



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2016-0120977
(43) 공개일자 2016년10월19일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01V 1/28 (2006.01) B81B 7/02 (2006.01)
G01V 1/30 (2006.01) G06F 17/11 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01V 1/28 (2013.01)
B81B 7/02 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2015-0050266
(22) 출원일자 2015년04월09일
심사청구일자 2015년04월09일

(71) 출원인
한국기술교육대학교 산학협력단
충남 천안시 동남구 병천면 충절로 1600, 내 (한
국기술교육대학교)
(72) 발명자
성상만
충청남도 천안시 서북구 시청로 39, 101동 401호
(불당동, 대동아파트)
이병렬
경기도 용인시 수지구 진산로 90, 513동 1402호
(풍덕천동, 진산마을삼성래미안5차아파트)
(74) 대리인
특허법인태백

전체 청구항 수 : 총 14 항

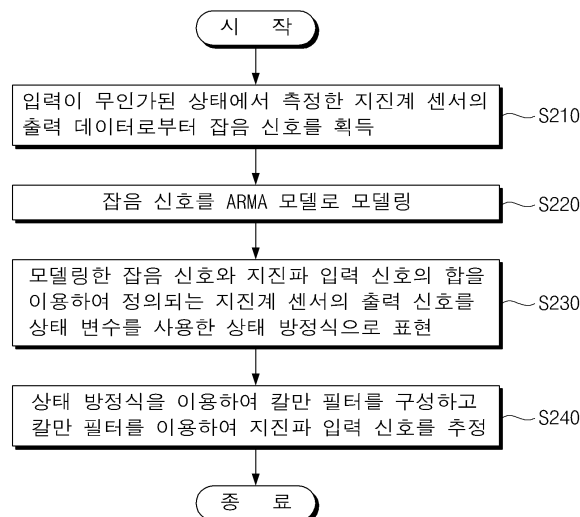
(54) 발명의 명칭 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법 및 그 장치

(57) 요약

본 발명은 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법 및 그 장치에 관한 것이다. 본 발명에 따르면, 지진계 센서에 포함된 잡음 신호를 자동회귀이동평균(ARMA;Auto Regressive Moving Average) 모델로 모델링하는 단계와, 상기 모델링된 잡음 신호와 지진파 입력 신호의 합을 이용하여 정의되는 상기 지진계 센서의 출력 신호를 상태 변수를 사용한 상태 방정식으로 표현하는 단계, 및 상기 상태 방정식을 이용하여 칼만 필터를 구성하고 상기 칼만 필터를 이용하여 상기 지진파 입력 신호를 추정하는 단계를 포함하는 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법을 제공한다.

상기 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법 및 그 장치에 따르면, 지진계 센서가 가지는 잡음 성분을 최소화하면서 지진파 신호를 추정함에 따라 지진계 센서의 동적 범위를 향상시킬 수 있는 이점이 있다.

대표도 - 도2



(52) CPC특허분류

G01V 1/30 (2013.01)

G06F 17/11 (2013.01)

B81B 2201/0285 (2013.01)

G01V 2210/22 (2013.01)

G01V 2210/324 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 10045088

부처명 미래창조과학부

연구관리전문기관 정보통신기술진흥센터

연구사업명 글로벌전문기술개발사업

연구과제명 지진 재해 대비 건물 진동 모니터링 시스템의 개발

기 여 율 1/1

주관기관 (주)이제이텍

연구기간 2013.06.01 ~ 2015.05.31

명세서

청구범위

청구항 1

지진계 센서에 포함된 잡음 신호를 자동회귀이동평균(ARMA; Auto Regressive Moving Average) 모델로 모델링하는 단계;

상기 모델링된 잡음 신호와 지진과 입력 신호의 합을 이용하여 정의되는 상기 지진계 센서의 출력 신호를 상태 변수를 사용한 상태 방정식으로 표현하는 단계; 및

상기 상태 방정식을 이용하여 칼만 필터를 구성하고 상기 칼만 필터를 이용하여 상기 지진과 입력 신호를 추정하는 단계를 포함하는 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

입력이 무인가된 상태에서 측정한 상기 지진계 센서의 출력 데이터로부터 상기 잡음 신호를 획득하는 단계를 더 포함하는 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법.

청구항 3

청구항 1 또는 청구항 2에 있어서,

상기 ARMA 모델로 모델링된 잡음 신호는 아래의 수학식으로 정의되는 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법:

$$b_t = -a_1 b_{t-1} - a_2 b_{t-2} - \dots - a_{na} b_{t-na} + e_t$$

$$(e_t = \tilde{e}_t + c_1 \tilde{e}_{t-1} + \dots + c_{nc} \tilde{e}_{t-nc})$$

여기서, b_t 는 상기 모델링된 잡음 신호, na 및 a_i 는 각각 상기 자동회귀의 차수 및 계수, $\tilde{e}_t$ 는 백색 가우시안 잡음, nc 및 c_j 는 각각 상기 이동평균의 차수 및 계수를 나타낸다.

청구항 4

청구항 3에 있어서,

상기 지진계 센서의 출력 신호 y_t 는,

상기 지진과 입력 신호 u_t , 상기 모델링된 잡음 신호 b_t , 상기 지진계 센서의 출력에 추가되는 백색 잡음 v_t 의

합($y_t = u_t + b_t + v_t$)으로 정의되고,

상기 지진과 입력 신호 u_t 는 아래의 수학식으로 정의되는 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법:

$$u_t = \alpha_1 u_{t-1} + \alpha_2 u_{t-2} + \dots + \alpha_{na} u_{t-na} + f_t$$

여기서, u_t 는 마코프 프로세스로 정의된 상기 지진과 입력 신호, α_i 는 임의의 상수, na 는 마코프 프로세스 차수, f_t 는 지진과 입력 신호에 포함된 백색 잡음을 나타낸다.

청구항 5

청구항 4에 있어서,

상기 상태 방정식은 시스템 식과 출력 식을 포함하는 아래의 수학식으로 정의되는 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법:

$$\begin{aligned}x_{t+1} &= Fx_t + Gw_t \\y_t &= Hx_t + v_t\end{aligned}$$

여기서, x_t 는 상태 변수로서 $x_t = [b_{t-na+1} \cdots b_{t-1} b_t u_t]^T$, w_t 는 프로세스 잡음으로서 $w_t = [e_{t+1} f_{t+1}]^T$, F 는 시스템 행렬, G 는 프로세스 잡음 행렬, y_t 는 지진계 센서의 출력, H 는 측정 행렬, v_t 는 백색 잡음을 나타낸다.

청구항 6

청구항 5에 있어서,

상기 칼만 필터는 아래의 수학식으로 정의되는 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법:

$$\hat{x}_{t+1} = F\hat{x}_t + K(y_{t+1} - \hat{y}_{t+1})$$

여기서, $\hat{x}_t$ 는 시간 t 에서의 상태 변수 추정 값, $\hat{x}_{t+1}$ 는 시간 $t+1$ 에서의 지진계 센서의 출력을 이용한 상태 변수 추정 값, $\hat{y}_{t+1}$ 는 y_{t+1} 의 예측 값, K 는 칼만 이득 행렬이다.

청구항 7

청구항 1에 있어서,

상기 칼만 필터를 사용하기 이전 또는 이후에 저역통과 필터를 사용하여 고주파 잡음을 억제하는 단계를 더 포함하는 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법.

청구항 8

지진계 센서에 포함된 잡음 신호를 자동회귀이동평균(ARMA;Auto Regressive Moving Average) 모델로 모델링하는 ARMA 모델링부;

상기 모델링된 잡음 신호와 지진파 입력 신호의 합을 이용하여 정의되는 상기 지진계 센서의 출력 신호를 상태 변수를 사용한 상태 방정식으로 표현하는 상태공간모형 생성부; 및

상기 상태 방정식을 이용하여 칼만 필터를 구성하고 상기 칼만 필터를 이용하여 상기 지진파 입력 신호를 추정하는 칼만 필터 연산부를 포함하는 지진계 센서의 동적 범위 향상 장치.

청구항 9

청구항 8에 있어서,

입력이 무인가된 상태에서 측정된 상기 지진계 센서의 출력 데이터로부터 상기 잡음 신호를 획득하는 잡음 획득부를 더 포함하는 지진계 센서의 동적 범위 향상 장치.

청구항 10

청구항 8 또는 청구항 9에 있어서,

상기 ARMA 모델로 모델링된 잡음 신호는 아래의 수학식으로 정의되는 지진계 센서의 동적 범위 향상 장치:

$$b_t = -a_1 b_{t-1} - a_2 b_{t-2} - \dots - a_{na} b_{t-na} + e_t$$

$$(e_t = \tilde{e}_t + c_1 \tilde{e}_{t-1} + \dots + c_{nc} \tilde{e}_{t-nc})$$

여기서, b_t 는 상기 모델링된 잡음 신호, na 및 a_i 는 각각 상기 자동회귀의 차수 및 계수, $\tilde{e}_t$ 는 백색 가우시안 잡음, nc 및 c_j 는 각각 상기 이동평균의 차수 및 계수를 나타낸다.

청구항 11

청구항 10에 있어서,

상기 지진계 센서의 출력 신호 y_t 는,

상기 지진과 입력 신호 u_t , 상기 모델링된 잡음 신호 b_t , 상기 지진계 센서의 출력에 추가되는 백색 잡음 v_t 의

$$\text{합}(y_t = u_t + b_t + v_t) \text{으로 정의되고,}$$

상기 지진과 입력 신호 u_t 는 아래의 수학식으로 정의되는 지진계 센서의 동적 범위 향상 장치:

$$u_t = \alpha_1 u_{t-1} + \alpha_2 u_{t-2} + \dots + \alpha_{na} u_{t-na} + f_t$$

여기서, u_t 는 마코프 프로세스로 정의된 상기 지진과 입력 신호, α_i 는 임의의 상수, na 는 마코프 프로세스 차수, f_t 는 지진과 입력 신호에 포함된 백색 잡음을 나타낸다.

청구항 12

청구항 11에 있어서,

상기 상태 방정식은 시스템 식과 출력 식을 포함하는 아래의 수학식으로 정의되는 지진계 센서의 동적 범위 향상 장치:

$$x_{t+1} = Fx_t + Gw_t$$

$$y_t = Hx_t + v_t$$

여기서, x_t 는 상태 변수로서 $x_t = [b_{t-na+1} \dots b_{t-1} b_t u_t]^T$, w_t 는 프로세스 잡음으로서

$w_t = [e_{t+1} f_{t+1}]^T$, F 는 시스템 행렬, G 는 프로세스 잡음 행렬, y_t 는 지진계 센서의 출력, H 는 측정 행렬, v_t 는 백색 잡음을 나타낸다.

청구항 13

청구항 11에 있어서,

상기 칼만 필터는 아래의 수학식으로 정의되는 지진계 센서의 동적 범위 향상 장치:

$$\hat{x}_{t+1} = F\hat{x}_t + K(y_{t+1} - \hat{y}_{t+1})$$

여기서, $\hat{x}_t$ 는 시간 t에서의 상태 변수 추정 값, $\hat{x}_{t+1}$ 는 시간 t+1에서의 지진계 센서의 출력을 이용한 상태 변수 추정 값, $\hat{y}_{t+1}$ 는 y_{t+1} 의 예측 값, K는 칼만 이득 행렬이다.

청구항 14

청구항 8에 있어서,

상기 칼만 필터를 사용하기 이전 또는 이후에 저역통과 필터를 사용하여 고주파 잡음을 억제하는 저역통과 필터 부를 더 포함하는 지진계 센서의 동적 범위 향상 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법 및 그 장치에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 지진과 신호의 측정에 사용되는 지진계 센서의 동적 범위를 향상시킬 수 있는 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법 및 그 장치에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 일반적으로 MEMS(Micro Electro Mechanical System)는 반도체 소자인 실리콘의 우수한 기계적 특성 및 전기적 안정성을 기반으로 다양한 계측용 센서 소자로 사용되고 있다. 특히 용량형(capacitive) MEMS 센서는 미세 가공 및 일괄 생산에 적합하기 때문에 최근 들어 모바일 기기 용도의 저가 센서로 급속히 성장하고 있다.

[0003] MEMS 센서가 소형화와 저가격화를 추구하는 한편 기존의 고가의 기계식 계측용 센서를 MEMS 기반으로 대체하려는 노력도 활발히 진행되고 있다. 특히 가속도 센서의 경우 2011년에 Colibrys사에서 출시한 SF2006는 잡음 밀도가 $1.3/\sqrt{\text{Hz}}$ 에 불과하여 기존의 거대한 기계식 센서 성능에 근접하고 있다. MEMS 가속도 센서의 정밀도가 높아지면 관성 항법 장치나 지진 모니터링과 같은 기존의 대형 고비용 계측 설비를 소형 저가 시스템으로 대체할 수 있는데 이를 위해서는 MEMS 센서의 정지 잡음을 줄이는 것이 중요하다.

[0004] 지진계 센서의 출력에는 지진과 신호와 이를 측정하는 과정에서 입력되는 잡음 신호를 모두 포함하고 있다. 잡음의 종류로는 백색 잡음, 잡음, 랜덤워크, 양자화 잡음, 마코프 프로세서 등이 있다. 주파수 영역에서 보면 잡음 신호는 지진과 신호에 더해지는 저주파 잡음과 이 영역을 벗어난 고주파 잡음으로 구분될 수 있다.

[0005] 그 중에서 고주파 잡음은 저역통과 필터(LPF; Low Pass Filter)로 충분히 억제가 가능하지만 저주파 잡음은 실제 지진과 신호와 동일한 주파수 대역에 존재하므로 일반적인 저역통과 필터로는 억제가 불가능하다.

[0006] 본 발명의 배경이 되는 기술은 한국등록특허 제0594625호(2006.06.30 공고)에 개시되어 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명은 지진계 센서가 가지는 잡음 성분을 최소화하면서 지진과 신호를 추정함에 따라 지진계 센서의 동적 범위를 향상시킬 수 있는 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법 및 그 장치를 제공하는데 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0008] 본 발명은, 지진계 센서에 포함된 잡음 신호를 자동회귀이동평균(ARMA; Auto Regressive Moving Average) 모델로 모델링하는 단계와, 상기 모델링된 잡음 신호와 지진과 입력 신호의 합을 이용하여 정의되는 상기 지진계 센서의 출력 신호를 상태 변수를 사용한 상태 방정식으로 표현하는 단계, 및 상기 상태 방정식을 이용하여 칼만 필터를 구성하고 상기 칼만 필터를 이용하여 상기 지진과 입력 신호를 추정하는 단계를 포함하는 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법을 제공한다.

[0009] 여기서, 상기 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법은, 입력이 무인가된 상태에서 측정한 상기 지진계 센서의 출력 데이터로부터 상기 잡음 신호를 획득하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0010] 또한, 상기 ARMA 모델로 모델링된 잡음 신호는 아래의 수학적식으로 정의될 수 있다.

$$b_t = -a_1 b_{t-1} - a_2 b_{t-2} - \dots - a_{na} b_{t-na} + e_t$$

$$(e_t = \tilde{e}_t + c_1 \tilde{e}_{t-1} + \dots + c_{nc} \tilde{e}_{t-nc})$$

[0013] 여기서, b_t 는 상기 모델링된 잡음 신호, na 및 a_i 는 각각 상기 자동회귀의 차수 및 계수, $\tilde{e}_t$ 는 백색 가우시안 잡음, nc 및 c_j 는 각각 상기 이동평균의 차수 및 계수를 나타낸다.

[0014] 또한, 상기 지진계 센서의 출력 신호 y_t 는, 상기 지진과 입력 신호 u_t , 상기 모델링된 잡음 신호 b_t , 상기 지진계 센서의 출력에 추가되는 백색 잡음 v_t 의 합($y_t = u_t + b_t + v_t$)으로 정의되고, 상기 지진과 입력 신호 u_t 는 아래의 수학적식으로 정의될 수 있다.

$$u_t = \alpha_1 u_{t-1} + \alpha_2 u_{t-2} + \dots + \alpha_{na} u_{t-na} + f_t$$

[0016] 여기서, u_t 는 마코프 프로세스로 정의된 상기 지진과 입력 신호, α_i 는 임의의 상수, na 는 마코프 프로세스 차수, f_t 는 지진과 입력 신호에 포함된 백색 잡음을 나타낸다.

[0017] 또한, 상기 상태 방정식은 시스템 식과 출력 식을 포함하는 아래의 수학적식으로 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= Fx_t + Gw_t \\ y_t &= Hx_t + v_t \end{aligned}$$

[0019] 여기서, x_t 는 상태 변수로서 $x_t = [b_{t-na+1} \dots b_{t-1} b_t u_t]^T$, w_t 는 프로세스 잡음으로서 $w_t = [e_{t+1} f_{t+1}]^T$, F 는 시스템 행렬, G 는 프로세스 잡음 행렬, y_t 는 지진계 센서의 출력, H 는 측정 행렬, v_t 는 백색 잡음을 나타낸다.

[0020] 또한, 상기 칼만 필터는 아래의 수학적식으로 정의될 수 있다.

$$\hat{x}_{t+1} = F\hat{x}_t + K(y_{t+1} - \hat{y}_{t+1})$$

[0022] 여기서, $\hat{x}_t$ 는 시간 t 에서의 상태 변수 추정 값, $\hat{x}_{t+1}$ 는 시간 $t+1$ 에서의 지진계 센서의 출력을 이용한 상태 변수 추정 값, $\hat{y}_{t+1}$ 는 y_{t+1} 의 예측 값, K 는 칼만 이득 행렬이다.

[0023] 또한, 상기 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법은, 상기 칼만 필터를 사용하기 이전 또는 이후에 저역통과 필터를 사용하여 고주파 잡음을 억제하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0024] 그리고, 본 발명은, 지진계 센서에 포함된 잡음 신호를 자동회귀이동평균(ARMA; Auto Regressive Moving Average) 모델로 모델링하는 ARMA 모델링부와, 상기 모델링된 잡음 신호와 지진과 입력 신호의 합을 이용하여 정의되는 상기 지진계 센서의 출력 신호를 상태 변수를 사용한 상태 방정식으로 표현하는 상태공간모형 생성부, 및 상기 상태 방정식을 이용하여 칼만 필터를 구성하고 상기 칼만 필터를 이용하여 상기 지진과 입력 신호를 추정하는 칼만 필터 연산부를 포함하는 지진계 센서의 동적 범위 향상 장치를 제공한다.

발명의 효과

[0025] 본 발명에 따른 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법 및 그 장치에 따르면, 지진계 센서가 가지는 잡음 성분을 최소화하면서 지진과 신호를 추정함에 따라 지진계 센서의 동적 범위를 향상시킬 수 있는 이점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0026] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 지진계 센서의 동적 범위 향상 장치의 구성도이다.
 도 2는 도 1의 장치를 이용한 동적 범위 향상 방법을 나타낸 흐름도이다.
 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 방법의 테스트를 위한 지진계의 셋업 상태를 나타낸 도면이다.
 도 4는 본 발명의 실시예에 사용된 저역통과 필터의 주파수 응답 특성을 나타낸 도면이다.
 도 5는 본 발명의 실시예에 따라 추정된 모델에 의한 백색화 가능 여부를 확인한 도면이다.
 도 6은 본 발명의 실시예에서 지진과 입력 신호가 있을 때 지진계 센서의 출력 데이터, 저역통과 필터 통과 데이터, 칼만 필터 통과 데이터를 각각 비교한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0027] 그러면 첨부한 도면을 참고로 하여 본 발명의 실시예에 대하여 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 상세히 설명한다.
 [0028] 본 발명은 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법 및 그 장치에 관한 것으로서 지진계 센서에 포함된 잡음에 의한 영향을 억제하는 것을 통해 지진계 센서의 동적 범위를 향상시킬 수 있는 방법을 제안한다.
 [0029] 일반적으로 지진계용 가속도 센서 즉, 지진계 센서가 가지는 성능 중에서 가장 중요한 것은 동적 범위이며 동적 범위는 아래와 같이 표현할 수 있다.

수학식 1

$$\text{동적범위} = 20\log_{10}\left(\frac{\text{센서 신호의 최대값}}{\text{배경잡음의 표준편차}}\right)$$

[0031] 이러한 수학식 1과 같이, 지진계 센서의 동적 범위는 정해진 최대 입력에 대하여, 지진계 센서에서 측정된 센서 신호의 최대값과 배경 잡음의 표준편차 간의 비율로 표현되는 것을 알 수 있다. 본 발명의 실시예는 지진계 센서로서 3축의 가속도계가 MEMS 공정에 의해 하나의 모듈로 일체화된 것을 예시로 하며 상기 최대 입력으로서 국내 지진계 규격에 정해진 2g를 사용한다.
 [0032] 일반적으로 센서의 배경 잡음에 대한 이론적 한계는 스프링에 연결된 관성 질량의 열역학적 거동으로 설명할 수 있으며 아래의 수학식 2로 표현할 수 있다.

수학식 2

$$v = \sqrt{\frac{4\kappa_B T \omega_o}{QM}}$$

[0034] 여기서, v 는 $1/\sqrt{Hz}$ 단위의 배경잡음 밀도, k_B 는 볼츠만(Boltzmann) 상수, T 는 온도, ω_o 는 2차 진동계의 고유진동수, Q 는 quality factor, M 은 관성 질량을 의미한다.
 [0035] 상기의 수학식 2에 따르면 MEMS 가속도 센서의 배경 잡음은 센서의 구조 개선 및 온도 보상 등의 방법으로 개선할 수 있으나 개선의 정도에는 한계가 따른다. 따라서 센서 출력에 대한 별도의 후처리 과정을 통하여 배경 잡음에 의한 영향을 억제할 수 있는 디지털 필터링 알고리즘이 필요하다.
 [0036] 본 발명의 실시예는 입력이 무인가된 상태에서 지진계 센서에 포함된 잡음을 분석하고 분석한 잡음을 ARMA 모델

링한 다음, 모델링된 잡음과 지진과 입력을 칼만 필터식에 포함시킴에 따라, 지진과 신호의 입력 시에 칼만 필터 방법을 통하여 잡음을 억제하면서 지진과 신호를 추정할 수 있다. 또한 지진과 신호 추정 성능을 향상시키기 위하여 칼만 필터 전후에 일반적인 저역통과 필터를 추가로 사용할 수 있다.

[0037] 이러한 방법으로 본 발명의 실시예는 지진계 센서의 잡음 성분을 최소화하면서 지진과 신호를 추정할 수 있어 지진계 센서의 동적 범위를 향상시키는 결과를 도출할 수 있다. 이하에서는 본 발명의 실시예에 따른 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법에 관하여 더욱 상세히 설명한다.

[0038] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 지진계 센서의 동적 범위 향상 장치의 구성도이고, 도 2는 도 1의 장치를 이용한 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법을 나타낸 흐름도이다.

[0039] 도 1 및 도 2를 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 지진계 센서의 동적 범위 향상 장치(100)는 잡음 획득부(110), ARMA 모델링부(120), 상태공간모형 생성부(130), 칼만 필터 연산부(140), 저역통과 필터부(150)를 포함한다.

[0040] 먼저, 잡음 획득부(110)는 입력이 무인가된 상태에서 측정된 지진계 센서의 출력 데이터로부터 잡음 신호를 획득한다(S210).

[0041] 본 발명의 실시예는 잡음 신호를 모델링 하기에 앞서, 상기와 같이 지진계 센서에 입력을 가하지 않은 상태에서 측정되는 지진계 센서의 출력 데이터로부터 잡음 신호를 획득한다. 이는 지진계 센서에 입력이 없는 상태에서 배경 잡음 성분을 측정하기 위한 것이다.

[0042] 상기와 같이 잡음 신호가 획득되면 잡음 신호를 자동회귀이동평균(ARMA;Auto Regressive Moving Average) 모델로 표현한다. 즉, ARMA 모델링부(120)는 지진계 센서에 포함된 잡음 신호를 상기 ARMA 모델로 모델링한다(S220).

[0043] 여기서 잡음 신호를 ARMA 모델링하는 과정은 다음과 같다. 우선, 자동회귀(AR;Auto Regressive) 및 이동평균(MA;Moving Average)이 혼합된 ARMA 모형은 일반적으로 아래의 수학적 식 3과 같이 표현될 수 있다.

수학적 식 3

$$b_t = -a_1b_{t-1} - a_2b_{t-2} - \dots - a_{na}b_{t-na} + \tilde{e}_t + c_1\tilde{e}_{t-1} + \dots + c_{nc}\tilde{e}_{t-nc}$$

[0044]

[0045] 여기서, b_t 는 상기 모델링된 잡음 신호, $\tilde{e}_t$ 는 백색 가우시안 잡음, na 및 a_i 는 각각 상기 자동회귀의 차수 및 계수($i=1, \dots, na$), nc 및 c_j 는 각각 상기 이동평균의 차수 및 계수($j=1, \dots, nc$)를 나타낸다. 그리고 t 와 관련한 것은 시간에 대한 인덱스를 나타내는데, $t-1$ 은 현재시간 t 로부터 한 샘플 이전 시간을 의미한다.

[0046] 이러한 수학적 식 3에서, 자동회귀의 차수 na 및 계수 a_i 와, 이동평균의 차수 nc 및 계수 c_j 를 각각 추정하여야 한다. 본 발명의 실시예는 시스템 식별 방법 중에서 잡음 백색화(whitening)에 최적 방법으로 알려진 예측 오차법(prediction error method)을 사용하여 차수 및 계수들을 각각 추정할 수 있다.

[0047] 일반적으로 칼만 필터는 선형 시불변 시스템에 상태 변수를 추정하는 데에 최적의 필터로 알려져 있다. 본 발명의 실시예는 상기와 같이 ARMA 모델로 표현된 잡음 신호를 상태 변수 방정식에 포함시켜 칼만 필터에 의하여 지진과 입력 신호를 추정한다.

[0048] 수학적 식 3의 평균이동 부분을 새로운 변수 e_t 로 정의하면 수학적 식 3은 수학적 식 4와 같이 정리된다.

수학식 4

[0049]
$$b_t = -a_1 b_{t-1} - a_2 b_{t-2} - \dots - a_{na} b_{t-na} + e_t$$

[0050] 여기서, $e_t = \tilde{e}_t + c_1 \tilde{e}_{t-1} + \dots + c_{nc} \tilde{e}_{t-nc}$ 이다. 이러한 수학식 4에 정의된 b_t 는 수학식 3에 정의한 잡음 신호를 나타내며, a_i 는 b_t 의 변수($i=1, \dots, na$)를 나타낸다.

[0051] 이상과 같이 정의한 잡음 신호 b_t 는 지진계 센서에 지진파 입력이 무인가된 상태에서 얻은 잡음을 ARMA 모델링한 것이다. 여기서 실제 지진파 입력이 가해졌을 경우 지진계 센서 출력은 잡음 신호 b_t 와 지진파 입력이 더해져서 나타난다. 또한 지진계 센서 출력에는 추가로 백색 잡음이 포함될 수 있다.

[0052] 따라서, 지진파 입력 신호를 u_t 로 정의하고, 지진계 센서 출력에 u_t 와 b_t 이외에 추가로 포함될 수 있는 백색 잡음을 v_t 로 정의하면, 실제로 지진계 센서를 통해 출력되는 신호 y_t 는 아래의 수학식 5와 같이 u_t , b_t , v_t 의 합으로 표현될 수 있다.

수학식 5

[0053]
$$y_t = u_t + b_t + v_t$$

[0054] 이와 같이 지진계 센서의 출력 y_t 은 수학식 5와 같이 간단한 개념으로 나타낼 수 있다. 물론 이러한 출력 y_t 은 지진계 센서에 지진파 입력 신호, ARMA 모델로 모델링된 잡음 신호, 그리고 백색 잡음이 함께 입력되어 출력된 것과 같은 효과를 가진다.

[0055] 앞서 S220 단계와 같이 잡음 신호를 모델링한 이후에는 이를 바탕으로 상태 방정식을 생성하도록 한다. 즉, 상태공간모형 생성부(130)는 상기 모델링된 잡음 신호와 지진파 입력 신호를 이용하여 정의되는 지진계 센서의 출력 신호 y_t 를 상태 변수 x_t 를 사용한 상태 방정식으로 표현한다(S230).

[0056] 본 발명의 실시예에서 상태 방정식을 구성하는 방법을 더욱 상세히 설명하면 다음과 같다. 우선, 본 발명의 실시예에서 지진파 입력 신호는 다음의 수학식 6와 같이 마코프 프로세스(Markov Process)로 가정한다.

수학식 6

[0057]
$$u_t = \alpha_1 u_{t-1} + \alpha_2 u_{t-2} + \dots + \alpha_{na} u_{t-na} + f_t$$

[0058] 여기서, u_t 는 마코프 프로세스로 정의된 상기 지진파 입력 신호, α_i 는 임의의 상수, na 는 마코프 프로세스 차수, f_t 는 지진파 입력 신호에 포함된 백색 잡음을 나타낸다. α_i 는 필터 구성 시에 적절하게 튜닝이 필요하다.

[0059] 수학식 4에 의한 모델링된 잡음 신호 b_t , 수학식 6에 의한 지진파 입력 신호 u_t , 그리고 지진계 센서의 출력 y_t 을 나타내는 수학식 5를 결합하면, 수학식 7의 상태 방정식을 획득할 수 있다.

수학식 7

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= Fx_t + Gw_t \\ y_t &= Hx_t + v_t \end{aligned}$$

[0060]

[0061]

이러한 수학식 7의 상태 방정식은, 상태 변수 x_t 의 시간 전파(time propagation)를 나타내는 시스템 식(수학식 7의 첫 번째 식)과, 상태 변수의 조합에 의하여 지진계 센서의 출력을 구성하는 출력 식(수학식 7의 두 번째 식)으로 구분된다.

[0062]

구체적으로, 수학식 7의 시스템 식(첫 번째 식)에서, x_t 는 시스템의 상태를 나타내는 상태 변수로서, 잡음 신호

b_t 와 지진파 입력 신호 u_t 로 구성되며, $x_t = [b_{t-na+1} \cdots b_{t-1} b_t u_t]^T$ 이다. 그리고, 프로세

스 잡음 w_t 즉, 공정 잡음은 $w_t = [e_{t+1} f_{t+1}]^T$ 이다.

[0063]

또한 시스템 식에서, F 는 시스템 행렬, G 는 프로세스 잡음 행렬로서 아래의 수학식 8과 같이 표현된다.

수학식 8

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & & 0 & 0 \\ 0 & & 1 & & \vdots \\ \vdots & 0 & & \ddots & \\ -a_{na} \cdots -a_2 -a_1 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[0064]

[0065]

그리고, 수학식 7의 출력 식(두 번째 식)에서, y_t 는 지진계 센서의 출력, H 는 측정 행렬, v_t 는 백색 잡음을 나타낸다.

[0066]

H 는 아래의 수학식 9와 같이 표현된다.

수학식 9

$$H = [0 \cdots 0 \ 1 \ 1]$$

[0067]

[0068]

수학식 7과 같이 생성된 상태 방정식을 이용하여 칼만 필터를 구성하면 상태 방정식의 상태 변수를 추정할 수 있다. 즉, 수학식 7에서 x_t 는 시스템의 현재 상태에 대한 모든 정보를 나타내고 있지만 이를 직접적으로 측정할 수는 없으므로, 대신 잡음이 섞여 있는 형태의 지진계 센서의 출력을 이용하여 x_t 를 추정할 수 있다.

[0069]

이에 따라, 칼만 필터 연산부(140)는 수학식 7의 상태 방정식을 이용하여 구성한 칼만 필터를 통하여 지진계 센서의 출력 신호로부터 상태 변수를 추정하고, 결과적으로 상태 변수의 일부분인 지진파 입력 신호의 추정 값을 획득한다(S240). 여기서, 칼만 필터는 수학식 10으로 나타낼 수 있다.

수학식 10

$$\hat{x}_{t+1} = F\hat{x}_t + K(y_{t+1} - \hat{y}_{t+1})$$

여기서, $\hat{x}_t$ 는 시간 t에서의 상태 변수 추정 값, $\hat{x}_{t+1}$ 는 시간 t+1에서의 지진계 센서의 출력 신호를 이용한 상태 변수 추정 값이다. $\hat{y}_{t+1}$ 는 y_{t+1} 의 예측 값으로서 상태 변수 추정 값 $\hat{x}_t$ 를 통해 구할 수 있다.

더 상세하게는 시간 갱신(time update)으로 구해진 상태 변수 추정 값 $\hat{x}_{t+1}^- = F\hat{x}_t$ 로부터 $\hat{y}_{t+1}^- = H\hat{x}_{t+1}^-$ 를 이용하여 계산될 수 있다. K는 칼만이득 행렬로서 시스템 및 측정 행렬과 잡음의 분산으로부터 계산된다. K를 구하는 과정은 칼만 필터 이론으로부터 기 공지되어 있으므로 상세한 설명은 생략한다.

칼만 필터는 지진계 센서 출력으로부터 잡음을 억제하면서 지진과 입력을 추정하므로 결과적으로 지진계 센서의 동적 범위를 향상시킬 수 있다.

칼만 필터에부가적으로 저역통과 필터를 사용하면, 지진과 입력 신호의 추정이 더욱 정확해질 수 있다. 즉, 저역통과 필터부(150)는 칼만 필터를 사용하기 이전 단계 혹은 이후 단계에 위치하여 고주파 잡음을 억제하는 역할을 수행한다. 구체적으로는 칼만 필터를 사용하기 이전에 지진계 센서의 출력 신호를 저역통과 필터에 통과시킨 다음 칼만 필터를 구성하거나, 칼만 필터를 통해 얻은 지진과 입력 신호의 추정 값을 저역통과 필터에 통과시키는 방법을 사용할 수 있다.

저역통과 필터는 통과시키는 저주파 대역에서 지진과 신호에 왜곡이 발생하지 않도록 하기 위하여 통과 대역에서 리플이 최소화되어야 한다. 리플을 최소화하는 필터로는 타원형 필터(elliptic filter)를 사용할 수 있으며 통과 대역은 국내 지진계 주파수 규격인 0~50Hz을 사용할 수 있다.

본 발명의 실시예는 잡음에 대하여 ARMA 모델로 모델링한 이후 칼만 필터 방법을 사용하여 잡음을 억제하면서 지진과 신호를 추정할 수 있으며 이를 통하여 지진계 센서의 동적 범위를 향상시킬 수 있다. 이러한 동적 범위의 향상 효과는 아래의 시험 결과를 통하여 증명할 수 있다. 참고로 아래의 실시예는 상기 저역통과 필터를 칼만 필터의 전단계에 위치시킨 경우이다.

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 방법의 테스트를 위한 지진계의 셋업(Setup) 상태를 나타낸 도면이다. 도 3의 (a)는 시험에 사용된 지진계 센서로서 MEMS 공정으로 3축의 가속도계를 하나의 모듈로 일체화한 것이며 최대 2g 이상의 입력이 가능하다. 도 3의 (b)는 무진동 테이블 상에 장착된 가진기의 상부에 지진계를 부착하여 테스트하는 모습을 나타낸다.

여기서 배경 잡음에 대한 표준편차를 구할 때에는 가진기의 동작을 멈춘 정적 상태에서 데이터를 수집하도록 하였다. 그리고 가진기에 의한 지진과 입력 신호는 국내 지진계 규격에서 정한 최대 입력인 2g의 크기의 정현파 입력을 사용하였다. 또한 정현파의 주파수는 지진계 규격에서 정한 주파수 범위의 중간 정도인 27Hz를 사용하였다. 데이터 수집을 위하여 24bit ADC가 내장된 NI-9239 DAQ 장치를 사용하였으며, NI-9239 DAQ에서 PC로 데이터를 전송하고 PC 상에서 본 발명의 실시예에 따른 알고리즘을 수행하였다. 물론, 이러한 알고리즘은 지진계 센서에 자체적으로 내장되는 형태로도 구현될 수 있다.

도 4는 본 발명의 실시예에 사용된 저역통과 필터의 주파수 응답 특성을 나타낸 도면이다. 본 발명의 실시예에서 고주파 잡음을 제거하기 위한 저역통과 필터는 타원형 필터를 사용하였다. 도 4를 참조하면, 사용된 저역통과 필터는 고주파 잡음을 120dB 이상 억제하도록 설계된 것이며 이러한 특성은 고주파 잡음을 제거하기에 충분하다.

우선, 지진과 입력이 없는 정적 상태에서 획득한 센서의 측정 데이터로부터 저역통과 필터를 통과시켜 고주파수 잡음을 제거한 다음 예측 오차법을 이용하여 ARMA 모델의 계수를 추정하였다.

[0080] 본 발명의 실시예에서는 추정한 잡음 모델이 충분히 백색화 가능한지를 확인하기 위하여 자기상관함수(auto correlation function)의 비교를 수행하였으며, 그 결과는 아래의 도 5를 참조한다.

[0081] 도 5는 본 발명의 실시예에 따라 추정한 모델에 의한 백색화 가능 여부를 확인한 도면이다. 도 5의 (a)는 저역 통과 필터를 통과한 잡음 데이터, (b)는 저역통과 필터 이후 ARMA 모델링된 잡음 데이터에 대한 자기 상관 함수 결과를 각각 나타낸다. 이러한 도 5의 결과로부터, 단순히 저역통과 필터를 통과한 데이터와는 달리, 저역통과 필터 통과 이후 ARMA 모델링된 데이터는 백색화에 매우 근접한 것을 알 수 있으며 이를 통해 추정한 ARMA 모델이 타당한 것을 확인할 수 있다.

[0082] 다음은 추정한 ARMA 모델의 계수를 이용하여 칼만 필터를 구성하고 지진과 입력 신호를 추정한 결과를 설명한다. 먼저, 지진과 입력이 없는 동적 상태에서 추정한 결과를 설명한다. 지진과 입력이 없는 경우에 추정되는 값은 배경 잡음에 해당하며 그 표준 편차는 아래의 표 1에 나타내었다.

표 1

	표준편차(g)
센서 출력	2.04e-5
저역통과 필터 통과 후	1.02e-5
칼만 필터 통과 후	7.72e-6

[0084] 표 1을 참조하면, 센서 출력으로부터 직접 추정한 배경 잡음보다 저역통과 필터를 통과시킨 이후에 추정한 배경 잡음의 경우 그 표준 편차가 약 0.5배로 감소한 것을 알 수 있고 칼만 필터를 통과한 이후에는 약 0.35배까지 감소한 것을 알 수 있다. 이를 통해, 칼만 필터의 통과에 따라 배경 잡음이 백색화에 근접해진 것을 확인할 수 있다.

[0085] 다음으로 지진과 입력이 가해진 상태에서 추정한 결과를 설명한다. 27Hz의 정현파를 2g 입력으로 가하여 저역통과 필터를 통과한 이후 및 칼만 필터의 추정 이후의 결과를 각각 비교하였다.

[0086] 도 6은 본 발명의 실시예에서 지진과 입력 신호가 있을 때 지진계 센서의 출력 데이터, 저역통과 필터 통과 데이터, 칼만 필터 통과 데이터를 각각 비교한 도면이다. 도 6의 결과는 칼만 필터의 추정 값은 센서 출력 데이터 및 저역통과 필터 통과 데이터와도 비슷하게 일치함을 보여준다.

[0087] 여기서, 본 발명의 실시예에서 확인해야 하는 특성인 지진계 센서의 동적 범위를 구하기 위하여, 도 6으로부터 각 출력 데이터의 최대값을 구한 결과, 세 가지 데이터 모두 2g에 거의 근접한 1.8g 정도의 값을 나타내었다. 여기서 각각의 최대값을 수학적 1에 적용하여 센서의 동적 범위를 구한 결과는 표 2와 같다.

표 2

	동적범위(dB)
센서 출력	99
저역통과 필터 통과 후	105
칼만 필터 통과 후	108

[0089] 표 2를 참조하면, 저역통과 필터를 통과한 이후의 경우 단순히 센서 출력의 경우보다 6dB 정도 동적 범위가 개선되었고 칼만 필터를 통과한 이후의 경우는 9dB 정도 동적 범위가 개선된 것을 알 수 있다. 결과적으로, 본 발명의 실시예에 따른 방법을 MEMS 기반의 3축 가속도 형태의 지진계에 적용하여 성능을 검증한 결과, 단순히 저역통과 필터를 사용한 경우에 비하여 동적 범위를 3dB 가량 개선시킬 수 있었다. 즉, 본 발명의 실시예에 따른 ARMA 모델링 및 칼만 필터 방법에 의하면 흔히 사용하는 저역통과 필터 방법보다 동적 범위를 크게 개선할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

[0090] 이상과 같이 본 발명의 실시예는 잡음을 ARMA 모델로 모델링 한 후 칼만 필터 방법을 사용하여 잡음을 억제하고 지진과 신호를 추정한다. 즉, 입력이 무인가된 상태에서의 센서 잡음을 ARMA 모델로 모델링하고 해당 모델을 식별한 다음, 모델링된 잡음과 지진과 입력을 칼만 필터식에 포함시켜 칼만 필터에 의한 지진과 입력을 추정하는 과정을 포함한다. 결과적으로 본 발명에 따른 지진계 센서의 동적 범위 향상 방법 및 그 장치에 따르면, 지진계 센서가 가지는 잡음 성분을 최소화하면서 지진과 신호를 추정함에 따라 지진계 센서의 동적 범위를 향상시킬 수

있는 이점이 있다.

[0091] 본 발명은 도면에 도시된 실시예를 참고로 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 본 기술 분야의 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 다른 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호 범위는 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의하여 정해져야 할 것이다.

부호의 설명

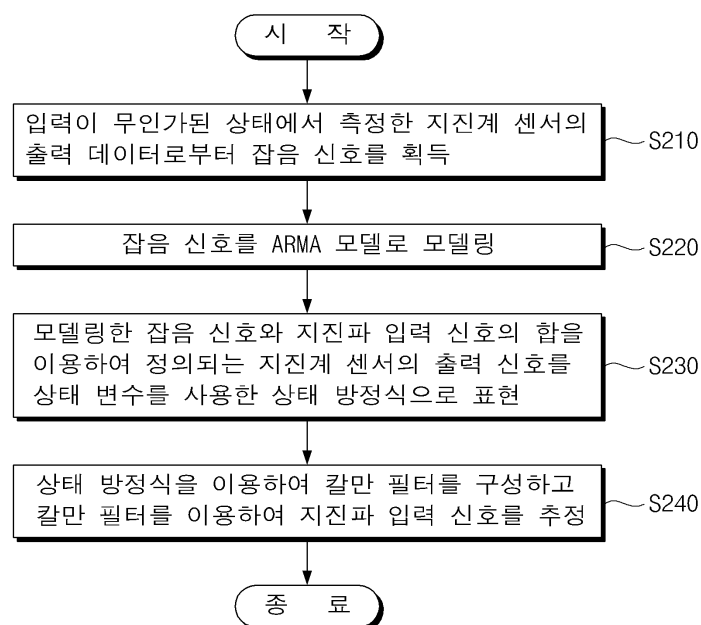
[0092] 100: 지진계 센서의 동적 범위 향상 장치
110: 잡음 획득부 120: ARMA 모델링부
130: 상태공간모형 생성부 140: 칼만 필터 연산부
150: 저역통과 필터부

도면

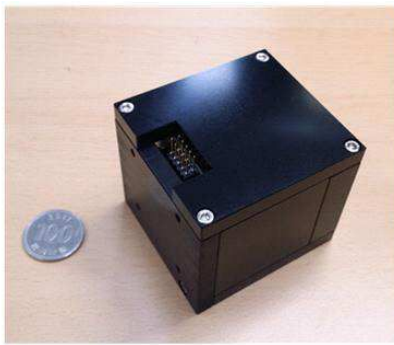
도면1



도면2



도면3

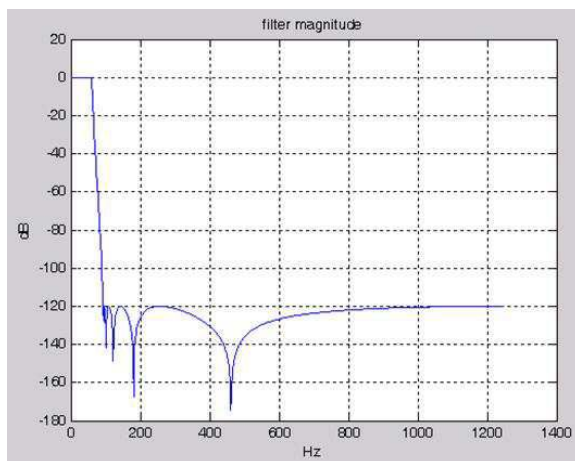


(a)

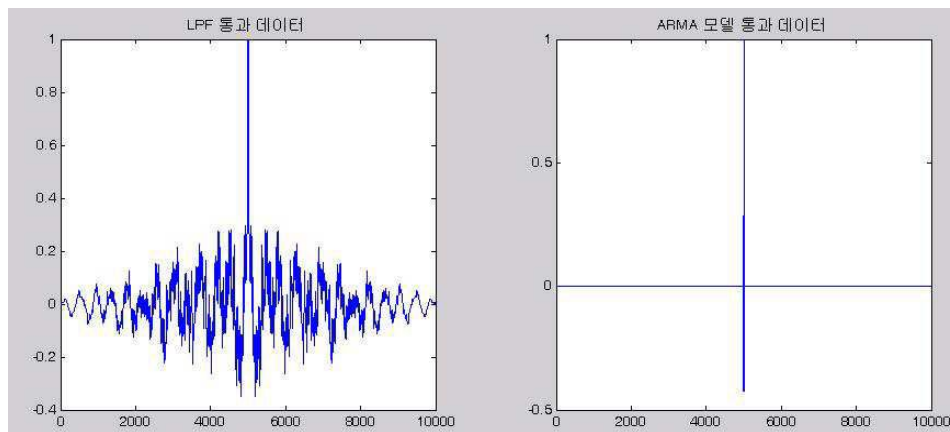


(b)

도면4



도면5



도면6

