

개선한 RMXMS 알고리즘을 이용한 해파 신호 처리

이 석필 김 운호 윤 형식 박 상희
연세대학교 공과대학 전기공학과

Seaway Signal Processing using Modified RMXMS algorithm

Seok-Pil Lee Youn-Ho Kim Hyoung-Sig Youn Sang-Hui Park
Dept. of Electrical Engineering, Yonsei Univ.

ABSTRACT

In this paper, for tracking and filtering seaway information which act as a control disturbance the adaptive notch filter which removes disturbance with fast convergence and stability without changing the value of gain parameter μ when statistical property of input signal varies rapidly is designed by improving conventional RMXMS(Recursive Maximum Mean Square) algorithm. Besides, in consideration of measurement noise of sensors in underwater vehicle, the system which removes the noise and the disturbance is suggested.

1. 서 론

해파는 자유표면에서의 수중 비행체의 자동 심도 제어 시스템의 성능을 저하시키는 요소중의 하나인 비정상 신호(nonstationary signal)이다. 이는 레일레이(Rayleigh) 분포를 한 스펙트럼을 가지며 심도 제어 시스템에 두가지 형태의 스토캐스틱 외란(Stochastic Disturbance)으로 작용한다. 그중 한가지 형태의 외란은 비교적 좁은 주파수 영역을 가지며 PSD(Power Spectrum Density)가 큰 1차계 해파력이며 나머지 하나는 비교적 적은 주파수 영역을 가지는 2차계 해파력이다. [1][2] 자유표면에서의 수중비행체는 이 두가지 해파력을 고려하지 않을 수 없으며 특히 1차계 해파력의 경우는 수중 비행체 구동부(Actuator)의 크기가 제한된 관계로 이 정보가 제어 시스템에 귀환되더라도 선수 및 선미타에 의해 발생하는 보상제어력(Compensating Control Force) 보다 크기때문에 성능을 개선시킬 수 없다. 오히려 심도 센서를 오염시켜 정보의 정확도를 떨어뜨리므로 1차계 해파 정보를 제거하여야 한다. [3]

그러므로 통계적 특성이 변하는 1차계 해파력을 제거하기 위해 회귀 중심 주파수 적응 필터(Recursive Center Frequency Adaptive Filter)를 이용하여 기존의 RMXMS 알고리즘을 개선하여 1차계 해파력과 측정 잡음을 동시에 빠르게 제거하는 적응 노치 필터를 설계하고자 한다.

2 해파 외란 모델

해파를 발생시키기 위하여 ITTC가 공인한 해파 스펙트럼을 사용하여 정량화 하였다. [4]

$$S(\omega_w) = \frac{A}{\omega_w^5} \exp(-B/\omega_w^4) \quad (2.1)$$

여기서

$$A : 8.1 \times 10^{-3} \times g^2 = 8.385 [ft^2/sec]$$

$$B : 33.56/(H/1/3)^2$$

ω_w : 순환 주파수(Circular Frequency)

g : 중력 가속도

$H/1/3$: 파고

해파 스펙트럼은 함속도, 해상 상태 및 침로각에 따라 변하는데 이를 조우 주파수라 하며 식(2.2)와 같이 정의된다.

$$\omega_e = \omega_w - (\omega_w^2/g)V \cos\beta \quad (2.2)$$

여기서

V : 함속도

β : 침로각

조우 주파수가 식 (2.2)와 같이 변하므로 이에 따른 파워 스펙트럼을 아래와 같이 보정하여야 한다.

$$S(\omega_e) = S(\omega_w)/[1 - (4\omega_e V/g)\cos\beta]^{1/2} \quad (2.3.a)$$

$$S(\omega_e) = S(\omega_w)/[1 - (2\omega_w V/g)\cos\beta] \quad (2.3.b)$$

보정된 파워 스펙트럼의 시간영역 발생은 모간의 방식을 따랐다.

$$Y_e(t) = \sum_{i=1}^n Y_{e0} \sin(\omega_e(i)t + \theta(i)) \quad (2.4)$$

여기서

$$Y_{e0} : 2.0 \times s(\omega_e) \times d\omega_e$$

이렇게하여 발생된 해파는 레일레이(Rayleigh) 분포를 한 스펙트럼을 가지며 2가지 성분으로 나눌 수 있다. 그중 한가지 성분은 비교적 좁은 주파수 영역을 가지며 PSD(Power Spectrum Density)가 큰 1차계 해파력이며 나머지 하나는

비교적 적은 주파수 영역을 가지는 2차계 해파력이다. 그리고 해파는 해상상태 및 운동체의 속도에 따라 그 통계적 특성이 변한다. 발생된 해파의 스펙트럼은 그림 2.1과 같다.

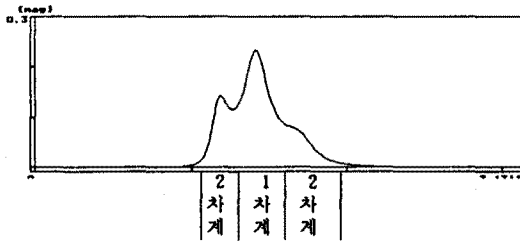


그림 2.1 1차계와 2차계 해파력

3 개선한 RMXMS 알고리즘

일반적인 적응 필터 알고리즘을 사용하여 본 목적에 이용할 때에는 실시간(Real Time)을 요하는 시스템에서 여러 단계를 거쳐서 필터의 계수를 결정하므로 부적합하다. 또한 스펙트럼 추정시 정상 상태에서 오차가 클 수도 있다. 이러한 이유로 해서 본 연구에서는 RMXMS(Recursive Maximum Mean Square) 알고리즘을 개선하여 빠른 수렴성과 계산상의 단순성으로 실시간 처리에 적합한 적응 노치 필터를 설계하였다.

먼저 필터의 중심 주파수에 따라 변하는 변수(W)를 포함하는 4차의 Butterworth IIR 대역 통과 필터를 설정한다. 전달 함수는 식 (3.1)과 같으며,

$$H(z) = \frac{a_0 + a_2 z^{-2} + a_4 z^{-4}}{1 + b_1 W z^{-1} + (b_2 W^2 + b'_2) z^{-2} + b_3 W z^{-3} + b_4 z^{-4}} \quad (3.1)$$

여기서, $a_0 = 1/(k^2 + 2^{1/2}k + 1)$, $a_2 = -2a_0$, $a_4 = a_0$
 $b_1 = -2k(2k + 2^{1/2})a_0$, $b_2 = 4k^2 a_0$
 $b'_2 = 2(k^2 - 1)a_0$, $b_3 = 2k(-2k + 2^{1/2})a_0$
 $b_4 = (k^2 - 2^{1/2}k + 1)a_0$
 $k = \cot[\pi(f_2 - f_1)T] = \cot(\pi BT)$

$$W = \cos[\pi(f_2 + f_1)T] / \cos[\pi(f_2 - f_1)T] \quad (3.2)$$

그리고, f_1 : lower cutoff frequency

f_2 : upper cutoff frequency

T : sampling time, B : bandwidth of the filter

식 (3.1)의 전달 함수에서 중심 주파수에 관계되는 변수는 W뿐이다. 식 (3.2)에서 중심 주파수를 구할 수 있는 식 (3.3)이 유도된다.

$$f_c = \cos^{-1}[W \cos(\pi BT)] / 2T \quad (3.3)$$

여기서, f_c : 중심 주파수

이 필터의 성능 함수(Performance Function)는 식 (3.4)와 같다.

$$J(n) = E[y(n)^2] \\ = 1/2\pi \int |H(z)|^2 \phi_{xx}(z) dz/z \quad (3.4)$$

여기서, $\phi_{xx}(z)$: 입력 전력 밀도(input power spectrum)

이 필터의 성능 함수 J가 최대가 될 때 필터는 가장 정확하게 중심 주파수에 놓여있다고 볼 수 있다. 성능 함수를

최대로 하기 위해 식 (3.5)와 같이 변수 W를 최귀시킨다.

$$W_{n+1} = W_n - 1/2\mu(-d(J(n))) \quad (3.5)$$

여기서, μ : 이득 계수(Gain Parameter)

$$d(J(n)) = \partial y(n)^2 / \partial W_n = 2y(n)(\partial y(n) / \partial W_n) \quad (3.6)$$

식 (3.6)에서 $\partial y(n) / \partial W_n$ 를 $a(n)$ 라 놓으면 식 (3.5)는 식 (3.7)로 보정된다.

$$W_{n+1} = W_n + \mu y(n)a(n) \quad (3.7)$$

이같은 알고리즘으로 해파 신호의 중심주파수를 추적할 수 있다. 그러나 이 알고리즘으로는 신호의 통계적 특성, 특히 신호의 크기가 급격하게 변할 때 이득 계수 μ 를 그때그때에 맞게 바꾸어 주지 않으면 발산하거나 수렴속도가 늦어지는 문제가 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 변수 W의 최귀식을 보정하였다.

RMXMS 알고리즘에서 출력 $y(n)$ 을 계수 $W(n)$ 으로 미분한 값 $a(n)$ 는 입력 신호의 크기에 따라 일정 비율로 변화한다. 이 점을 이용하여 신호의 주파수 분포에 따라 계수의 최귀식 (3.7)을 식 (3.8)과 같이 보정하였다.

$$W_{n+1} = W_n + \mu y(n)a(n)/\beta(n) \quad (3.8)$$

M

$$\text{여기서 } \beta(n) = \sum_{k=0}^M |a(n-k)| \quad (M = \text{입력의 정수})$$

정수 M은 신호의 종류에 따라서 달라지며 본 논문에서 다른 해파는 주파수 분포상 M의 값으로 39를 택했다.

4 적응 노치 필터의 설계

개선된 RMXMS 알고리즘에 의해 설계한 적응 노치 필터를 이용하여 1차계 해파력을 노치 필터링하는 적응 필터의 블록선도는 그림 (4.1)과 같다.

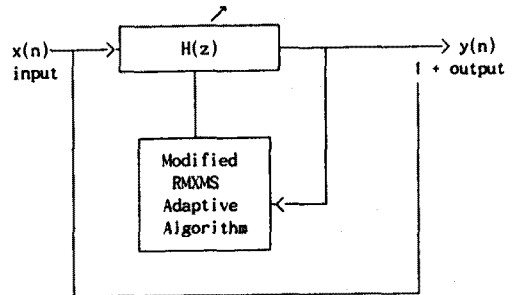


그림 4.1 적응 노치 필터링

센서에서 입력 신호를 측정하는 경우 측정 잡음이 간섭하게 된다. 이러한 잡음을 방지할 경우에 제어 입력에 영동한 작용을 하게 된다. 따라서 불필요한 잡음 및 1차계 해파정보를 제거하여 원하는 2차계 해파정보만을 얻기 위해 그림 4.2와 같은 시스템을 구성하였다.

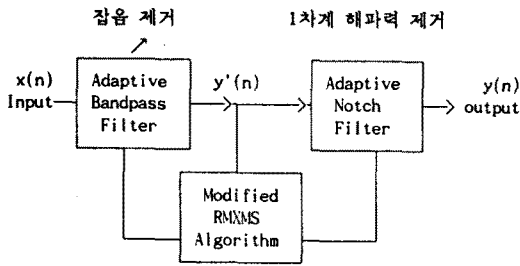


그림 4.2 잡음이 첨가된 경우의 노치 필터링

두개의 필터로 개선된 RMXMS 알고리즘에 의해서 동시에 계수가 같이 개선된다. 잡음이 첨가된 입력 신호를 중심 주파수 적응 필터로 대역 통과시키면서 개선된 RMXMS 알고리즘으로 중심 주파수를 추적하고 동시에 잡음을 제거한다. 그다음 잡음이 제거된 신호는 역시 처음의 개선된 RMXMS 알고리즘에서 구한 중심 주파수로 필터 계수를 변화 시키면서 노치 필터링한다.

5 모의 실험

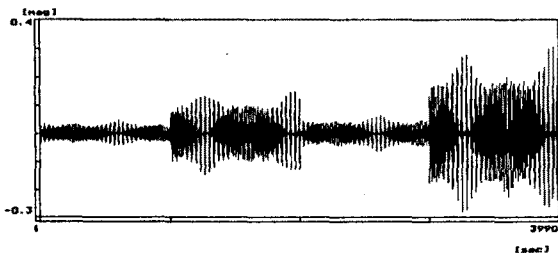
실험에 사용된 샘플 신호는 표 5.1과 같다.

비행체 속도 : 9 노트

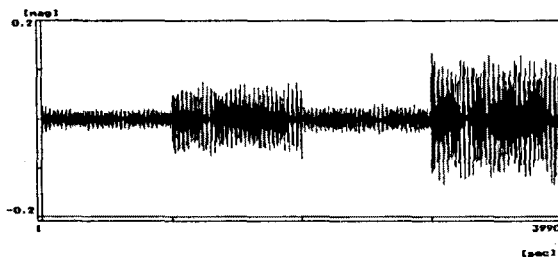
시간 (초)	해상 상태
1 - 1040	2
1041 - 2040	3-1
2041 - 3040	3
3041 - 4040	4

표 5.1 샘플 입력 신호

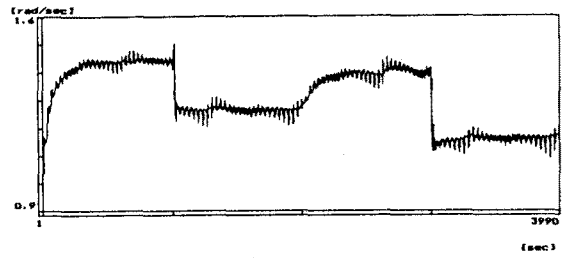
그림 5.1에 샘플 입력 신호에 대한 입력, 출력 신호 및 중심 주파수 추적과 그에 따른 1차계 해파력의 노치 필터링이 나타나 있다.



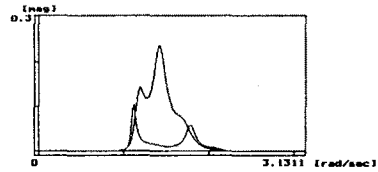
(a) 샘플 입력 신호



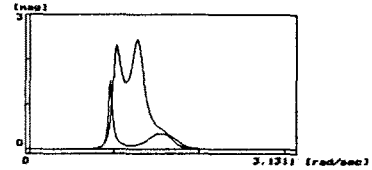
(b) 출력 신호



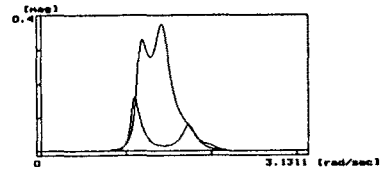
(c) 중심 주파수 추적



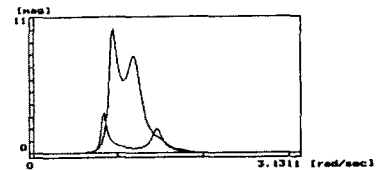
(d) 500 - 800 (초)
입출력 신호의 PSD



(e) 1500 - 1800 (초)
입출력 신호의 PSD



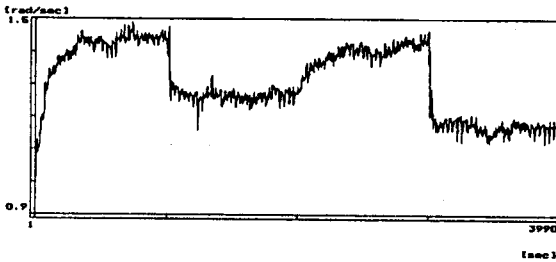
(f) 2500 - 2800 (초)
입출력 신호의 PSD



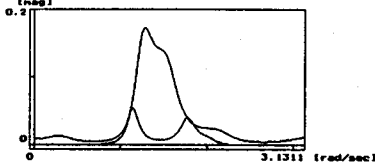
(g) 3500 - 3800 (초)
입출력 신호의 PSD

그림 5.1 샘플 신호에 대한 중심 주파수 추적과 그에 따른 노치 필터링

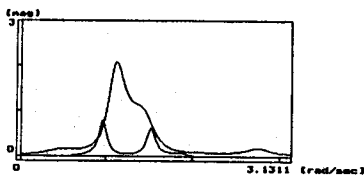
그림 5.2는 샘플 신호에 백색 잡음을 첨가한 후 중심 주파수 추적과 그에 따른 잡음 제거와 1차계 해파력의 제거를 나타낸다. 실험에 사용된 잡음은 입력 신호의 평균 크기에 10분의 1의 크기를 가진 백색 잡음(White Noise)으로 하였다.



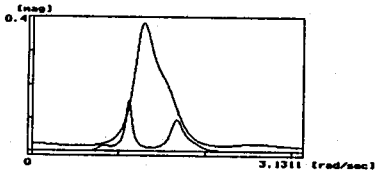
(a) 중심 주파수 추적



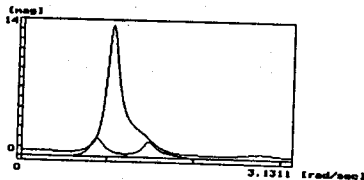
(b) 500 - 800 (초)
입출력 신호의 PSD



(c) 1500 - 1800 (초)
입출력 신호의 PSD



(d) 2500 - 2800 (초)
입출력 신호의 PSD



(e) 3500 - 3800 (초)
입출력 신호의 PSD

그림 5.2 잡음이 첨가되었을 때의 샘플 신호에 대한
중심 주파수 추적과 그에 따른 노치 필터링

6. 결 론

본 논문에서는 자유표면에서 수중 비행체가 직진 운동할 경우 스토캐스틱 외란으로 작용하는 1차계 해파력을 제거하기 위하여 적응 노치 필터를 설계하였다.

언어진 결론은 다음과 같다.

1. RMXMS 알고리즘을 개선하여 적용해 본 결과, 입력 신호의 통계적 특성이 급격히 변할 경우에도 빠른 수렴성과 안정성을 가짐을 알 수 있었다.

2. 통계적 변화가 큰 모의 신호를 대상으로 설계된 적응 노치 필터는 변화하는 신호의 중심 주파수를 정확하게 추적하였고 동시에 1차계 해파 외란을 제거함을 알 수 있었다.

3. 센서의 측정 잡음을 고려하여 모의 입력 신호에 백색 잡음을 첨가하여 실험한 결과, 측정 잡음과 1차계 해파 외란이 정확하게 제거됨을 확인할 수 있었다.

7 참 고 문 헌

- [1] Lennart Bystrom, "Adaptive Control of a Submarine in a Snorting Condition in Waves," Warship 88 International Symposium Paper, No. 1, 1988
- [2] A.J. Musker, "Prediction of Wave Force and Moments on a Near Surface Submarine," Int. Shipbuild Progr., Vol. 31, pp. 2-12, 1984
- [3] R. J. Daniel, "Submarine Today," Warship 88 International Symposium Paper, No. 1, 1988
- [4] Bhattachayya : Dynamics of Marine Vehicle, John Willey & Sons, 1978
- [5] Ratnam V. Raja Kumar and Ranendra N. Pal, "A Gradient Algorithm for Center-Frequency Adaptive Recursive Bandpass Filters," Proc. of the IEEE, Vol. 73, No. 2, pp. 371-372, February 1985
- [6] Ratnam V. Raja Kumar and Ranendra N. Pal, "Recursive Center Frequency Adaptive Filters for the Enhancement of Bandpass Signals," IEEE Trans. on ASSP., Vol. ASSP-34, No. 3, pp. 633-637, June 1986
- [7] 이석필, 윤형식, 박상희, "자유표면에서의 수중함 심도제어 시스템 성능 개선," 한국자동제어학술회의, Vol. 1 of 2, 1991.10