

자기상관과 필터뱅크 방식을 적용한 광대역 프로펠러 소음 추정 기법 연구

임준석*, 홍우영*, 편용국^o

Hidden Period Estimation in the Broad Band Propeller Noise Using Auto-Correlation and Filter-Bank Structure

Jun-Seok Lim*, Woo-Young Hong*, Yong-Guk Pyeon^o

요약

배의 방사 소음을 이용하여 배를 탐지하는 데는 협대역 톤을 추정하는 방법과 광대역 신호에 내포된 주기성 신호를 추정하는 방법이 있다. 그 중에서 광대역 신호에 내포된 주기성 신호를 추정하는 방법을 데몬 신호 처리법이라고 한다. 본 논문에서는 데몬 처리를 위해서 자기 상관기를 적용한 필터 뱅크를 기법을 제안한다. 그리고 합성된 신호와 실제 신호를 바탕으로 기존 방법들과 비교하여 기본 주파수 신호를 우수하게 추정할 뿐만 아니라 여러 고차 하모닉 성분들도 잘 추정하여 기본 주파수 추정의 신뢰성도 높일 수 있음을 보인다.

Key Words : Sonar Signal Processing, DEMON, Filter Bank

ABSTRACT

Narrow band signal estimation and broad band signal estimation can be used to detect the ship-radiated noise. The broad band signal estimation method to detect the ship-radiated noise is called DEMON (Detection of Envelop Modulation On Noise). This paper proposes a new DEMON algorithm using filter bank and autocorrelation. We show the proposed algorithm estimates the hidden period in the wide band signal better than the conventional DEMON algorithm and the recently proposed filter-bank based DEMON algorithm.

I. 서론

최근 국내에서도 많은 연구자들에 의해서 수중 소나 관련 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁻⁵. 소나 시스템에서의 주요 관심사들 중 하나는 다른 배의 존재를 미리 파악하는 것이다. 이런 목적을 위해 여러 배로부터 나오는 소음을 탐지하는 수동 소나 기술이 개발되어 왔다. 이런 탐지 기술은 함에서 나오는 신호가 잡

음에 묻히는 경우에 크게 성능 저하가 된다. 이런 경우는 해상 잡음이 심할 때나 목표물이 소나로부터 멀리 있는 경우에 자주 발생한다. 데몬처리법(Detection of Envelope Modulation On Noise (DEMON))은 많은 수동 소나 시스템에서 프로펠러 추진기를 탐지하기 위해 주로 사용하는 기술이다. 그러나 이 방법은 상당 부분이 경험적인 것을 바탕으로 하고 있어 기술 문헌으로 접할 수 있는 사항이 제한적이지만, Nielson

* 본 논문은 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되었습니다. (UD130015DD)

• First Author : Sejong University Department of Electronic Engineering, jslim@sejong.ac.kr, 종신회원

o Corresponding Author : Gangwon Provincial University Department of Information and Communication, pyk12@naver.com, 정희원

* Sejong University Department of Defense System Engineering, wyhong@sejong.ac.kr, 정희원

논문번호 : KICS2014-05-187, Received May 19, 2014; Revised July 19, 2014; Accepted August 8, 2014

에 의해 체계적으로 정리된 후 다양한 연구가 진행되고 있다⁶⁾. Kummert는 데몬 처리를 통해 추출된 주파수를 퍼지(fuzzy) 기술을 도입하여 식별하는 연구를 수행하였고⁷⁾, Sichun과 Desen은 3/2-D 스펙트럼(spectrum)을 이용하여 데몬 처리 기법의 성능을 향상시키는 방법을 제안하였다⁸⁾. 그리고 Badri와 Amindavar는 Nivanlinna-pick 보간법(inter- ploation)을 이용하여 다중 경로(multipath) 환경에서 프로펠러의 회전 수, 날개 수 등을 분석하는 기법을 제안하였다⁹⁾. 그 외 EMD와 cyclostationary를 사용한 기법도 소개되었다^{10,11)}. 참고문헌[12]에서는 대역 분할 처리를 통해 데몬 처리 기법의 성능을 향상시킬 수 있는 기법을 제안하였다.

본 논문은 참고문헌[12]과 같은 대역 분할 처리에 기반을 두고 자기 상관 신호를 입력 신호로 사용하게 함으로써 데몬 처리 성능의 향상을 기대할 수 있는 기법을 제안한다.

II. 데몬 신호의 모델

일반적으로 데몬 처리의 대상이 되는 수중 프로펠러 소음 신호는 프로펠러가 회전하면서 생기는 공기 방울이 터지는 광대역 소음이 다시 프로펠러의 회전에 의해서 영향을 받아 생성되는 것으로 여기고 있다. 이를 수학적으로 모델링하면 프로펠러의 회전으로 발생하는 주기성 신호와 광대역공기방울 소음 신호와의 곱으로 모델되며, 그 식은 (1)과 같이 표현된다⁷⁾.

$$x(n) = \left[1 + m \cos \left(\frac{2\pi f_m n}{f_s} + \theta \right) \right] s(n) + w(n), n = 1, \dots, N, \quad (1)$$

여기서, N은 수신된 음향 신호 샘플 개수이고 m은 하모닉 성분의 크기, f_m 은 하모닉 성분의 주파수, f_s 는 샘플링주파수이다. $s(n)$ 은 광대역캐비테이션 소음 신호이다. $w(n)$ 은 광대역주변소음이며 $s(n)$ 과 $w(n)$ 은 통계적으로 서로 독립인 특성을 가진다. 이 모델을 보면 마치 진폭 변조와 유사한 형태를 가지고 있어서 m을 변조 지수라고 하고 f_m 을 변조 주파수라고 부르기도 한다. 일반적으로 변조 지수 m은 0.1~0.5의 값을 가지며, 변조 주파수 f_m 은 10 Hz ~ 100 Hz의 값을 가진다. 광대역캐비테이션 소음 신호 $s(n)$ 과 광대역 소음 $w(n)$ 의 주파수 대역 폭(bandwidth)은 수 kHz 이상이며, 따라서 샘플링 주파수 f_s 도 수 kHz

이상의 값을 가진다¹²⁾.

III. 기존의 DEMON처리 방법

3.1 전통적인 데몬 신호 처리법

데몬 처리는 프로펠러로 추진되는 배를 찾는 기술들 중 하나로 인식되고 있다. 전통적으로 사용되는 데몬 처리 방법은 수신 신호를 대역 통과 필터에 통과시킨 후 마치 진폭 변조된 신호를 복조하듯이 대역 통과된 신호의 포락선을 추출한다. 그리고 그 결과를 FFT를 사용하여 주파수 성분 분석을 한다. 그림 1에는 위 과정을 도식하였다. 이 같은 전통적인 방법 외에 서론에 언급한 여러가지 개선된 데몬 처리법들이 연구되어 왔다. 그 중에 본 논문에서 관심을 갖는 필터 뱅크를 사용한 데몬 신호 처리법도 있다.

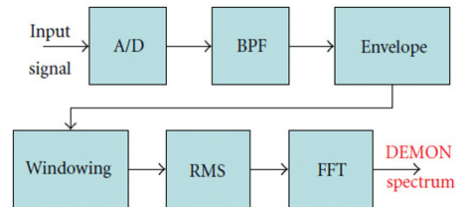


그림 1. 전통적인 데몬 처리법
Fig. 1. DEMON traditional treatment

3.2 대역통과 필터 뱅크를 사용하는 데몬 신호 처리법

II장에서 설명한 바와 같이 데몬 신호 처리 대상이 되는 프로펠러 소음 신호는 날개의 회전에 발생하는 협대역피변조 신호를 광대역공기방울 소음 신호가 캐리어(carrier)의 역할을 수행하여 발생한다. 이는 매우 넓은 주파수 범위에 캐리어가 존재함을 의미한다. 그리고 그림 1에서와 같이 일부 주파수 밴드를 선택하여 데몬 처리를 하는 전통적인 방식을 볼 때, 캐리어의 전체 대역 중 일부 대역 성분만으로도 데몬 신호

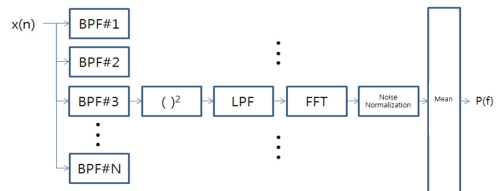


그림 2. 참고문헌 [12]의 신호처리 다이어그램
Fig. 2. Reference [12] diagram of the signal processing

처리를 할 수 있음을 의미한다. 따라서 사용하지 않은 다른 대역 신호를 이용해서도 데몬 신호 처리를 할 수 있음을 의미한다. 이런 생각에 근거하여 참고문헌[12]에서는 그림과 같은 대역 분할에 의한 데몬 성능 향상 기법을 제안하였다.

IV. 광의의 정재성 불규칙 신호의 자기 상관 함수의 성질

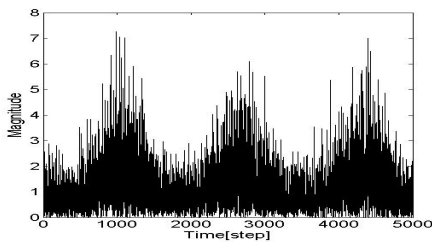
실수인 불규칙 신호를 고려할 때, 이런 신호의 자기 상관 함수는 시간 간격의 함수이다. 이 관계를 다시 정의 하면 다음 식과 같다.

$$R_X(\tau) = E\{X(t+\tau)X(t)\} \quad (5)$$

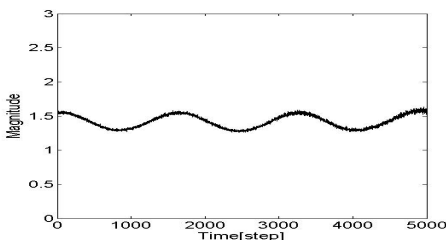
위의 자기 상관 함수는 다음과 같은 성질도 가지고 있다. 불규칙 신호가 주기성 신호라면, 자기 상관함수도 같은 주기를 갖는 주기 신호가 된다.

$$R_X(\tau + T_p) = R_X(\tau) \quad (6)$$

이 때 만약 주기성 불규칙 신호에 비주기인 잡음이



(a)



(b)

그림 3. 데몬 대상 신호에 자기 상관 적용 전과 적용 후 비교 (a) 자기 상관 적용 전 (b) 자기 상관 적용 후
Fig. 3. DEMON on the target signal after application before applying the auto-correlation comparison (a) Before applying the auto-correlation (b) After applying the auto-correlation

섞인 경우 자기 상관의 결과에는 비주기 잡음의 영향이 줄고 주기성 성질이 두드러지는 효과를 기대할 수 있다. 예로 식 (1)에서 주파수는 5Hz이고 신호대 잡음비가 3dB가 되도록 부가 잡음을 섞은 신호에 대해서 자기 상관을 작용했을 때와 안했을 때를 비교한다. 다음 그림(a)는 자기 상관기 적용 전의 원신호이고 이 신호를 자기 상관기를 통한 후 신호는 그림(b)와 같다. 두 그림을 보면 자기상관 처리를 거치면서 신호의 주기성이 확연히 드러나는 것을 확인할 수 있다.

V. 자기 상관을 적용한 필터뱅크 DEMON 방법

본 논문에서는 IV장에서 설명한 주기성을 갖는 불규칙 신호에 자기 상관을 적용하였을 경우 주기성을 유지하고 부가 잡음의 영향을 줄이는 성질을 3장2절에서 예로 든 필터 뱅크 기법 데몬 처리에도 적용하여 데몬 처리 성능 향상을 한다. 자기 상관을 도입하는 부분은 각 필터 뱅크의 포락선 신호가 추출된 후에 적용하여 포락선이 갖는 주기성을 부각시킨다. 자기 상관을 적용한 필터 뱅크 DEMON은 다음 그림과 같다.

위 그림에서 N:1은 N:1 데시메이션이고, Auto-Correlation은 자기 상관을 하는 부분이다. 그림 4에서는 포락선 검출을 위해서 N:1 데시메이션부에 포함된 저역통과 필터와 절대 값 성분 추출기를 이용하였다.

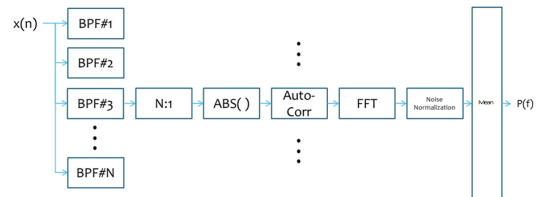


그림 4. 제안된 데몬 처리 기법

Fig. 4. The proposed technique DEMON process

VI. 실험 결과

6.1 모의 신호를 사용한 비교 실험

제안된 데몬 처리 방법의 성능을 알아보기 위해서 그림1과 같은 전통적인 처리방법을 사용하여 데몬 신호 처리 하는 경우 및 참고문헌[12]에서 제안된 필터 뱅크 방법으로 데몬 처리를 하는 경우와 함께 제안된 방법으로 처리한 결과를 서로 비교한다.

본 비교 실험에서 사용할 신호를 만들기 위해서 식 (1)의 신호 모델을 사용하였다. 본 실험에서는 5Hz와

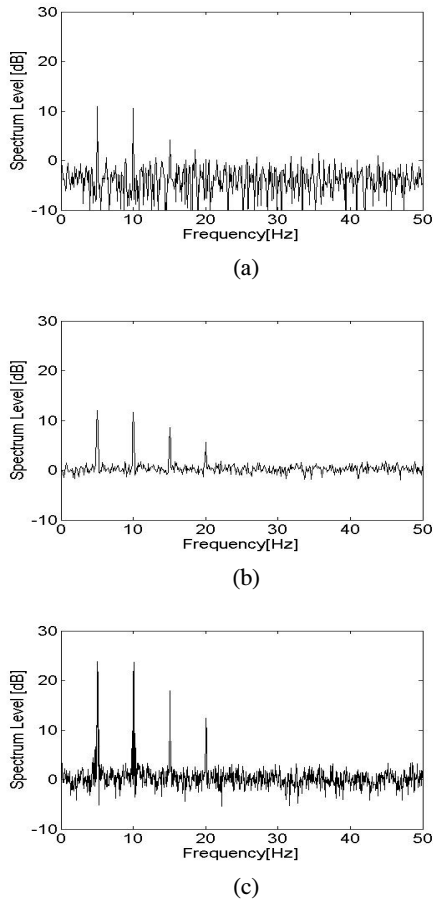


그림 5. 합성된 신호를 대상으로 한 데몬 처리 결과 비교 (a) 전통적인 방법에 의한 데몬 결과, (b) 참고문헌 12에 의한 데몬 결과, (c) 제안된 방법에 의한 데몬 결과.
 Fig. 5. The synthesized signal to a DEMON process result of comparison target.. (a) DEMON results by traditional methods (b) DEMON results by the reference 12 (c) DEMON results by the proposed method.

10Hz의 주파수를 갖고, 크기는 각각 1씩인 두 신호가 백색잡음에 의해서 곱해지는 경우로 가정하여 신호를 합성하였다. 샘플링 주파수는 8000Hz로 하고 5초분의 신호를 합성하였다. 그리고 신호대 잡음비가 3dB가 되도록 부가 잡음을 더하였다.

위 신호를 위에서 언급한 세가지 방법에 각각 적용하여 그 결과를 그림 5에 도시하였다. 이 그림에서 보면 그림 5의 (c)에서 보는 것처럼 제안한 방법이 가장 좋은 결과를 보였다. 따라서 앞서 자기 상관기를 도입할 때 기대 했듯이 부가 잡음의 영향을 줄이고 주기성을 부각시키고 있음을 확인할 수 있다.

6.2 측정 신호를 통한 비교 실험

비교실험을 위해서 www.dosits.org에 게시된 상선

신호 데이터를 6장 1절에 모의 신호와 같은 8kHz로 리샘플링 한 후 2초 분량의 측정 신호에 대해서 전통적인 처리방법 및 기존의 필터 뱅크 방법과 제안된 방법을 각각 적용하여 그 결과를 그림 6에 서로 비교하였다. 그림 6의 결과로부터 비교한 결과, 앞서 합성 신호를 대상으로 실험하였을 때와 같이 새로 제안한 방법이 각 주파수에서의 추정된 피크가 더 뚜렷한 것을 관찰 할 수 있다. 그림 6(a)에 있는 전통적인 방법의 경우 피크가 잘 나타나지 않아서 신호 내부에 존재하는 주기성 신호를 알아낼 수 없지만, 그림 6(b)에 있는 필터 뱅크를 사용했을 경우는 피크가 좀 더 향상된 결과를 얻을 수 있어서 약 3~4개 정도의 피크가 1dB~3dB 사이의 크기 값을 갖도록 추정되었다. 그리

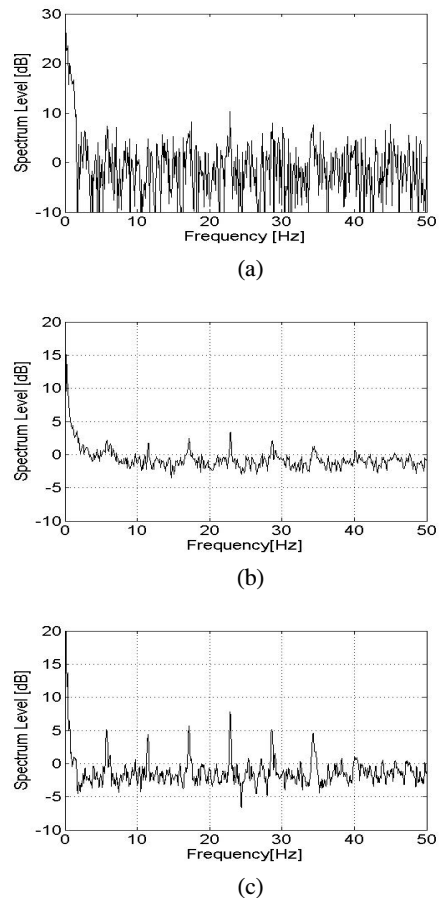


그림 6. 실측된 데이터를 사용한 데몬 처리 결과 비교 (a) 전통적인 방법에 의한 데몬 결과, (b) 참고문헌 12에 의한 데몬 결과, (c) 제안된 방법에 의한 데몬 결과.
 Fig. 6. Daemon process using actual data comparing the results (a) DEMON results by traditional methods (b) DEMON results by the reference 12 (c) DEMON results by the proposed method.

고 그림6(c)에 있는 제안된 방법을 적용했을 경우는 셋 중에서 가장 우수한 추정 결과를 나타내어서, 모두 6개의 뚜렷한 피크를 추정해 내었고, 그 피크의 크기도 약 5dB~8dB정도의 분포를 나타내고 있다. 데몬 처리의 경우 내포된 주기성분은 첫 번째 피크의 주파수 위치로써 추정할 수도 있지만, 신뢰성 높은 추정을 위해서 여러 피크간의 간격을 주로 사용한다. 이런 면에서 제안한 방법이 더 신뢰성 있는 결과를 줄 가능성이 있음을 알 수 있다.

그림 6의 결과를 서로 비교함으로써 새로 제안한 데몬 처리법이 데몬 처리 결과를 향상 시킬 수 있음을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

VII. 결 론

본 논문은 프로펠러 추진 함선을 탐지하기 위해 사용하는 방법 중 하나인 데몬 신호 처리를 위한 방법을 제안하였다. 새 방법은 프로펠러 잡음이 그 잡음과 상관관계가 없는 부가 잡음에 오염되어 있을 때, 수신 신호의 자기 상관과 필터 뱅크 기법을 함께 사용하는 방법이다. 이 방법을 시험용 신호와 측정 신호를 가지고 평가했을 때 기존 DEMON방법에 비해 향상된 결과를 낳았다.

References

[1] J. Cho, S. Lee, J. Shin, T.-J. Lee, and H.-S. Cho, "Underwater experiment on CSMA/CA protocol using commercial modems," *J. KICS*, vol. 39c, no. 6, pp. 457-465, Jul. 2014.

[2] D. Lee, S. Lee, and S.-J. Park, "DSP-Based Micro-Modem for Underwater Acoustic Communications," *J. KICS*, vol. 39c, no. 3, pp. 275-281, Mar. 2014.

[3] B.-M. Seo, K. Son, and H.-S. Cho, "Performance evaluation of underwater code division multiple access scheme on forward-link through water-tank and lake experiment," *J. KICS*, vol. 39c, no. 2, pp. 199-208, Feb. 2014.

[4] Y.-C. Jung, B.-U. Kim, S.-K. An, W.-J. Seong, K.-H. Lee, and J.-Y. Hahn, "An algorithm for submarine passive sonar simulator," *J. Acoustical Soc. Korea*, vol. 32, no. 6, pp. 472-483, Nov. 2013.

[5] C. Seo, J. Park, K.-C. Park, and J. R. Yoon, "Performance of COFDM in underwater acoustic channel with frequency selective fading," *J. Acoustical Soc. Korea*, vol. 32, no. 5, pp. 377-384, Sept. 2013.

[6] R. O. Nielsen, *Sonar Signal Processing*, Artech House, 1990.

[7] A. Kummert, "Fuzzy technology implemented in sonar systems," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 18, no. 4, pp. 483-490, Oct. 1993.

[8] L. Sichum and Y. Desen, "DEMON feature extraction of acoustic vector signal based on 3/2-D spectrum," *2nd IEEE Conf. Industrial Electron. Appl. (ICIEA'07)*, pp. 2239-2243, Melbourne, Australia, May 2007.

[9] S. Badri and H. Amindavar, "Estimation of propeller shaft rate in multipath environment using nevanlinna-pick interpolation," *9th Int. Symp. Signal Processing and Its Appl. (ISSPA'07)*, pp. 1-4, Sharjah, U.A.E, Feb. 2007.

[10] J. Lim and W. Hong, "A study on the hidden period estimation in the propeller radiation using EMD and auto-correlation," in *KSCSP 2013*, vol. 30, no. 1, pp. 57-60, Seoul, Korea, Aug. 2013.

[11] J. Lim and W. Hong, "A study on the hidden period estimation in the propeller radiation using cyclostationary spectral estimation and auto-correlation," in *KSCSP 2013*, vol. 30, no. 1, pp. 61-64, Seoul, Korea, Aug. 2013.

[12] M. J. Cheong, S. B. Hwang, S. W. Lee, and J. S. Kim, "Multiband enhancement for DEMON processing algorithms," *J. Acoustical Soc. Korea*, vol. 32, no. 2, pp. 138-146, Mar. 2013.

임 준 석 (Jun-Seok Lim)



1986년 2월 : 서울대학교 전자
공학과 학사 졸업
1988년 2월 : 서울대학교 전자
공학과 석사 졸업
1996년 8월 : 서울대학교 전자
공학과 박사 졸업
1996년 7월~1997년 10월 : LG
종합기술원

1998년 3월~현재 : 세종대학교 전자공학과 교수
<관심분야> 신호처리

편 용 국 (Yong-Guk Pyeon)



1993년 2월 : 강원대학교 전자공
학과 학사 졸업
1996년 2월 : 관동대학교 전자공
학과 석사 졸업
2004년 2월 : 세종대학교 전자공
학과 박사 졸업
2004년 3월~현재 : 강원도립대학

정보통신과 조교수
<관심 분야> 신호 처리

홍 우 용 (Woo-Young Hong)



1978년 2월 : 해군사관학교 전
자공학과 학사 졸업
1985년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 석사 졸업
1991년 10월 : Univ. of Minnesota
전기공학과 박사 졸업
1985년 3월~2013년 2월 해군
사관학교 교수

2013년 3월~현재 : 세종대학교 국방시스템공학과 교수
<관심분야> 신호처리