한국음향학회지 제32권 제6호 pp. 532~540 (2013)
The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.32, No.6 (2013)
http://dx.doi.org/10.7776/ASK.2013.32.6.532

pISSN : 1225-4428
eISSN : 2287-3775

광대역 에너지 탐지를 위한 수신신호 강도 크기기반 가중치인가 기법

Receiving Signal Level Measurement Based Weighting Method for Broadband Energy Detection

강태수†, 김영신, 김용국, 문상택

(TaeSu Kang†, Youngshin Kim, Yong Guk Kim, and Sang-Taeck Moon)

LIG Nex1 Maritime연구소

(접수일자: 2013년 7월 9일; 채택일자: 2013년 9월 4일)

초 록: 본 논문에서는 수동 소나의 광대역 에너지 탐지를 위하여 수신신호 강도 변화에 따른 가중치를 인가하는 기법을 제안한다. 광대역 에너지 탐지에 널리 사용되는 부대역 에너지 탐지 (Subband Energy Detection) 기법은 CED (Conventional Energy Detection) 기법에 비하여 다중신호 및 클러터 간섭에 강인하나, 수신신호에서 검출된 극값의 강도 변화에 따라 효율적인 가중치를 인가할 수 없어 탐지 성능을 저하 시킨다. 따라서 본 논문에서는 검출된 극값의 강도 변화에 따라 효율적으로 가중치를 인가하는 기법을 제안하였다. 시뮬레이션 및 황해 실 음향 데이터를 이용한 성능 비교, 칼만 필터를 이용한 추적시험 수행을 통하여 제안 기법의 탐지성능이 기존 기법에 비해 우수함을 관찰하였다.
핵심용어: 부대역 극값 에너지 탐지, 부대역 에너지 탐지, 광대역 처리, 수동소나

ABSTRACT: In this paper, we propose the modified SED (Subband Energy Detection) which can assign weights adapting to the receiving signal level for the broadband energy detection in the passive SONARs. SED which is one of the broadband processing mainly employed by passive SONARs to detect a target is more robust against interference like multi signals or a clutter than CED (Conventional Energy Detection), but it degrades detection performance to assign weights independent of extracted extrema level of the receiving signal. Therefore, in this paper, the weighting method which can efficiently assigns rewards or penalties adapting to extracted extrema level of the receiving signal is proposed. In order to evaluate the performance of proposed method, we conducted experiments by using simulation and real ocean acoustic signal which is acquired from Yellow Sea. From the experiments, our proposed method has shown better performance than conventional SED.
Keywords: Subband extrema energy detection, Subband energy detection, Broadband processing, Passive SONAR
PACS numbers: 43.60.Ac

I. 서 론

광대역 처리기법은 배열센서 주변 수중표적(target)의 방사소음(radiated noise) 에너지를 탐지(detection)하여 주어진 시간에 표적의 위치를 추정(estimation) 한다. 이는 표적의 시간별 상대 방위를 즉각적으로 제공하는 유일한 수단으로 소나 시스템(sonar system)에서 중요한 분야중 하나이다.[1-2]

소나 시스템에서 바라보는 수중 음향 환경은 크게 환경소음과 표적신호로 구분된다. 주변 환경소음(ambient noise)은 조류, 지진, 해양생물, 선박의 항해 등 다양한 원인에 기인하여 발생하며,[3] 고주파 일수록 감쇠 계수가 커지기 때문에 고주파에 비해 저주파 환경소음 에너지가 매우 크다. 표적신호는 표적 내 기계류(machinery)의 작동, 표적 기동에 따른 선체와 유체의 마찰에 의한 유체동역학적(hydrodynamic)

†**Corresponding author:** Tae-Su Kang (taesu.kang@lignex1.com)
702 Sampyeong-dong, Bundang-gu, Seongnam-City Gyeonggi-do 463-400, Republic of Korea
(Tel: 82-31-8026-4355, Fax: 82-31-8026-7089)

원인, 프로펠러소음 등에 기인하여 발생한다.[3] 이중 유체동역학적 원인에 기인한 소음은 주로 특정 대역 또는 전대역내 에너지 분포가 연속적인 광대역 신호(broadband signal)를 발생시키며, 기계류 작동에 의한 소음은 불연속적 토널(tonal)형태의 협대역 신호(narrowband)를 발생시킨다. 이렇듯 표적은 다양한 크기와 형태로 에너지를 방사하며, 방사된 모든 에너지는 환경 소음에서의 표적 위치를 식별하는데 사용된다.

하지만 방사소음 감소 기술 발전으로 표적의 방사소음이 점점 고요해짐에 따라 표적의 탐지는 어려워지고 있다.[4] 광대역 처리 기법 중 CED는 고요한 단일신호(single signal) 탐지에 유리하나 다중신호(multi signals)가 존재하는 실 수중 음향 환경에서 사용이 제약적이다. 부대역 에너지 탐지는 주파수 대역별 극값(extrema)들만을 이용하여 CED의 제약을 개선하였다. 하지만 수신신호에서 극값으로 검출되지 못한 표적신호 에너지의 누락과, 검출된 표적신호의 강도 변화에 따라 효율적으로 가중치를 인가하지 못함에서 기인하는 신호 대 잡음비의 저하로 표적이 탐지되지 않는 단점이 있다. B. Zarnich는[2] DOA (Direction Of Arrival)기법 중 QSC(Quadratic Spectral Capon) 및 MUSIC(MUltiple SIgnal Classification) 알고리즘을 이용하여 표적신호의 방향을 탐지하고, 부대역 에너지 탐지의 대역별 에너지 축적(accumulate)원리를 결합하여 방위 해상도를 향상시키는 연구를 수행하였다. 하지만 이 연구는 수신된 신호의 강도가 임의의 문턱값(threshold)을 넘는 경우에 한해서만 제한적으로 수행 되었으며, 강도가 약한 표적신호의 탐지 성능은 부대역 에너지 탐지 기법에 비해 감소하였다.

본 논문에서는 부대역 에너지 탐지에서 검출된 극값의 강도 변화에 따라 효율적으로 가중치를 인가할 수 있는 기법을 제안한다. 제안된 기법은 주파수 대역별 검출된 극값의 에너지 강도에 따라 강약을 분류하고, 강도가 약한 신호에는 단위 가중치를 인가하고 강한 신호에는 강도에 적합한 가중치를 계산하여 인가한다. 이를 통해 다양한 강도의 신호들이 공존하는 실 음향 환경에서의 표적탐지 성능을 향상시키는 기법을 제안하였다.

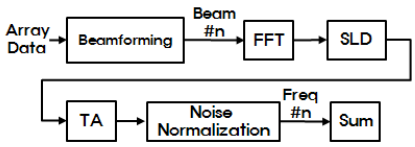


Fig. 1. Block diagram of CED.

II. Conventional Energy Detection

CED의 기본 원리는 표적신호의 공간 일관성(spatial coherence)이다.[1] 공간 일관성 원리는 빔 형성기의 주파수-방위(FRAZ; FRequency AZimuth)출력에서 표적신호의 다양한 주파수 성분이 동일 방위에 정렬되어 나타나는 특성이다. 반대로 빔 형성기 출력의 부엽(sidelobe)은 주파수에 따른 너비(width)변화로 공간적 정렬이 이루어지지 않는다. 빔 형성기 출력의 방위별 에너지를 합산하면, 두 특성에 의하여 표적신호의 에너지는 누적되고 주변 환경 소음의 에너지는 누적 되지 않는다.

Fig. 1은 CED의 블록 다이어그램이다. 빔 형성기의 출력은 주파수 변환 후 제곱검파기(square-law detector)를 통과하여 적분 및 평균(time average)이 취해진다. 소음 규준화(noise normalization) 및 가중화(weighting)를 거쳐 방위별 에너지의 합산이 시간에 따라 기록되면, 시간-방위별 표적 에너지 값을 전시하는 시간-방위 기록(BTR; Bearing-Time Record)이 구현된다.

CED는 단일신호 신호탐지 시 이론적 최소탐지수준(MDL; Minimum detectable level)이 낮다는 장점을 가진다. 하지만 다중신호 환경에서 시간-방위 기록 그램(gram)의 흐릿함(blurry trace) 및 낮은 방위 해상도(wide trace), 주변의 고요한 표적(quieter contact) 잠식 등의 단점이 있다.[1]

III. 부대역 에너지 탐지

CED의 단점은 방위별 모든 에너지 값의 합산에서 기인한다. 이러한 단점을 해결하기 위해 부대역 에너지 탐지는 각 주파수별 에너지의 극값만을 합산에 사용함으로써 다중신호 환경에서의 방위 해상도 및 주변의 고요한 표적 잠식 문제를 개선하였다. [1]

Fig. 2는 부대역 에너지 탐지의 블록 다이어그램이다.

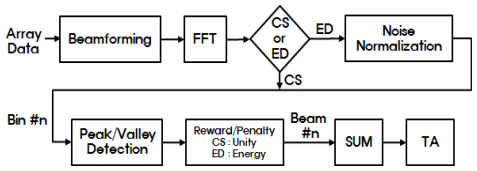


Fig. 2. Block diagram of subband energy detection.

빔 형성기의 방위별 주파수 스펙트럼 출력에서 주파수 별로 인접 방위와 비교하여 지역적 극값(local extrema)을 검출한 후 가중치 방식에 따라 가중치를 인가한다. 극값에 인가된 가중치는 다시 방위별로 합산되어 방위별 에너지 스펙트럼을 생성한다.

CED와 마찬가지로 부대역 에너지 탐지의 원리는 공간 일관성 원리를 기본 전제로 한다. 부대역 극값 에너지 탐지인 경우 환경 소음에서 피크값(peak)과 벨리값(valley)의 발생확률이 동일하여 그 합이 상쇄되는 효과를 추가적으로 이용한다. 결과적으로 극값들의 방위별 합산은 표적신호 에너지의 누적과 환경소음 에너지의 상쇄를 유도한다.

부대역 에너지 탐지는 극값 검출 방법 및 가중치 인가 방식에 따라 4가지로 구분된다. 극값 중 피크값만을 검출할 경우를 부대역 피크값 에너지 탐지(SPED; Subband Peak Energy Detection)라고 하며, 피크값 및 벨리값 모두 검출할 경우 부대역 극값 에너지 탐지(SEED; Subband Extrema Energy Detection)라고 한다. 일반적으로 부대역 극값 에너지 탐지를 사용할 경우 추적선이 더 가늘고 경계가 선명하다. 검출된 극값은 종류에 따라 가중치를 인가한다. 피크값엔 1을 가하고, 벨리값엔 1을 감하는 단위 가중치(unity weight) 인가 방식을 클러터 억제 방식(CS; Clutter-Suppress mode)이라 하며, 실 에너지 인가 방식을 에너지 탐지 방식(ED; Energy-Detection mode)이라고 한다.

부대역 에너지 탐지의 극값 검출은 표적신호의 강도가 주변 환경의 평균 소음수준(average noise floor)보다 작아도 가능하다. 이는 표적 신호의 강도는 일정한데 반해 주변 환경소음이 지속적으로 변동(fluctuations)하면서 표적 신호보다 약해지는 순간에 피크값이 검출되기 때문이다.[1] 특히 강도가 약한 표적신호 탐지시에는 검출 신호의 실 에너지를 가중치로 인가하는 에너지 탐지 방식보다 신호 강도와 무관하게 단위 가중치를 인가하는 클러터 억제 방식이 유리하다. 클러터 억제 방식의 이득은 피크값 검출 개수에 비례하므로, 신호 강도는 약하지만 피크값 검출 확률이 높은 약한 광대역 소음 탐지시 매우 유리하다. 하지만 신호 강도가 강한 신호에도 단위 가중치를 인가하여, 강한 협대역 소음을 방사하는 표적의 탐지시 성능이 저하된다. 이러한 경우 에너지 탐지 방식이 보다 적합하다.

IV. 제안기법

3장에서 살펴본 바와 같이 기존 부대역 에너지 탐지 기법의 가중치 인가 방식은 표적신호의 다양한 신호 강도를 고려하지 못한다. 하지만 서론에서 언급한 바와 같이 대다수의 실 표적 신호는 다양한 강도를 가지는 광대역 및 협대역 신호로 구성되어 있으며, 이는 실 수중 환경에서 부대역 에너지 탐지 기법의 탐지 성능을 제한시킨다. 이러한 성능 제한을 개선하기 위하여 표적신호의 수신 강도에 따른 적절한 가중치인가 방식이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 수신 강도가 약한 표적 신호에는 단위 가중치를 인가하면서 강한 신호에는 에너지 강도에 따라 가중치를 계산하여 인가하는 기법을 제안한다.

Fig. 3은 제안기법의 블록 다이어그램이다. 부대역 에너지 탐지와 주요한 차이점은 주파수별 극값 검출과 동시에 주파수별 RMS전압을 산출하는 것이다. 산출된 주파수별 RMS전압은 주파수별 검출된 극값의 강약을 구분하는 문턱값이 되어, 검출된 극값이 RMS전압보다 작을 경우 기존 방식과 동일하게 단위 가중치를 인가하고, 클 경우에 인가되는 가중치는 식(1)과 같은 가중치를 인가한다.

$$Reward(i,f) = \left(\left(\frac{b_{peak}(i,f)}{\sqrt{\frac{1}{K}\sum_{n=0}^{K} b_n(i,f)^2}} - 1\right) \times \beta(i) + 1\right) \times \alpha. \quad (1)$$

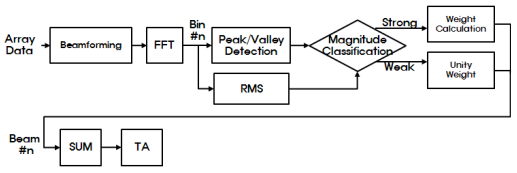


Fig. 3. Block diagram of proposed method.

여기서 i는 1부터 N개까지 분석 주파수 대역(VLF, LF, MF, HF)을 나타내며, f는 주파수 빈(bin)을 나타내고, n은 0부터 K까지 빔(beam) 방위를 나타낸다. $b_{peak}(i,f)$는 문턱값을 초과하는 피크값의 크기이며, 분모는 RMS전압, $\beta(i)$는 대역별 보상값, α는 분수항의 정수부다.

가중치에 사용되는 대역별 보상값 (β)은 다음 식과 같다.

$$\beta(i) = \frac{MAX(\eta(1),\eta(2),...,\eta(N))}{\eta(i)}. \quad (2)$$

여기서 $\eta(i)$는 주파수 대역별 문턱값을 초과한 피크값들의 분산을 각 대역의 프레임별 평균을 취한 값을 의미하며 다음 식과 같다.

$$\eta(i) = E[\sigma^2(\frac{b_{peak}(i,f)}{\sqrt{\frac{1}{K}\sum_{n=0}^{K} b_n(i,f)^2}})]. \quad (3)$$

검출된 극값의 강약을 구분하는 문턱값은 시간과 주파수에 따라 표적신호 성분에만 가중치를 인가 할 수 있는 값이어야 한다. 과도하게 높은 경우 표적신호에 인가되는 가중치가 작아 성능 향상이 미비하며, 너무 낮은 경우 환경소음에 인가된 가중치가 커져 탐지 성능이 저하되기 때문이다. 또한 주파수 상승에 따라 음파의 파장이 짧아지면 공간상의 에너지 밀도 변화가 급격해 지는데, 이는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 환경소음의 극값 검출 확률 및 극값의 분산 상승을 야기하여 문턱값의 변화를 요한다. 위 사항들을 고려하였을 때 시간-주파수에 따라 변화하는

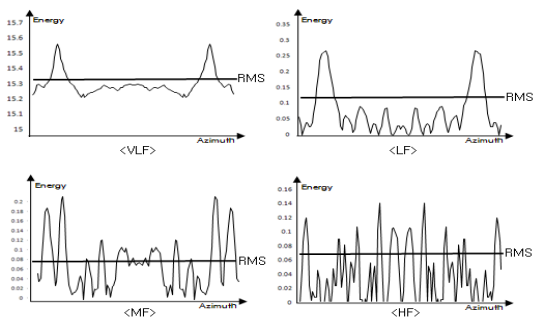


Fig. 4. Azimuth spectrum of a single frequency bin of each subband with RMS in Yellow Sea environment.

RMS 전압을 문턱값으로 사용함으로써 표적 신호에 적절한 가중치를 인가할 수 있다.

기준을 초과하는 피크값의 가중치는 다음 세가지 사항을 고려한 식(1)로 인가하였다. 첫째로 단위 가중치가 계산된 가중치에 의해 잠식 되지 않도록 문턱값에서의 계산 가중치를 1이 되도록 하였다. 둘째는 문턱값은 초과하지만 크지 않은 환경 소음에 과도한 가중치가 인가되지 않도록 크기에 연속적이면서도 선형적인 가중치를 인가하였다. 마지막으로 선형적인 가중치로 인하여 큰 신호에 충분한 가중치를 인가하지 못하는 것을 방지하기 위하여 단계적 가중치를 인가하였다.

한 가지 더 고려해야할 것은 위에 언급한 주파수에 따른 분산 차이가 제안기법의 부대역별 성능 차이를 발생시킨다는 점이다. 다시 말해 저주파 대역의 음파는 공간상 에너지가 넓게 분포되어 환경 소음과 표적 신호의 크기 차이가 크지 않은 경향이 있다. 이러한 대역별 성능차를 최소화하기 위해 식(2)와 같은 대역별 보상값(β)을 인가하였다. 보상값은 식(3)에 나타난 바와 같이 주파수 대역별 문턱값을 초과한 피크값들의 분산을 각 대역의 프레임별 평균을 취한 값, $\eta(i)$를 정규화(normalization)한 값의 역수를 나타낸다. 유사하게 대역별 검출 확률 차이에 대한 보상은 대역별로 기준을 초과한 피크값 개수의 프레임별 시간 평균을 계산한 후에 가장 작은 대역의 값을 기준으로 정규화 하여 벨리값에 인가하는 단위 가중치에 곱하는 방법으로 수행하였다.

V. 성능평가

제안된 처리 기법의 성능을 확인하기 위해 Table 1과 같이 신호 강도가 강한 협대역 신호 및 신호 강도가 약한 광대역 신호, 혼합 신호 세 가지 경우를 모사하여 두 기법에 적용 하였다. Fig. 5는 Table 1과 같이 센서에 신호를 입력하기 위하여 모사된 표적 신호의 도식이며, 처리에 사용된 빔형성은 기존 빔형성(Conventional Beamforming)[5-6], 소음규준화는 OTA(Order Truncate Average)[6]를 사용하였다.

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9는 각각 시나리오 1, 2, 3에 대한 기존 부대역 에너지 탐지 및 제안기법의 결과이다.

언급한 바와 같이 기존 부대역 탐지 기법의 클러터 억제 방식에서는 토널의 에너지가 비정상적으로 커도 검출된 극값의 개수가 작으면 표적탐지가 불가하며, 에너지 탐지 방식에서는 토널 수가 많아도 표적

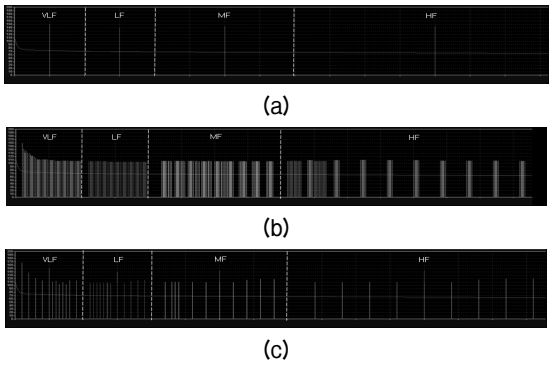
Table 1. Simulation parameters.

<Common Parameters>
(Sea state = 3 , Rain = 0, traffic = 0).
(Target Range = 3475 m, Target Bearing = 90°)

Scenario#1			Scenario#2		
Frequency Band	Num.of Tonal	Sensor Input (dB)	Frequency Band	Num.of Tonal	Sensor Input (dB)
VLF	1	12.4	VLF	58	-32.4
LF	1	7.7	LF	62	-32.3
MF	1	11.6	MF	99	-27
HF	1	15.3	HF	84	-24.4

Scenario#3

Frequency Band	Num.of Tonal	Sensor Input (dB)
VLF	12	-33.8/-28.4/-26.1/-26/-25/-24.6/ -24.6/-23.2/-23.1/-20.8/-20/-17.7
LF	13	-29.1/-29.1/-27.6/-27.6/-27.6/-27.6/ -26/-26/-26/-26/-20.7/-16.1/-16.1
MF	11	-21.6/-21.6/-21.6/-21.6/-21.6/-21.6/-21.6/ -21.6/-13.9/-13.9/-13.9
HF	9	-23.1/-23.1/-23.1/-23.1/-23.1/-23.1/-11.6/ -11.6/-11.6



(a) (b) (c)

Fig. 5. Target signal for simulation: (a) scenario#1 (b) scenario#2 (c) scenario#3.

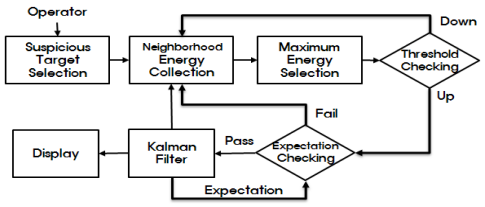
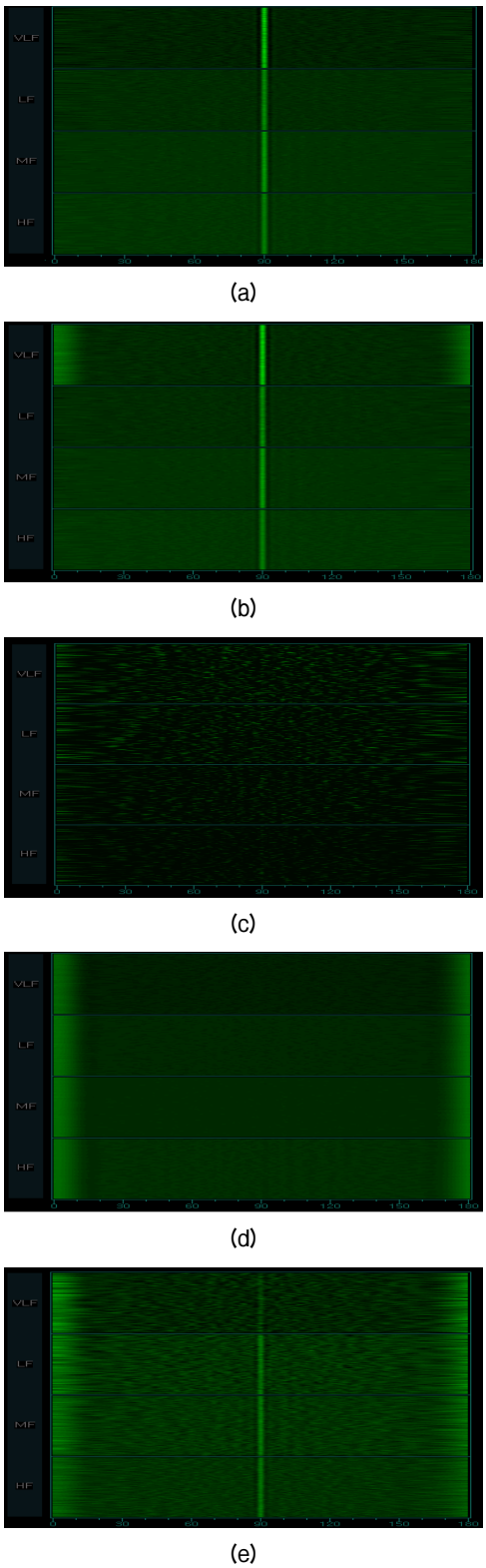
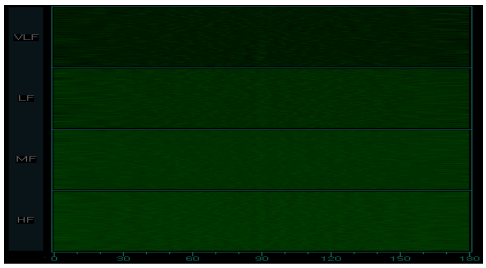


Fig. 6. Block diagram of the tracking method based on Kalman filter.

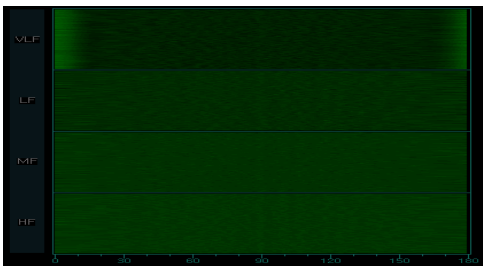


(a) (b) (c) (d) (e)

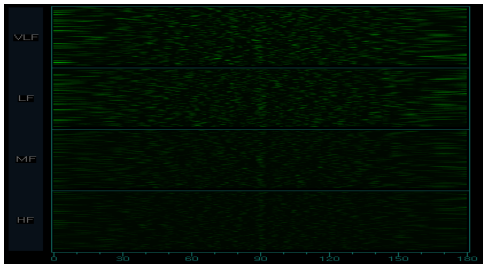
Fig. 7. Conventional SED and proposed method processing results of the scenario#1: (a) SEED-ED (b) SPED-ED (c) SEED-CS (d) SPED-CS (e) proposed method.



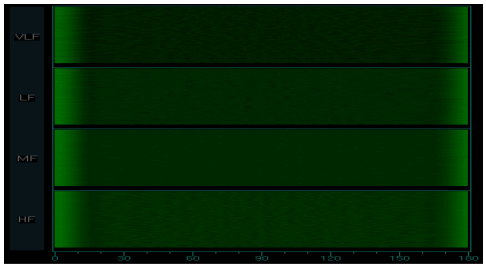
(a)



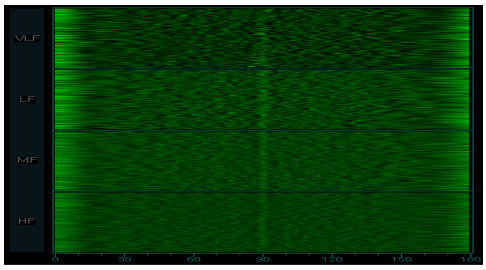
(b)



(c)

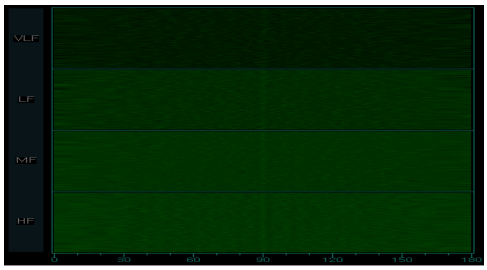


(d)

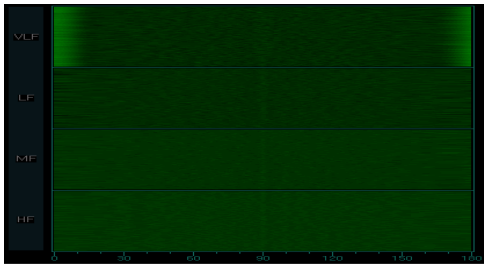


(e)

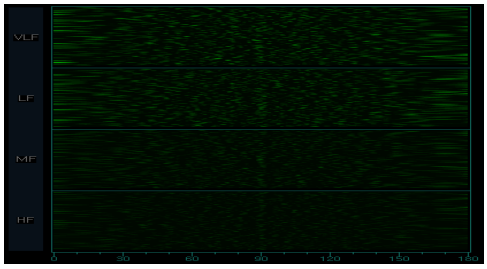
Fig. 8. Conventional SED and proposed method processing results of the scenario#2: (a) SEED-ED (b) SPED-ED (c) SEED-CS (d) SPED-CS (e) proposed method.



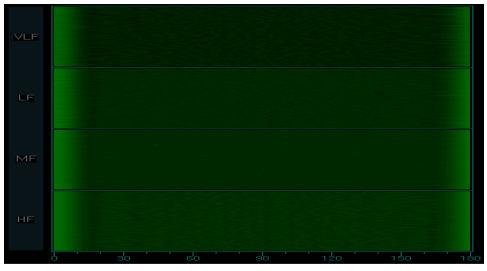
(a)



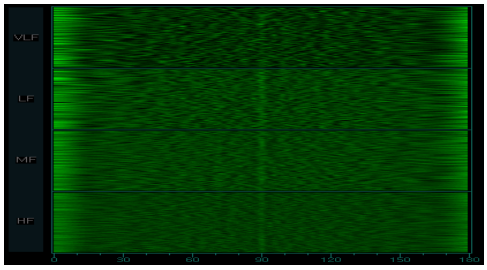
(b)



(c)

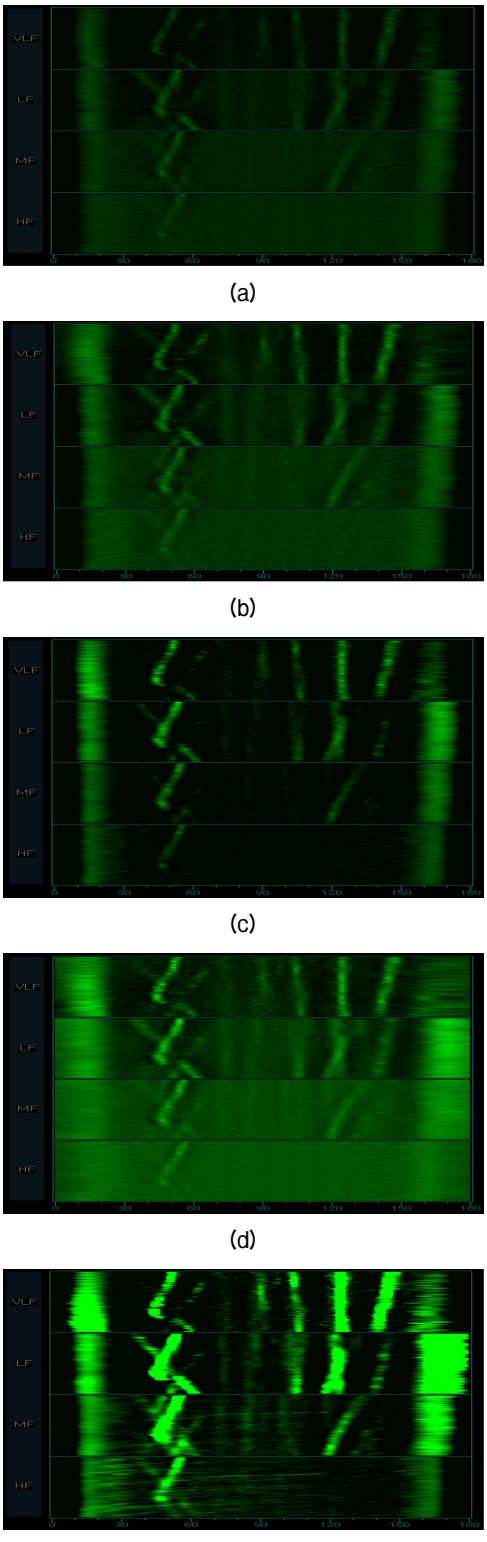


(d)



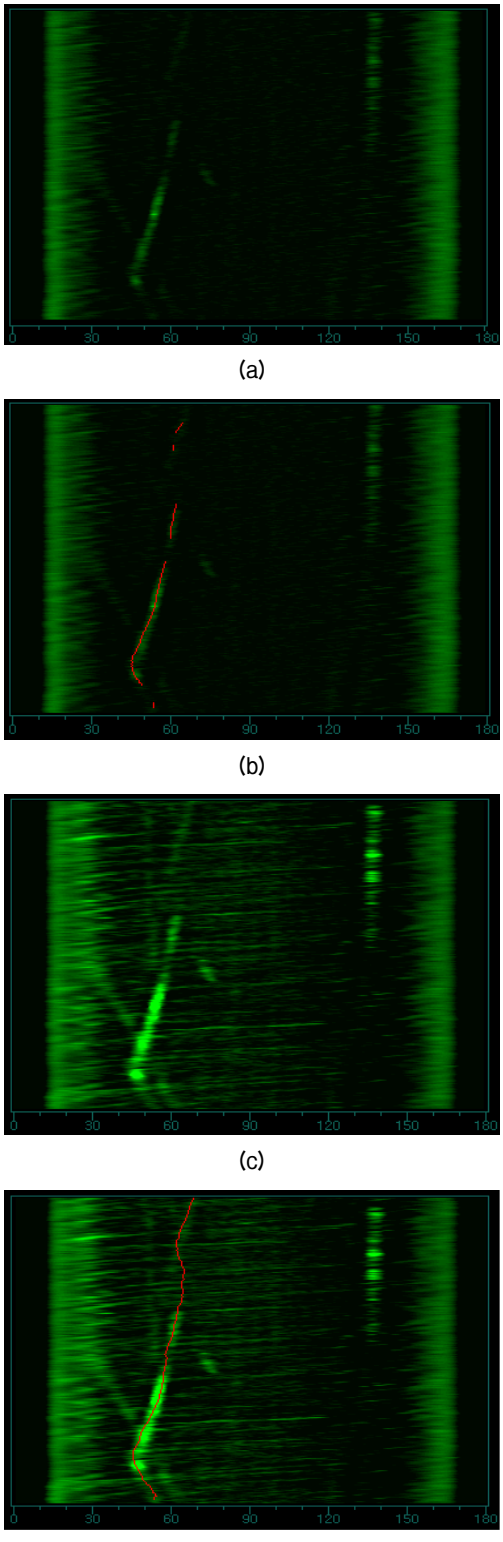
(e)

Fig. 9. Conventional SED and proposed method processing results of the scenario#3: (a) SEED-ED (b) SPED-ED (c) SEED-CS (d) SPED-CS (e) proposed method.



(a) (b) (c) (d) (e)

Fig. 10. Conventional SED and proposed method processing results in Yellow Sea environment: (a) SEED-ED (b) SPED-ED (c) SEED-CS (d) SPED-CS (e) proposed method.



(a) (b) (c) (d)

Fig. 11. The tracking results using the Kalman filter in Yellow Sea environment(HF band): (a) SEED-CS (b) SEED-CS showing tracking line (c) proposed method (d) proposed method showing tracking line.

신호의 강도가 약하면 탐지가 불가하다. 또한 Fig. 9에서 확인할 수 있듯이 강약의 신호가 혼합된 표적 탐지시 기존 부대역 에너지 탐지에서 생성되는 시간-방위 기록 그램의 신호 대 잡음비가 저하됨을 알 수 있다. 반면에 제안기법은 시나리오1, 2 모두에서 표적 탐지가 가능하며, 시나리오3에서 추적선의 신호 대 잡음비가 가장 뛰어남을 확인 할 수 있다. 다음으로 실 음향환경에서 제안기법의 성능을 확인하기 위해, 황해 천해 환경의 수심 약 50 m지점에 설치된 배열센서를 통하여 획득한 음향 데이터를 두 기법에 적용 하였다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 부대역 탐지 기법에서는 탐지 되지 않거나 희미하게 보였던 추적선이 제안기법을 이용하면 선명하게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 실 음향 신호에서도 제안기법의 가중치 방식이 효과적임을 입증하며, 그 효과는 주파수가 높은 대역에서 더 크게 나타난다.

하지만 주파수가 높은 대역일수록 클러터 성분이 소량 증가하며 추적선의 경계를 흐릿해지게 한다. 이는 추적선이 가장 얇고 경계가 확실한 부대역 극값 에너지 탐지-클러터 억제 방식 대비 약 10 % 내외의 추적선 너비 상승을 야기한다. 이러한 현상의 원인은 주파수 상승에 따른 분산값의 상승이 표적신호와 환경소음의 경계를 모호하게 만들기 때문이다. 하지만 경계가 모호하다는 의미는 다른 한편으로 클러터 성분뿐만 아니라 표적신호의 성분도 내재 하고 있음을 의미하며, 이는 Fig. 6에 표시된 칼만 필터를 이용한 추적을 통해 검증 가능하다. Fig. 11에서 두 기법의 추적 결과를 보면, 기존 부대역 탐지 기법에서는 의심 표적의 추적이 불가하지만 제안기법에서는 클러터로 판단되는 영역에서도 표적의 추적이 이루어짐을 볼 수 있다. 이는 클러터라고 판단되는 영역에서도 표적 신호의 가중치가 인가되었음을 의미하므로 대역 상승에 따른 클러터 발생이 단순한 성능의 저하라고 보기는 어렵다.

IV. 결 론

본 논문에서는 부대역 에너지 탐지에서 검출된 극값의 에너지 강도에 따라 적합한 가중치를 인가하는 기법을 제안하였다. 제안기법의 성능을 평가하기 위하여 시뮬레이션 및 황해 천해 환경 데이터를 적용한 결과, 기존 부대역 탐지 기법을 이용할 경우 탐지가 어려운 신호 강도가 강한 협대역 신호 또는 신호 강도가 약한 광대역 소음의 탐지가 용이함을 확인하였다. 또한 다양한 소음이 공존하는 실 해양에서의 일반적 표적 신호 탐지시 시간-방위 기록 그램의 신호 대 잡음비가 증가함을 확인함으로써, 제안 기법의 탐지 성능이 우수함을 확인하였다. 하지만 제안기법은 표적 탐지확률 상승에 따라 추적선의 너비가 다소 넓어지고 경계가 흐려져 방위 해상도가 저하되는 문제점이 있다. 향후에는 제안기법의 방위 해상도를 향상시키기 위하여 다양한 DOA 기법의 적용연구가 필요하며, 나아가 탐지결과와 실제 표적과의 정확도 증가 방안도 연구되어야 할 것이다.

References

1. M. Bono, B. Shapo, P. McCarty, and R. Bethel, “Subband energy detection in passive array processing,” In *Proc.* ASAP Workshop 2001, 25-30 (2001).
2. B. Zarnich, “A fresh look at broadband passive sonar processing,” In *Proc.* Seventh Annual ASAP ’99 Workshop, 99-103 (1999).
3. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd Edtion, (McGraw-Hill, Washinton, 1983), pp. 202-233, 354-376.
4. S. Yan and Y. Ma, “HIgh-resolution broadband beamforming and detection methods with real data,” Acoust. Sci. & Tech. **25**, 73-76 (2004).
5. B. D. Van Veen and K. M. Buckley, “Beamforming: a versatile approach to spatial filtering,” IEEE ASSP Magazine, **5**, 4-24 (1988).
6. R. O. Nielsen, *Sonar Signal Processing* (Artech Housem, Norwood, 1990), pp. 51-94, 146-147.

저자 약력

▸ 강 태 수(TaeSu Kang)

2010년 2월: 건국대학교 전자공학과 학사
2010년 1월 ~ 현재: LIG넥스원 연구원

▸ 김 영 신(Youngshin Kim)

1997년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 학사
2004년 8월: 한양대학교 지구해양과학과 석사
2008년 8월: 한양대학교 지구해양과학과 박사
2008년 7월 ~ 현재: LIG넥스원 수석연구원

▸ 김 용 국(Yong Guk Kim)

2006년 2월: 전남대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 학사
2008년 8월: 광주과학기술원 정보통신공학과 석사
2010년 8월: 광주과학기술원 정보통신공학과 박사수료
2011년 1월 ~ 현재: LIG넥스원 선임연구원

▸ 문 상 택(Sang-Taek Sang)

1993년 2월: 경희대학교 전자공학과 학사
1995년 2월: 경희대학교 전자공학과 석사
1994년 2월 ~ 현재: LIG넥스원 수석연구원