

위그너-빌 분포 함수 기반의 고유치 분해를 이용한 수중 천이 신호 식별

Underwater Transient Signal Classification Using Eigen Decomposition Based on Wigner-Ville Distribution Function

임 태 균*, 배 건 성*, 황 찬 식*, 이 형 욱**

(Tae-Gyun Lim*, Keun-Sung Bae*, Chan-Sik Hwang*, Hyeong-Uk Lee**)

*경북대학교 전자전기컴퓨터학부, **국방과학연구소 수중탐지체계부

(접수일자: 2007년 2월 21일, 수정일자: 2007년 4월 9일, 채택일자: 2007년 4월 23일)

본 논문에서는 수중 천이 신호에 대한 식별 알고리즘을 제안한다. 일반적으로 해양의 배경잡음은 스펙트럼 특성 및 에너지 변화가 적은 정제성을 갖는 반면에 천이 신호는 스펙트럼 및 에너지 변화가 큰 비정제성을 가진다. 따라서 수중 천이 신호 식별을 위하여 선행되어야 하는 수중 천이 신호 탐지에서는 프레임 단위로 스펙트럼 변이와 에너지 변화를 이용한다. 제안한 수중 천이 신호 식별 알고리즘에서는 특징 벡터를 추출하기 위하여 위그너-빌 분포 함수를 기반으로 고유치 분해를 이용한다. 추출된 특징 벡터를 기반으로 탐지된 수중 천이 신호의 특징 벡터와 식별하고자 하는 데이터베이스에 있는 기준 신호의 특징 벡터와의 상관값을 프레임 단위로 계산하고, 각 클래스별로 프레임 사상도를 산출하여 최대값을 갖는 기준 신호로 탐지된 수중 천이 신호를 식별한다.

핵심용어: 소나, 수중 천이 신호 식별, 위그너-빌 분포 함수, 고유치 분해, 특징 벡터 추출

투고분야: 수중 음향 분야 (5.4)

This paper presents new transient signal classification algorithms for underwater transient signals. In general, the ambient noise has small spectral deviation and energy variation, while a transient signal has large fluctuation. Hence to detect the transient signal, we use the spectral deviation and power variation. To classify the detected transient signal, the feature parameters are obtained by using the Wigner-Ville distribution based eigenvalue decomposition. The correlation is then calculated between the feature vector of the detected signal and all the feature vectors of the reference templates frame-by-frame basis, and the detected transient signal is classified by the frame mapping rate among the class database.

Key words: SONAR, Underwater transient signal classification, Wigner-Ville distribution function,

Eigenvalue decomposition, Feature vector extraction

ASK subject classification: Underwater acoustics (5.4)

I. 서론

천이 신호의 탐지 및 식별은 지진학이나 상태 모니터링 분야, 특히 수중 음향 신호 처리 분야에서 활발한 연구가 이루어지고 있다 [1][2][3]. 수중 환경에서 발생하는 천이 신호로는 돌고래와 같은 해양 생물이 내는 천이 신호와 선박, 잠수함 등에서 발생하는 인위적인 천이 신호가 있다. 일반적으로 천이 신호는 수 십 밀리 초에서

수 초에 이르는 짧은 지속성과 비정제성 (non-stationary) 등의 성질로 인하여 탐지와 식별에 많은 어려움이 있다.

높은 신호대잡음비 (SNR)를 가지는 환경에서는 배경 잡음에 비해 큰 크기를 갖는 천이 신호를 에너지 검출 기법을 적용해서 쉽게 탐지할 수 있다. 그러나 실제 해양 환경과 같이 낮은 신호대잡음비를 가지는 환경에서는 단순한 에너지 비교만으로는 수중 천이 신호를 효과적으로 탐지하기 어렵고, 보다 강한 천이 신호 탐지 기법이 요구된다.

수중 천이 신호의 짧은 지속성과 강한 비정제성 때문에 수중 천이 신호를 분석하고 식별하기 위해서는 일반

적으로 시간-주파수 분석 기법이 널리 이용된다. 따라서 수중 천이 신호를 해석하고 식별하기 위하여 웨이블릿(wavelet) 변환이나 위그너-빌 분포 함수(Wigner-Ville distribution)와 같은 시간-주파수 분석 기법들이 많이 연구되고 있다 [4][5].

위그너-빌 분포 함수는 양자학 분야에서 위그너(Wigner)에 의하여 1932년에 처음으로 소개되었고, 1948년 빌(Ville)에 의하여 신호 분석 분야에 다시 소개되었다. 위그너-빌 분포 함수는 천이 신호의 시간-주파수 특성을 잘 표현하지만, 자기 상관값 뿐만 아니라 상호 상관값이 발생하여 분석 성능이 떨어지는 단점이 있다. 따라서 이러한 간섭 현상을 제거하기 위한 연구가 많이 이루어져 왔으며, 신호 해석 시에 시간 윈도우를 적용하거나 시간-주파수 윈도우를 적용한 의사 위그너-빌 분포 함수(pseudo Wigner-Ville distribution)가 많이 사용되었다 [6]. 그러나 위그너-빌 분포 함수는 시간-주파수 해석 기법으로써 시간-주파수 영역의 많은 데이터를 출력하므로, 위그너-빌 분포 함수의 출력값을 특징 벡터로 사용하기에는 적합하지 않다고 할 수 있다. 따라서 수중 천이 신호 식별을 위한 특징 벡터에 적합하도록 위그너-빌 분포 함수의 데이터 양을 줄일 수 있는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 수중 천이 신호에 대한 식별 알고리즘을 제안한다. 수중 천이 신호의 탐지는 프레임 단위로 에너지 변화 및 스펙트럼 변이를 이용하며, 탐지된 수중 천이 신호의 식별을 위한 특징 벡터 추출은 의사 위그너-빌 분포 함수를 이용하여 얻어지는 시간-주파수 분석 결과에서 특징 벡터의 차원을 줄이기 위해 고유치 분해 기법을 이용한다. 천이 신호의 식별은 탐지된 천이 신호의 프레임 단위로 데이터베이스에 있는 각 클래스의 기준 신호와의 특징 벡터의 상관값을 계산한 후, 각 클래스별 프레임 사상도를 산출함으로써 수행된다. 실험을 통하여 제안한 수중 천이 신호 탐지 및 식별 알고리즘에 의하여 입력 신호들이 잘 탐지되고 식별됨을 확인하였고, 자동 수중 천이 신호 식별 시스템에 적용 가능하다는 것을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 수중 천이 신호 탐지 알고리즘을 설명하고, 3장에서는 제안한 특징 벡터 추출 및 수중 천이 신호 식별 알고리즘에 관하여 설명한다. 4장에서는 제안한 알고리즘을 이용한 수중 천이 신호의 탐지 및 식별 결과를 제시하고, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 수중 천이 신호 탐지 알고리즘

높은 신호대잡음비를 가지는 환경에서는 천이 신호의 가장 낮은 에너지 레벨도 배경 잡음의 에너지 레벨보다 크기 때문에 입력 신호의 에너지 레벨을 이용하여 천이 신호를 쉽게 탐지할 수 있다. 그러나 낮은 신호대잡음비를 가지는 수중 환경에서 배경 잡음으로부터 천이 신호를 탐지하는 것은 어렵고 중요한 문제이다. 일반적으로 배경 잡음은 정재성(stationary)의 성질을 가지므로 본 논문에서는 에너지의 변화와 스펙트럼 변이를 이용하여 프레임 단위로 입력 프레임이 배경 잡음인지 아닌지를 결정한다. 입력된 현재 프레임의 에너지와 스펙트럼 변이가 특정 문턱 준위보다 작을 경우에는 현재 프레임을 배경 잡음으로 결정하고 배경 잡음 전력을 이전의 4 프레임의 평균 잡음 전력으로 갱신시킨다. 배경 잡음 전력 추정 값으로 정규화된 스펙트럼 변이가 특정 문턱 준위보다 클 경우에는 현재 프레임은 수중 천이 신호로 결정되고 수중 천이 신호 식별 알고리즘이 수행되게 된다.

그림 1은 수중 천이 신호 탐지 알고리즘의 흐름도를 나타낸 것으로, 여기서 SD 는 배경 잡음 추정 값으로 정규화 된 스펙트럼 변이, P_{mean} 은 이전 4 프레임의 평균 전력이다. X 는 각 주파수 bin의 크기, P 는 입력 신호의 전력, K 는 전력의 문턱치를 조절하는 요소로써 실험적으로 최적의 값을 구하여야 한다. 또한 T_{SD} 도 실험적으로 최적의 값을 구하여야 하는 요소로써, 스펙트럼 변이의 문턱치이며, N 은 추정된 배경 잡음에 대한 각 주파수 bin의 크기이다.

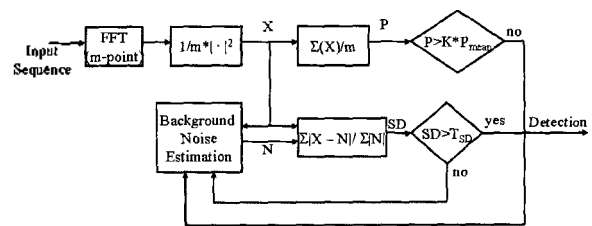


그림 1. 수중 천이 신호 탐지를 위한 흐름도
Fig. 1. Block diagram of a transient signal detection.

III. 제안한 수중 천이 신호 특징 벡터 추출 및 식별 알고리즘

본 논문에서는 시간-주파수 특성을 가지고 있는 천이 신호의 특징 벡터를 추출하기 위하여 의사 위그너-빌 분

포 함수와 고유치 분해 기법을 사용한다. 위그너-빌 분포 함수(WVD)는 식 (1)과 같이 정의되는 시간에 종속적인 상관 함수에 기반을 둔 시간-주파수 분석 기법이다.

$$WVD(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t + \frac{\tau}{2})s^*(t - \frac{\tau}{2})e^{-j2\pi f\tau}d\tau \quad (1)$$

여기서 t 는 공액 켈레 복소수를 나타낸다.

위그너-빌 분포 함수는 자기 상관 값뿐만 아니라 상호 상관값도 포함하고 있기 때문에 신호 분석에 있어서 한계를 가진다. 따라서 본 논문에서는 천이 신호의 특징 벡터를 추출하기 위하여 시간-주파수 윈도우 함수를 적용하여 상호 상관값을 제거하는 의사 위그너-빌 분포 함수(PWVD)를 사용한다 [4][7]. 의사 위그너-빌 분포 함수는 식 (2)로 표현된다.

$$PWVD(t, f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} WVD(t', f')H(t' - t, f' - f)dt'df' \quad (2)$$

여기서, $H(t, f)$ 는 식 (3)으로 주어지는 윈도우 함수이며, $\alpha, \beta > 0, \alpha\beta < 1$ 를 각각 만족한다.

$$H(t, f) = \frac{\sqrt{\alpha\beta}}{2\pi} e^{-(\alpha t^2 + \beta f^2)} \quad (3)$$

의사 위그너-빌 분포 함수는 시간-주파수 해석 기법이기 때문에 n 개의 샘플을 갖는 한 프레임에 대해 $m \times n$ 크기의 많은 양의 데이터를 출력한다. 여기서 m 은 주파수 영역에서 스펙트럼 빈 수를 의미한다. 그러나 천이 신호의 특성을 잘 표현하는 작은 양의 특징 벡터를 이용하여 식별을 수행하는 것이 효율적이므로 특징 벡터의 차원을 감소시키는 기법이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 식 (4)와 같이 $m \times m$ 의 정방 행렬 D 를 생성한 후 고유치 분해를 수행하고, D 의 가장 큰 고유치에 대응되는 고유 벡터를 신호 $s(t)$ 의 특징 벡터로 선택한다 [8].

$$D = PWVD(t, f) \cdot PWVD(t, f)^T \quad (4)$$

여기서 T 는 행렬의 전치 연산이다.

그림 2는 탐지된 수중 천이 신호의 특징 벡터를 추출하여 데이터베이스를 생성하는 흐름도를 나타내며, 세부적인 절차를 요약하면 다음과 같다.

1. 탐지된 천이 신호의 k 번째 프레임 신호 $s_k(t)$ 에 대한 의사 위그너-빌 분포 함수 $PWVD_k(t, f)$ 를 계산한다.
2. 식 (4)와 같이 정방 행렬 D_k 를 생성한다.
3. D_k 에 대하여 고유치 분해를 수행하고, D_k 의 고유치를 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq 0$ 와 같이 정렬한다.
4. 가장 큰 고유치 λ_1 에 대응되는 고유 벡터를 정규화하여 $s_k(t)$ 의 특징 벡터 u_k 로 선택한다.
5. 각 천이 신호의 특징 벡터 u_k 를 클래스별로 데이터베이스에 저장한다.
6. 탐지된 모든 프레임에 대하여 단계 1에서 5를 수행한다.

수중 천이 신호의 식별은 그림 2와 같은 절차를 거쳐 데이터베이스에 저장된 기준 신호들의 특징 벡터와 탐지된 수중 천이 신호의 특징 벡터와의 상관값을 계산하여 각 클래스별로 프레임 사상도를 구함으로써 수행된다.

그림 3은 수중 천이 신호의 식별을 위한 흐름도를 나타내며, 세부적인 식별 절차는 다음과 같다.

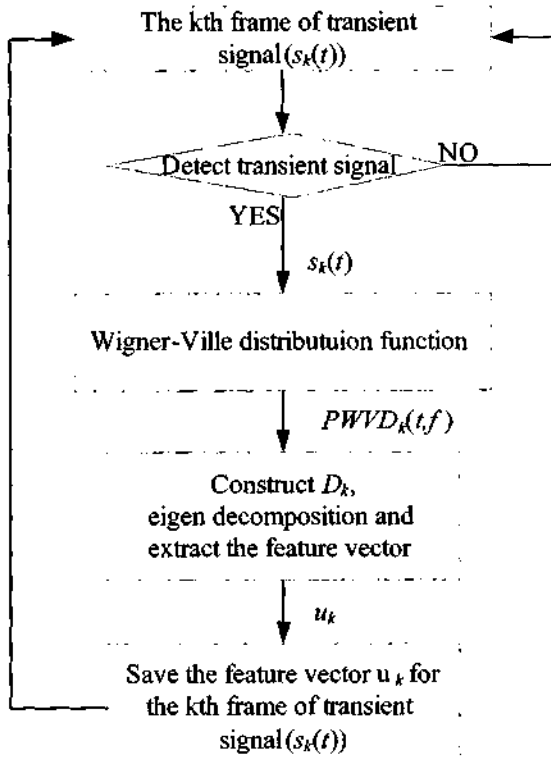


그림 2. 특징 벡터 추출 흐름도
Fig. 2. Flowchart of feature vector extraction.

1. 모든 기준 신호에 대하여 프레임 사상도 $Mark_i$ 를 0으로 초기화한다. 여기서 $Mark_i$ 는 i 번째 기준 신호에 대한 프레임 사상도를 나타낸다.
2. 현재 프레임이 천이 신호의 마지막 프레임이면 단계 5로 이동하고, 그렇지 않으면 단계 3로 이동한다.
3. 입력 프레임의 특징 벡터 v_i 를 추출하여 모든 i, j 에 대하여 $u_{i,j}$ 와의 상관값 $C_{i,j}$ 를 계산한다. 여기서 $u_{i,j}$ 는 i 번째 기준 신호의 j 번째 프레임의 특징 벡터를 나타낸다.

4. 가장 큰 상관값 $\max(C_{i,j})$ 를 선택하여 특정 문턱준위보다 크다면 $Mark_i$ 를 1 증가시키고, 단계 2로 이동한다.
5. 모든 i 에 대하여 $Mark_i$ 에서 가장 큰 값의 위치 p 를 찾고, 탐지된 천이 신호를 데이터베이스의 p 번째 기준 신호로 식별한다.

IV. 실험 결과 및 고찰

본 논문에서 제안한 알고리즘을 실험하기 위하여, 데이터베이스는 실험에 사용한 표 1의 수중 천이 신호 중에서 5개의 수중 천이 신호로 구성하였다. 표 1은 실험에 사용한 수중 천이 신호의 종류를 나타내며, 그림 4는 각 신호의 파형을 나타낸다. 샘플링 주파수는 8kHz, 양자화 레벨은 16비트이고 배경 잡음은 부가 백색 가우시안 잡음(AWGN)을 적용하였다. 천이 신호의 탐지를 위해서 실험적으로 결정한 T_{SD} 는 1.1이고, 프레임 크기는 512 샘플 수 (64ms), 의사 위그너-빌 분포 함수는 32-point FFT를 적용하였다. 따라서 각각의 프레임에

표 1. 수중 천이 신호
Table 1. Data classes.

클래스	음원 종류
클래스 1_1	참고래1
클래스 1_2	참고래2
클래스 1_3	참고래3
클래스 2	귀신고래
클래스 3	혹등고래
클래스 4	잠수함 해치 스킵
클래스 5_1	토피도 발사관1
클래스 5_2	토피도 발사관2
클래스 5_3	토피도 발사관3

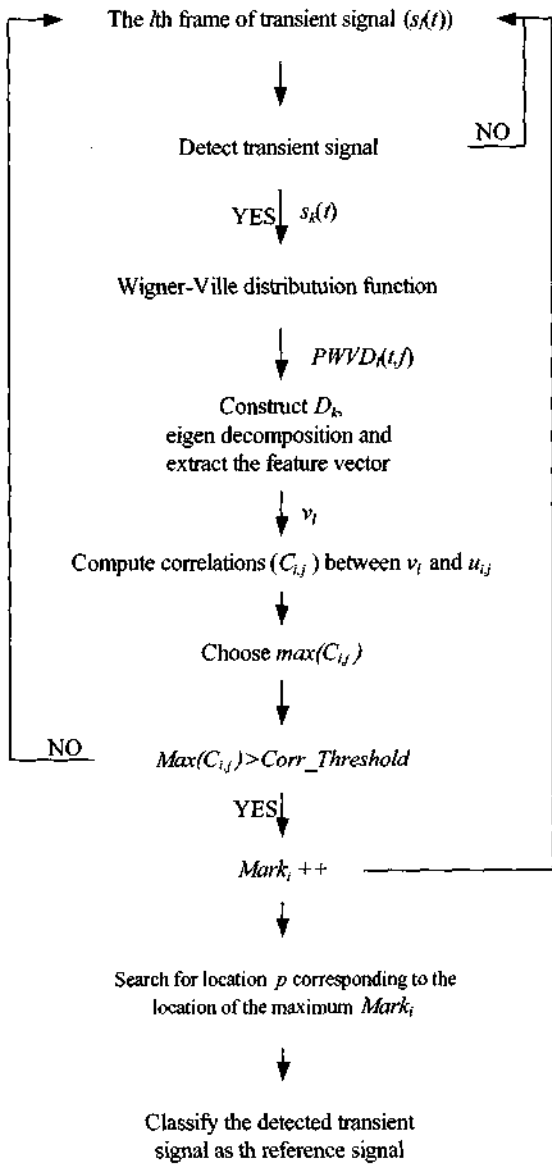


그림 3. 제안한 수중 천이 신호 식별 과정의 흐름도
Fig. 3. Flowchart of the proposed underwater transient signal classification.

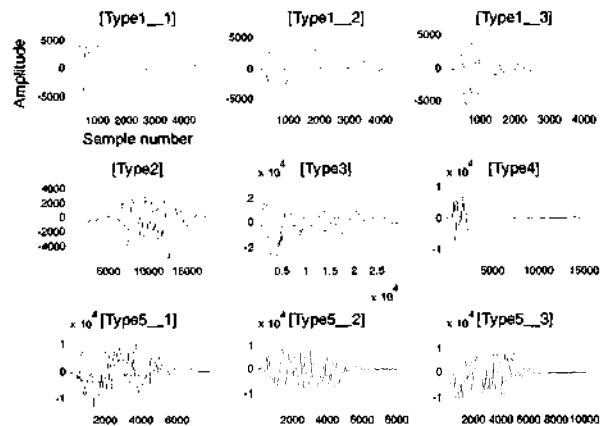


그림 4. 실험에 사용된 수중 천이 신호의 파형
Fig. 4. Waveforms of underwater transient signal used in this paper.

표 2. 제안한 식별 알고리즘의 실험 결과 (프레임 사상 수 / 탐지된 총 프레임 수)

Table 2. Classification Result of the proposed method (number of frames mapped into a specific class / the detected total number of frames).

신호 \ 클래스 입력	클래스1_1	클래스2	클래스3	클래스4	클래스5_1
클래스1_1 + AWGN(5dB)	8/8	0/8	0/8	0/8	0/8
클래스1_2 + AWGN(5dB)	7/8	0/8	0/8	0/8	1/8
클래스1_3 + AWGN(5dB)	7/7	0/7	0/7	0/7	0/7
클래스2 + AWGN(5dB)	0/18	18/18	0/18	0/18	0/18
클래스3 + AWGN(5dB)	0/51	0/51	51/51	0/51	0/51
클래스4 + AWGN(5dB)	0/11	0/11	0/11	11/11	0/11
클래스5_1 + AWGN(5dB)	0/11	0/11	0/11	0/11	11/11
클래스5_2 + AWGN(5dB)	1/10	0/10	0/10	0/10	9/10
클래스5_3 + AWGN(5dB)	1/11	2/11	1/11	0/11	7/11

대하여 의사 위그너-빌 분포에 의해 32×512 의 시간-주파수 데이터가 구해지고, 고유치 분해에 의해 32×1 특징 벡터가 생성된다. 입력 프레임에 특정 기준 신호로 사상시키기 위하여 적용되는 가장 큰 상관값의 문턱치 준위는 0.7로써, 이 값은 실험적으로 결정된 것으로 환경에 따라 결정되는 요소이다.

그림 5는 5dB의 귀신고래 신호의 파형과 수중 천이 소음 탐지에 사용된 SD의 궤적 및 탐지된 프레임을 보여 주고, 그림 6은 토피도 발사관1에 대한 탐지 결과를 보인 것이다. 그림 5와 6에서, 수중 천이 신호 탐지 알고리즘의 성능이 우수함을 확인할 수 있다. 또한 각각 다른 종류의 수중 천이 신호와 신호대잡음비 잡음 환경에서도

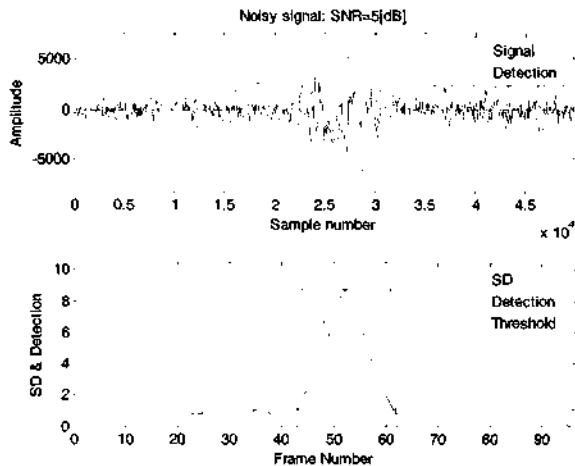


그림 5. 귀신고래 + AWGN(5dB) 신호의 파형과 탐지 결과
Fig. 5. Noisy signal of a gray whale sound with 5dB AWGN and detection result.

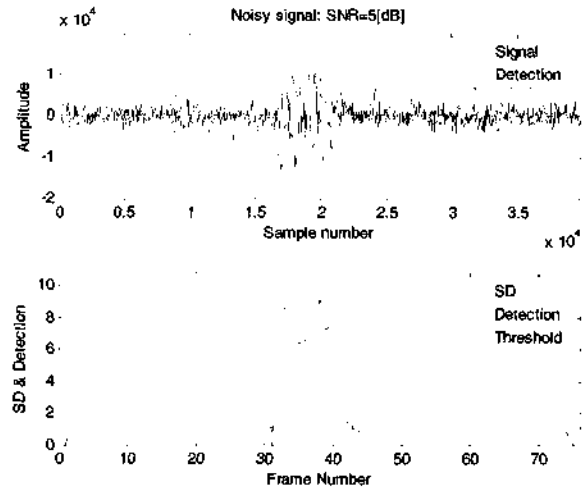


그림 6. 토피도 발사관1 + AWGN(5dB) 신호의 파형과 탐지 결과
Fig. 6. Noisy signal of a torpedo fire tube1 sound with 5dB AWGN and detection result.

수중 천이 신호 탐지 알고리즘이 잘 동작함을 확인할 수 있었다.

표 2는 제안한 알고리즘의 수중 천이 신호 식별 결과를 보인 것이다. 입력 신호에서 탐지된 천이 신호 구간의 전체 프레임 수에 대해 데이터베이스의 특정 기준 신호로 사상된 프레임 수를 나타낸 것으로, 예를 들어 5dB의 AWGN이 첨가된 클래스 1_3 신호가 입력되면 총 7 프레임이 탐지되고 7 프레임 모두 데이터베이스의 클래스 1로 사상되므로 클래스 1로 식별이 된다. 따라서 표 2를 통하여 본 논문에서 제안한 수중 천이 신호 식별 알고리즘에 의해 입력 신호들이 잘 식별됨을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 수중 천이 신호 식별 알고리즘을 제안하였다. 수중 천이 신호는 에너지 변화와 스펙트럴 변이를 이용하여 프레임 단위로 탐지되고, 탐지된 수중 천이 신호의 특징 벡터는 의사 위그너-빌 분포 함수를 기반으로 고유치 분해를 이용하여 추출된다. 탐지된 천이 신호의 특징 벡터와 기준 신호들의 특징 벡터 사이에서 상관값을 프레임 단위로 계산하여, 프레임 사상도를 구함으로써 천이 신호를 식별한다. 실험을 통하여 제안한 수중 천이 신호 식별 알고리즘이 입력된 수중 천이 신호들을 잘 식별하고, 자동 수중 천이 신호 식별 시스템에 적용 가능함을 확인하였다.

그리고, 앞으로 해양에서 실제로 측정된 수중 천이 신호를 대상으로 제안한 식별 알고리즘의 성능을 분석하고 향상 시킬 수 있는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고 문헌

1. Dragana Carevic, "Adaptive window-length detection of underwater transients using wavelets," J. Acoust. Soc. Am., 117 (5) pp. 2904~2913, May 2005.
2. Simon Tucker, and Guy J. Brown, "Classification of transient sonar sounds using perceptually motivated features," IEEE J. Ocean Engineering, 30 (3) pp. 588~600, Jul. 2005.
3. Stefanos K. Goumas, Michael E. Zervakis, and G. S. Stavrakakis, "Classification of washing machines vibration signals using discrete wavelet analysis for feature extraction," IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 51 (3) pp. 497~508, Jun. 2002.
4. N. Yen, "Time and frequency representation of acoustic signals by means of the Wigner distribution function : Implementation and interpretation," J. Acoust. Soc. Am., 81 (6) pp 1841~1850, Jun. 1987.
5. Boualem Boashash, and Peter O'Shea, "A methodology for detection and classification of some underwater acoustic signals using time-frequency analysis techniques," IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing, 38 (11) pp. 1829~1841, Nov. 1990.
6. 박연규, 김양찬, "위그나-벨 분포함수에서의 혼신성분 저감 방법: 최전 참문함수," 한국소음진동공학회지, 제 7권, 제 2호, pp. 319~329, 1997.
7. Leon Cohen, "Time - frequency Distributions - A Review," Proc. of the IEEE, 77 (7) pp 941~981, Jul. 1989.
8. Fu-Sheng Lu, Cheng-Xu and Pai-Ling Lin, "An improved wigner distribution based algorithm for signal identification," Underwater Technology, 2004. UT'04. 2004 International Symposium on 2004, pp. 39~45, Apr. 2004.

• 배 전 성 (Keun-Sung Bae)



1977년: 서울대학교 전자공학과 졸업
 1979년: 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사
 1989년: University of Florida 공학 박사
 1979년~현재: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수

• 황 찬 식 (Chan-Sik Hwang)



1977년: 사강대학교 전자공학과 졸업
 1979년: 한국과학기술원 전자공학과 석사
 1996년: 동대학원 전자공학과 박사
 1979년~현재: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 교수

• 이 형 욱 (Hyeong-Uk Lee)



1986년: 경북대학교 전자공학과 졸업
 1989년: 동대학원 전자공학과 석사
 2000년~2005년: 동대학원 전자공학과 박사
 1989년~현재: 국방과학연구소 수중 탐지체계부 책임연구원

저자 약력

• 임 태 균 (Tae-Gyun Lim)



1994년~2001년: 경북대학교 전자공학과
 2001년~2003년: 동대학원 전자공학과 석사과정
 2003년~현재: 동대학원 전자공학과 박사과정