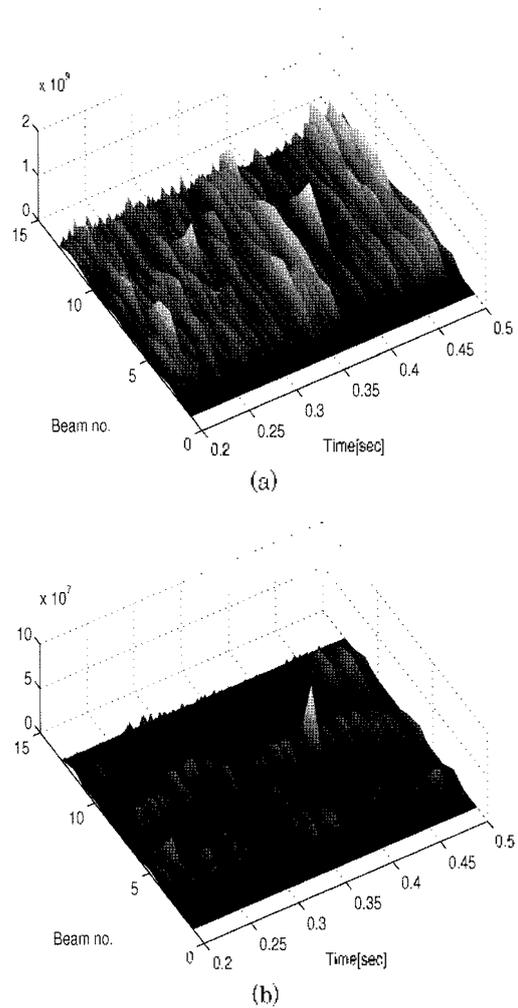


그림 4. 전체 빔에 대한 표적 탐지 결과
 (a) 정합필터 출력
 (b) 제안한 기법 적용 후 정합필터 출력
 Fig. 4. Target detection results for entire beam signals
 (a) Conventional matched filter output
 (b) Matched filter output with proposed method

서 잔향 신호를 효율적으로 감소시키기 위해서 잔향과 표적이 포함되어 있다고 가정된 중심 빔 신호에 인접한 빔 신호를 참조 신호로 사용하여 중심 빔 신호와의 특이 값의 차이를 이용함으로써 잔향 신호를 감소시키는 기법을 적용하였으며, 십자형 구조의 송수신기를 통해 얻어진 실측 잔향 데이터를 이용한 실험을 통하여 향상된 성능을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 BK21사업 및 국방과학연구소의 선제 고정형 소나 자함 소음 적응 제거 및 능동표적 자동 인식 기법 연구 위탁과제 (UD060011DD)에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

1. R. J. Unck, *Principles of Underwater Sound* (3rd Ed.), McGraw-Hill, New York, 1983.
2. 최병웅, 김정수, 이균경, "선형 Dechirping 변환을 이용한 LFM 잔향의 백색화 기법," *한국음향학회지*, 26권, 3호, 129-135쪽, 2007.
3. G. Ginolhac and G. Jourdain, "Principal component inverse" algorithm for detection in the presence of reverberation," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 27, no. 2, pp. 310-321, Apr. 2002.
4. Hyung-Soo Lee and Kyun-Kyung Lee, "Linear frequency modulation reverberation suppression using difference of singular values," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 124, no. 5, pp. EL328-EL333, Nov. 2008.
5. R. Kumaresan, I. P. Kirsteins and D. W. Tufts, "Data adaptive signal estimation by singular value decomposition of a data matrix," *Proceedings of the IEEE*, vol. 70, pp. 684-685, Jun. 1982.
6. L. R. O. Storey, "An investigation of whistling atmospherics," *Phil. Trans. R. Soc. London*, vol. A246, pp. 113-141, 1953.
7. R. Nielsen, *Sonar Signal Processing*, Artech House, Boston, 1991.

저자 약력

•이 형 수 (Hyung Soo Lee)



2000년 2월: 경북대학교 공과대학 전자전기공학부 (공학사)
 2002년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
 2009년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
 2009년 1월~현재: LIG넥스원(주)
 ※ 주관심분야: 수중음향신호처리, 표적탐지 및 추적

•권 범 수 (Bum Soo Kwon)

한국음향학회지 제27권 3호 참조

•조 점 군 (Chom Gun Cho)



1999년 2월: 연세대학교 공과대학 전자공학과(공학사)
 2001년 2월: 연세대학교 대학원 전기전자공학과 (공학석사)
 2001년 2월~현재: 국방과학연구소
 ※ 주관심분야: 수중음향 신호처리, 합성개구소나 신호 처리, 표적탐지 및 추적

•이 균 경 (Kyun Kyung Lee)

한국음향학회지 제26권 2호 참조