

DSP를 이용한 고장허용을 갖는 신뢰 적응 필터 설계

論 文
50D-1-2

Design of Reliable Adaptive Filter with Fault Tolerance Using DSP

柳 東 完* · 李 鎰 佑** · 徐 輔 赫***

(Dong-Wan Ryoo · Jeun-Woo Lee · Bo-Hyeok Seo)

Abstract - LMS algorithm has been used for plant identifier and noise cancellation. This algorithm has been researched for performance enhancement of filtering. The design and development of a reliable system has been becoming a key issue in industry field because the reliability of a system is considered as an important factor to perform the system's function successfully. And the computing with reliability and fault tolerance is a important factor in the case of aviation, system communication, and nuclear plant. This paper presents design of reliable adaptive filter with fault tolerance. Generally, redundancy is used for reliability. In this case it needs computing or circuit for voting mechanism or computing for fault detection or switching part. But this presented Filter is not in need of computing for voting mechanism, or fault detection. Therefore it has simple computing, and practicality for application. And in this paper, reliability of adaptive filter is analyzed. The effectiveness of the proposed adaptive filter is demonstrated to the case studies of plant identifier and noise cancellation by using DSP.

Key Words : LMS algorithm, Fault tolerance, Adaptive filter, Reliability, Plant identifier, Noise cancellation

1. 서 론

플랜트 식별기, 잡음소거(noise canceling) 및 채널동화(channel equalization)등을 위한 적응필터로 널리 사용되고 있는 것은 평균자승오차를 줄이는 최소평균자승(LMS) 알고리즘이다. LMS 필터의 성능을 개선하고자 여러 방향으로 연구가 되어왔다. 예를 들어 한 가지는 LMS 알고리즘의 학습계수를 필터의 환경에 따라 적절히 변화시키는 방법과 다른 한가지는 성능지수 함수를 변형을 시도하는 것 등이다.[1-5] 그러나 현대적인 시스템은 여러 종류의 기기가 복합적으로 연계되어 있어 단일 기기의 고장에 의한 파급효과가 크다. 즉 예전에 단독으로 운전되는 기계의 고장은 장치의 운용 손실로 끝나게 되지만 요즘의 시스템에서는 전체시스템에 치명적으로 작용하고 그로 인한 주변의 손실들이 많게 작용한다. 그리고 복잡하고 정교한 시스템일수록 고장률이 높아지게 되어 시스템의 신뢰도는 중요한 관심사로 등장하게 되었으며 신뢰성에 근거를 둔 설계는 중요한 위치를 차지하게 되었다.[6-9] 또한 우주항공, 시스템통신, 원자력의 경우와 같은 시스템의 적용에 고신뢰도와, 고장허용을 가지는 계산(computing)은 중요한 요소로 작용한다.

본 논문에서는 고장허용(fault tolerance)을 가지는 신뢰적

용필터를 설계한다. 신뢰도를 증가시키기 위하여 다중화(Redundancy)를 많이 사용하는데 이 경우 선택(Voting)을 위한 계산이나, 회로가 필요하며, 대기구조에서는 고장감지 계산이나 스위칭 회로가 필요하다. 그러나 이 필터는 선택을 위한 계산이나 고장 감지 계산을 사용하지 않는 알고리즘을 사용한다. 그러므로 계산량이 많지 않으며, 구현 또한 용이하다. 그리고 신뢰적용필터의 신뢰도를 분석하였다. 신뢰 적응 필터에 의한 플랜트 모형화와 잡음 제거를 모의 실험과 TMS320C32를 사용하여 효용성을 확인하였다.

2. 고장허용을 갖는 신뢰 적응 필터

2.1 신뢰 적응필터 알고리즘

그림 1에서 나타나있듯이 기존의 고장허용을 갖는 알고리즘은 필터링 된 결과를 비교하여 출력하는 방식이다. 모듈 1에서 비교치가 어느 정도를 넘으면 센서의 고장(또는 하드웨어)이나, 알고리즘의 고장으로 간주하고 모듈 2에서 다시 계산하여 그 결과를 보내도록 되어 있다. 그리하여 어느 정도의 고장에 대해서도 신뢰성을 가질 수 있다[7]. 그러나 이러한 방법은 고장을 감지하는 계산이 필요하고 또한 구조 자체가 복잡하다. 그리고 신뢰도를 위한 다중성구조로 구성할 경우는 여러 개의 센서를 통해 들어오는 신호를 필터링 후 선택하는 형태를 사용 할 수 있으나 이 역시 복잡해지고, 계산량이 많아진다. 그러므로 본 논문에서는 그림 2에서 나타난 것과 같이 고장허용을 가지는 신뢰적용필터를 설계한다. 이 필터는 선택을 위한 계산이나 고장 감지 계산을

* 正 會 員 : 韓國電子通信研究院 研究員

** 正 會 員 : 韓國電子通信研究院 責任研究員 · 工博

*** 正 會 員 : 慶北大 電子電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2000年 12月 7日

最終完了 : 2001年 1月 10日

사용하지 않는 알고리즘을 사용한다. 그러므로 계산량이 많지 않으며, 구현 또한 용이하다.

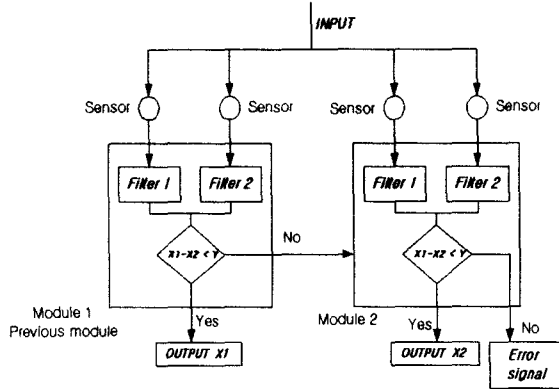


그림 1 고장허용을 위한 알고리즘
Fig. 1 Algorithm for fault tolerance

본 논문의 신뢰적용필터에서는 LMS 알고리즘을 사용한다. 신뢰적용필터는 FIR필터로 구성되며, 그림 2에 나타난 것과 같이 두 개의 적응필터로 구성된다. 소프트웨어의 다중성을 위하여 두 개의 필터의 차수는 다르게 사용한다. 적응필터의 오차신호의 최소화를 위한 목적함수는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J(W, V) = \frac{1}{2} E[e^2] \quad (1)$$

여기서 W 는 적응필터1의 계수벡터이며, V 는 적응필터2의 계수벡터이다. 그리고 $E[\cdot]$ 는 기대값을 나타낸다.

X 는 적응필터1의 입력으로 $X = [x(n) \ x(n-1) \ x(n-2) \ \dots \ x(n-N+1)]^T$ 로 구성되며, 적응필터2의 입력으로 $X = [x(n) \ x(n-1) \ x(n-2) \ \dots \ x(n-M+1)]^T$ 로 구성된다. 그러므로 적응필터1의 출력은 식(2)와 (3) 같이 나타낼 수 있다. 여기서 W 는 적응필터1의 계수벡터이며, V 는 적응필터2의 계수벡터이다.

$$y_1(n) = W(n)^T X(n) \quad (2)$$

$$y_2(n) = V(n)^T X(n) \quad (3)$$

$$y(n) = y_1(n) + y_2(n) \quad (4)$$

고정허용을 갖는 적응필터의 최종 출력은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 오차신호는 식 (5)와 같이 구성된다.

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (5)$$

LMS에 의한 필터의 가중치(계수) 갱신식은 MSE의 목적함수를 사용하여 식 (6)과 (7) 같이 나타낼 수 있다.

$$W(n+1) = W(n) - \mu(n) \frac{\partial J(W, V)}{\partial W} \quad (6)$$

$$V(n+1) = V(n) - \mu(n) \frac{\partial J(W, V)}{\partial V} \quad (7)$$

여기서 $\mu(n)$ 는 학습계수이다.

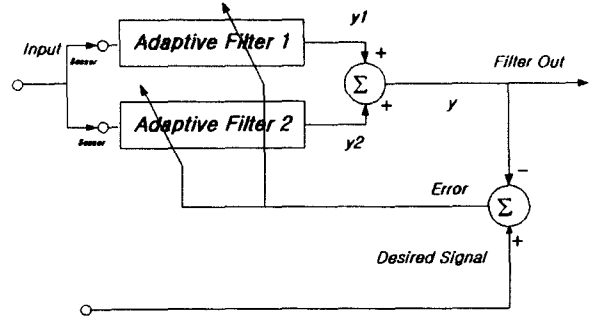


그림 2 신뢰 적응 필터
Fig. 2 Reliable adaptive filter

식(6)과 (7)을 단순화하여 다시 표현하면 신뢰적용필터의 가중치(계수)의 적응 알고리즘을 식 (8)과(9)로 나타낼 수 있다.

$$W(n+1) = W(n) + \mu(n)e(n)X(n) \quad (8)$$

$$V(n+1) = V(n) + \mu(n)e(n)X(n) \quad (9)$$

식 (6)과 (7)에서 보듯이 두 개의 필터 중 하나가 고장이 발생할 때 고장나지 않은 필터에 의해서 다시 가중치가 학습된다. 즉 적응필터2의 가중치 V 가 고장 났을 때 식 (6)에 의해 W 를 다시 오차가 줄어들도록 갱신하여 원하는 필터링을 계속 행할 수 있다. 이는 부가적인 고장검출이나, 검출에 대한 어떤 계산을 필요로 하지 않는다. 구현 또한 간단하다.

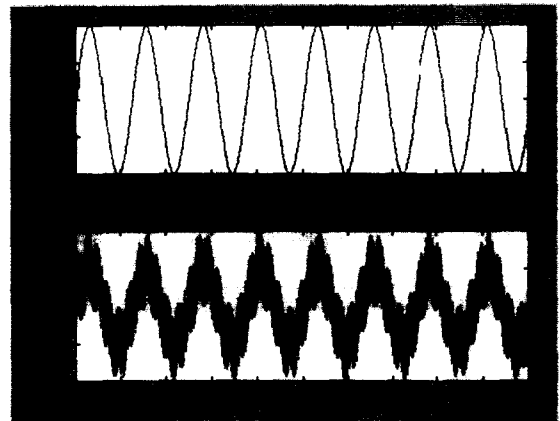


그림 3 원하는 출력과 적응 필터의 입력
Fig. 3 Desired value and adaptive filter output

컴퓨터에서 모의 실험을 행하였을 때 원하는 출력과 적응필터의 입력을 그림 3에 나타내었다. 이 때 적응필터의 입력(X)는 식(10)과 같이 하였고 잡음신호 $n(t)$ 는 $\sin(2n)$ 의

로 하였다.

$$X_t = \sin(n/20) + n(t) \quad (10)$$

그림 4는 필터링된 적응필터의 출력과 자승오차를 나타내고 있다. 여기서 학습계수(μ)는 0.01로 하였다.

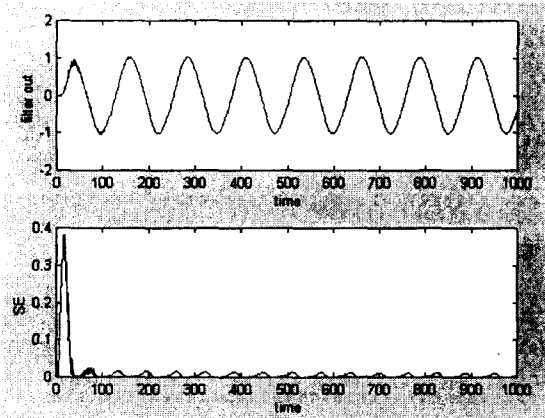


그림 4 필터링된 적응필터의 출력과 자승오차
Fig. 4 Filtering output of adaptive filter and squared error

적용필터1의 차수는 5차이고 적용필터2의 차수는 4차로 하였으며 그림 5는 시각300에서 적용필터1의 계수가 모두 0으로 하여, 필터고장 발생 시 필터출력과 자승오차를 나타내고 있다. 이는 센서와 같은 하드웨어적인 고장도 포함된다. 그림 5에서 보듯이 필터의 고장발생 시에도 다시 정상상태로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 즉 어느 정도 고장허용을 갖는다.

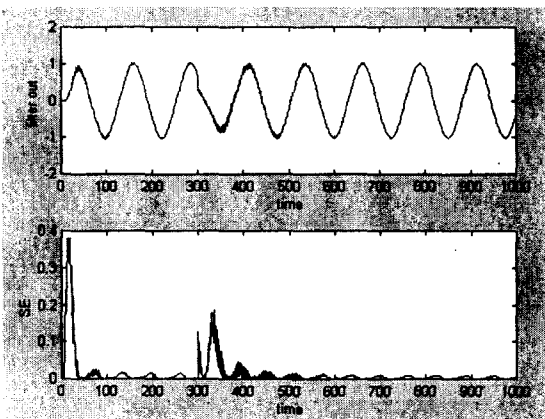


그림 5 적응필터고장 발생시(n=300) 필터출력과 자승오차
Fig. 5 Filter output and squared error when filter's fault occurred at 300

2.2 신뢰 적응 잡음 제거

적용 잡음 제거의 경우 신뢰적용필터는 그림 6과 같이 구성된다. Primary센서로부터 들어오는 신호원과 잡음이 섞여진 주(Primary)신호와 Reference센서로부터 들어오는 잡음으로 구성된 Reference신호로부터 적응 필터링을 하여 잡음을 소거한다. 잡음제거의 경우도 신뢰적용필터의 가중치(계수)갱신 적용 알고리즘은 LMS알고리즘에 의하여 식 (8)과 (9)로 나타낼 수 있다.

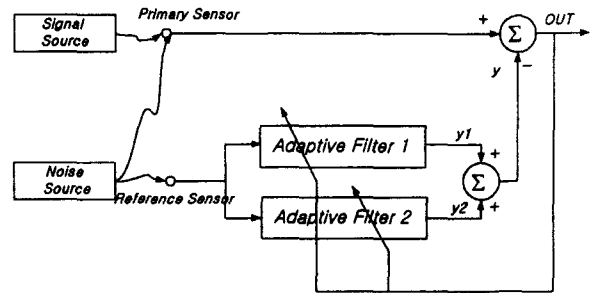


그림 6 잡음 제거의 신뢰 적응 필터
Fig. 6 Reliable adaptive filter of noise cancellation.

그림 7과 9는 주신호와 적응 필터의 출력을 나타내었다. 그림 8과 10은 시각 300에서 적용 필터1의 계수를 0으로 하여 적응필터고장 발생 시 필터 출력을 나타내고 있다.

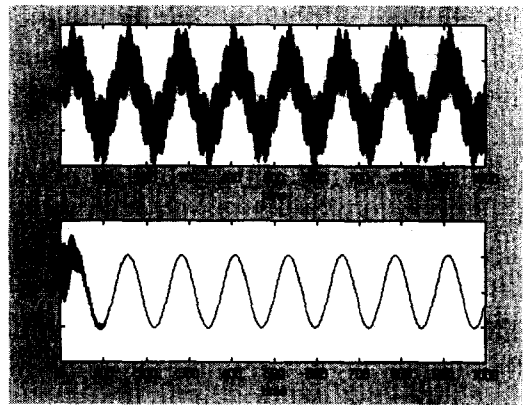


그림 7 주신호와 적응 필터의 출력
Fig. 7 Primary signal and adaptive filter's output

이 때 그림 7의 주신호(S_p)를 식(11)에 나타내었고, 그림 9의 주신호를 식(12)에 나타내었다.

$$S_t = \sin(n/20) + n(t) \quad (11)$$

$$S_t = \sin(n/20) + \sin(n/10) + n(t) \quad (12)$$

여기서 $n(t)$ 는 $\sin(2n)$ 으로 하였으며, 기준신호도 같게 하였다. 적용 잡음제거의 경우도 역시 적응필터1의 차수는 5차 적용필터2의 차수는 4차로 하였으며 여기서 학습계수(μ)는 0.01로 하였다.

적용필터2의 동작에 의해 다시 가중치가 갱신되어 정상적인 잡음 제거 필터링을 하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 센서와 같은 하드웨어적인 고장도 포함된다.

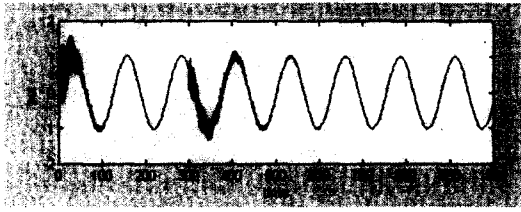


그림 8 적용필터고장 발생시(n=300) 필터출력
Fig. 8 Filter output when filter's fault occurred at 300

이러한 형태의 필터는 고장감지를 위한 특별한 계산이나, 신뢰도를 위한 다중화 선택 부분을 필요로 하지 않는 구조이다.

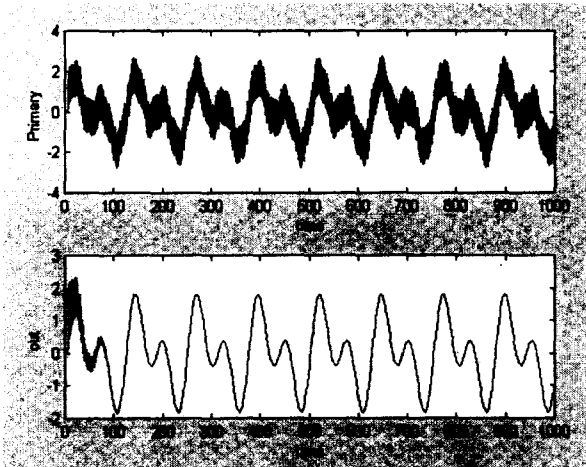


그림 9 주신호와 적응 필터의 출력
Fig. 9 Primary signal and adaptive filter's output

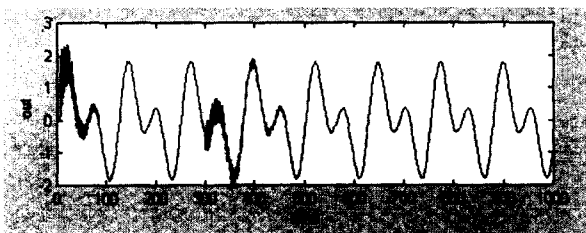


그림 10 시각300에서 적용필터고장 발생 시 필터 출력
Fig. 10 Filter output when filter's fault occurred at 300

3. 적응 필터의 신뢰도 분석

일반 적응 필터와 고장허용을 갖는 적응필터의 신뢰도를 비교한다. 일반적으로 병렬구조의 다중성을 갖는 구조에서

신뢰도는 식(13)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{fs} = 1 - F_{fs} \tag{13}$$

여기서 P_{fs} 는 신뢰도이고, F_{fs} 는 고장날 확률이다. 병렬구조의 다중성(Redundancy)이 N개 일 때 신뢰도는 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{fs} &= 1 - F_1 \cdot F_2 \cdots F_N = 1 - \prod_{i=1}^N (F_i) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_i) \end{aligned} \tag{14}$$

본 논문에서 사용되는 고장허용을 갖는 적응필터의 신뢰도의 경우 식(15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{filter} &= 1 - (1 - P_{filter1})(1 - P_{filter2}) \\ &= P_{filter1} + P_{filter2} - (P_{filter1} \cdot P_{filter2}) \end{aligned} \tag{15}$$

여기서 P_{filter} 는 신뢰 적응 필터의 신뢰도이고, $P_{filter1}$ 는 적응 필터1의 신뢰도, $P_{filter2}$ 는 적응 필터2의 신뢰도이다.

만약 필터1과 필터2의 동작확률(신뢰도)이 같다면, 신뢰 적응 필터의 신뢰도는 식(16)과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{filter} = 2P_{filter1} - P_{filter1}^2 \tag{16}$$

식 (16)에서의 결과를 사용하여 식(17)를 보면 분명히 신뢰도가 증가함을 알 수 있다.

$$\frac{2P_{filter1} - P_{filter1}^2}{P_{filter1}} \geq 1 \tag{17}$$

4. 실험 결과 및 검토

본 논문의 적응필터 알고리즘을 TMS320C32의 프로세서와 32KB의 27C512의 EPROM과 32K의 32비트 워드로 구성된 SRAM, A/D변환기, D/A변환기로 구성된 보드에서 적응필터링을 행하였다. DSP보드의 블록도를 그림11에 나타내었다.

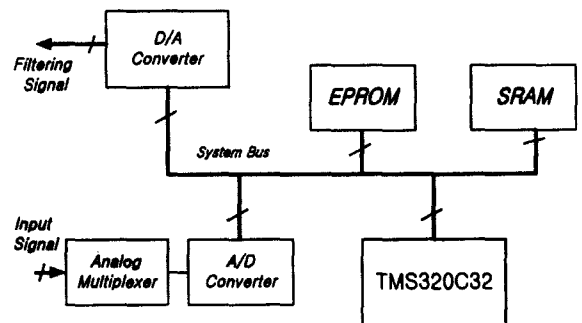


그림 11 DSP보드의 블록도
Fig. 11 Block diagram of DSP board

4.1 TMS를 이용한 적응 필터 (식별기)출력

그림12는 DSP보드의 필터입력이다. 입력으로 주 신호는 사인파형과 주 신호보다 주파수가 20배 큰 사인파형 형태의 잡음 신호를 합하여 사용하였다. 그리고 원하는 신호는 모형화 할 플랜트의 출력 대신 주 신호 사인파형으로 하였다. 그림 13은 DSP보드의 D/A변환기를 통하여 나오는 필터링 된 신호를 나타내었다.



그림 12 신뢰 적응 필터의 입력
Fig. 12. Input of reliable adaptive filter

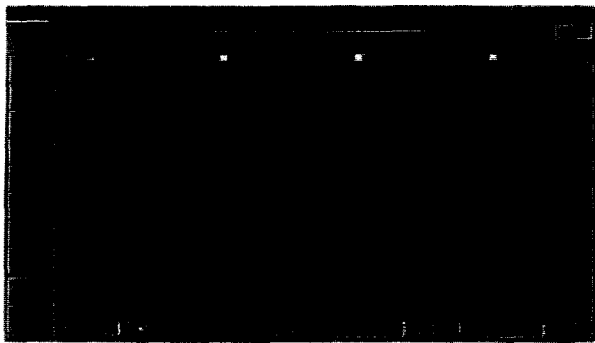


그림 13 신뢰 적응 필터의 출력
Fig. 13 Output of reliable adaptive filter

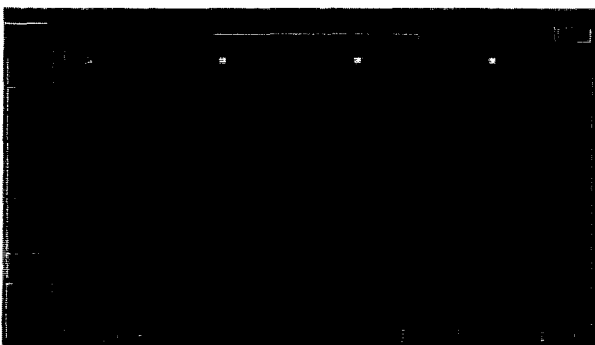


그림 14 신뢰 적응 필터의 입력
Fig. 14 Input of reliable adaptive filter

그림14는 DSP보드의 필터입력이며 그림 15는 DSP보드의 D/A변환기를 통하여 나오는 필터링 된 신호를 나타내었다.

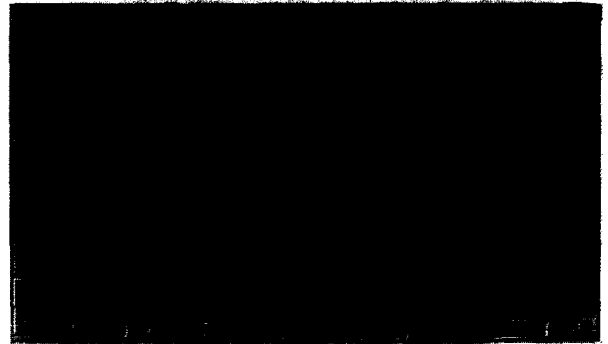


그림 15 신뢰 적응 필터의 출력
Fig. 15 Output of reliable adaptive filter

4.2 TMS를 이용한 적응 잡음 제거 출력

그림 16은 DSP보드로 들어가는 적응 필터의 Reference 신호, 즉 잡음 성분을 나타내고 있으며, 그림 17은 적응 필터의 주신호, 즉 원신호(source signal)와 잡음 신호의 합으로 구성된 신호이다. 그림 18은 적응 필터의 출력 (잡음 제거)을 나타내고 있다.

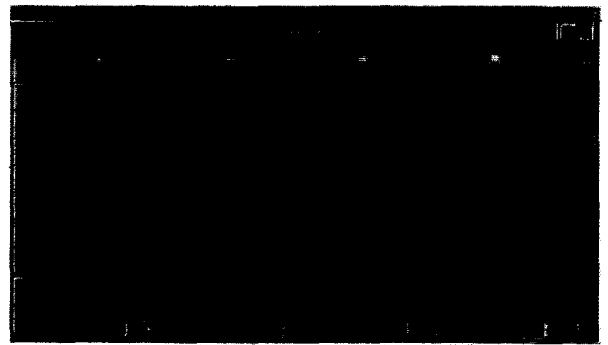


그림 16 신뢰 적응 필터의 Reference 신호
Fig. 16 Reference signal of reliable adaptive filter



그림. 17 신뢰 적응 필터의 주신호
Fig 17 Primary signal of reliable adaptive filter

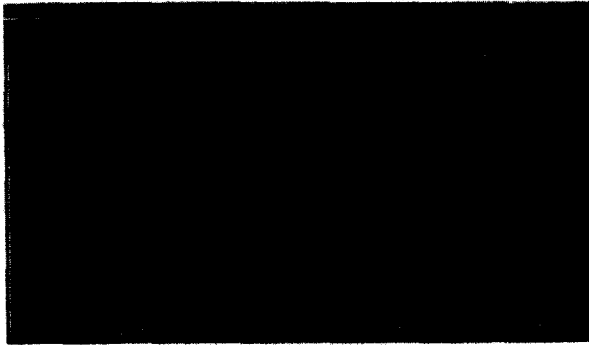


그림 18 신뢰 적응 필터의 출력 (잡음제거)
 Fig. 18 Output of reliable adaptive filter (noise cancellation)

6. 결 론

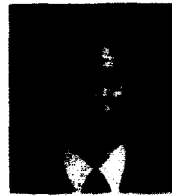
우주항공, 시스템통신, 원자력발전의 경우와 같은 적용에는 고신뢰도와, 고장허용을 가지는 계산은 중요한 요소로 작용한다. 본 논문에서는 고장허용을 가지는 신뢰적용필터를 설계하였다. 일반적으로 신뢰도를 증가시키기 위하여 다중화를 많이 사용하는데 이 경우 선택(Voting)을 위한 계산이나, 회로가 필요하며, 대기구조에서는 고장감지계산이나 스위칭 회로가 필요하다. 그러나 본 논문에서 고장허용을 위한 적응필터는 필터의 고장발생 시 알고리즘에 의해 고장감지구조를 가지지 않으면서도 자동적으로 가중치를 갱신하여 원하는 필터링을 계속 행할 수 있게 설계되었다. 즉 이 필터는 선택을 위한 계산이나 고장 감지 계산을 사용하지 않는 알고리즘을 사용한다. 그러므로 계산량이 많지 않으며, 구현 또한 용이하다. 또한 필요한 하드웨어(센서등)의 개수 줄일 수 있는 구조이다. 그리고 신뢰적용필터의 신뢰도를 분석하였다. 신뢰 적응 필터에 의한 플랜트 모형화와 잡음 제거를 모의 실험과 TMS320C32를 사용하여 제안된 필터의 효용성을 확인하였다

참 고 문 헌

[1] Sudhakar K "A general class of normalized adaptive filtering algorithms" *IEEE Trans on Signal Processing* vol. 47 no. 8. August pp2262-2272, 1999.
 [2] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory, third edition*, Prentice- Hall, 1996.
 [3] Bernard W, Samuel D, *Adaptive signal Processing*, Prentice Hall, 1985.
 [4] A. Cichocki, *Neural Networks for Optimization and Signal Processing*, Wiley 1992
 [5] Graham C, Goodwin Kwai Sang Sin, *Adaptive Filtering Prediction and Control, Information and system science series*, 1985
 [6] Richard E, Barlow, *Reliability and Decision making*, Chapman & Hall, 1993.

[7] Patrick D. T, *Practical Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, 1996.
 [8] Barry W, Johnson, *Design and Analysis of Fault Tolerance Digital Systems*, Addison Wesley, 1989.
 [9] C. Galikowsky "Optimal redundancies for reliability and availability of series systems" *Microelectron. Reliability*, vol. 36, no. 10, pp. 1537-1546, 1996.

저 자 소 개



유 동 완 (柳 東 完)

1968년 10월 4일 생 1995년 영남대 공대 전기공학과졸업. 1997년 경북대 대학원 전기공학과졸업(석사). 1999년 동 대학원 박사과정 수료. 2000년~현재 한국전자통신연구원 연구원

Tel : 042-860-1596, Fax : 042-860-6671
 E-mail : dwryoo@etri.re.kr



이 전 우 (李 鎡 佑)

1961년 6월 26일 생. 1983년 경북대 전자공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 현재 한국전자통신연구원 책임연구원

Tel : 042-860-5037, Fax : 042-860-6671
 E-mail : ljwoo@etri.re.kr



서 보 혁 (徐 輔 焯)

1952년 3월 11일 생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 경북대 공대 전자전기공학부 교수

Tel : 053-950-5604, Fax : 053-950-6600
 E-mail : bhsuh@bh.knu.ac.kr