

(19)



**Евразийское
патентное
ведомство**

(11) **038803**

(13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента
2021.10.21

(21) Номер заявки
201700588

(22) Дата подачи заявки
2017.12.25

(51) Int. Cl. **H03H 21/00** (2006.01)
H04B 1/10 (2006.01)
G01S 7/36 (2006.01)

(54) **СПОСОБ АДАПТИВНОЙ ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ И ФИЛЬТР ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ**

(43) **2019.06.28**

(96) **2017000154 (RU) 2017.12.25**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
"ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ ИМ.
Н.Л. ДУХОВА" (RU)**

(56) WO-A1-2002089116
US-A-5414796
RU-C2-2599928
RU-C2-2349048
RU-C2-2519041

(72) Изобретатель:
**Панферов Дмитрий Владимирович
(RU)**

(57) Изобретение относится к вычислительной технике, измерительной технике, представляет собой способ адаптивной цифровой фильтрации и адаптивный цифровой фильтр для обработки измерительного сигнала и может использоваться для фильтрации сигналов в ЭВМ, микроконтроллерах (микро-ЭВМ), а также для формирования программного обеспечения ЭВМ с целью обработки сигналов, в том числе измерительных, на фоне импульсных помех. Сущность способа заключается в том, что адаптация рекурсивного фильтра 1-го порядка осуществляется посредством отмасштабированного значения вычисленного значения абсолютной величины скорости изменения входного сигнала в одной операции фильтрации. Сущность заявляемого устройства заключается в применении детектора абсолютного значения скорости изменения входного сигнала и масштабирующего звена для адаптации по крайней мере одного коэффициента рекурсивного фильтра 1-го порядка в соответствии с заявляемым методом адаптивной фильтрации. Техническим результатом является подавление импульсных помех при максимальном сохранении крутизны фронта действительного скачкообразного изменения сигнала. При этом фильтр использует минимальные вычислительные ресурсы и может быть применен в системах и приборах со сверхнизким энергопотреблением.

B1

038803

038803

B1

Адаптивный фильтр для обработки измерительного сигнала относится к вычислительной технике и может использоваться для фильтрации сигналов в ЭВМ, микроконтроллерах (микро-ЭВМ), а также для формирования программного обеспечения ЭВМ и может использоваться в системах, где требуется обработка измерительных сигналов.

Известен адаптивный фильтр, содержащий последовательно соединенные блок дискретного преобразования Фурье (ДПФ), вход которого является первым входом адаптивного фильтра, блок перемножения, сумматор, вычитатель, второй вход которого является вторым входом адаптивного фильтра, и блок формирования весового коэффициента, выходы которого подключены к другой группе входов блока перемножения, а также блок деления, первая группа входов которого объединена с соответствующими входами блока нормирующих коэффициентов и подключена к соответствующим выходам блока ДПФ, а вторая группа входов подключена к соответствующим выходам блока нормирующих коэффициентов. Авторское свидетельство СССР № 1116537, МПК H03N 21/00, 30.09.1984.

Известно устройство адаптивного оценивания сосредоточенной помехи, содержащее первый и второй адаптивные фильтры, сумматор, блок вычисления отсчетов корреляционной функции, блок вычисления коэффициентов управления адаптивных фильтров, первый и второй сумматоры, первый и второй блоки вычисления кумулянтов. Патент РФ № 2381620, МПК H04B 1/10, 10.02.2010.

Известен адаптивный фильтр для оценивания нестационарных процессов, который может использоваться для фильтрации сигналов в специализированных и гибридных ЭВМ, а также для формирования программного обеспечения ЭВМ. Для повышения точности и устойчивости фильтрации нестационарных процессов в структуру общеизвестного фильтра Калмана введены дополнительные элементы и связи, реализующие оптимальную коррекцию фильтра по среднеквадратическому критерию Красовского и включающий фильтр коррекции - фильтр оценивания "невязки", которая используется для настройки основного фильтра и фильтра коррекции с применением алгоритма нетерминального управления. Патент РФ № 2110883, МПК H03N 21/00, 10.05.1998.

Недостатками вышеприведенных устройств являются сравнительно сложная структура, большое количество вычислительных операций, что приводит к необходимости использовать более производительные вычислительные ресурсы, ограничивающие возможности их применения в приборах и устройствах со сверхнизким энергопотреблением.

Известен способ адаптивной цифровой фильтрации и фильтр для его реализации. Способ характеризуется тем, что он включает в себя первую операцию адаптации коэффициента фильтрации в зависимости от принятой выборки данных и вторую операцию фильтрации путем приложения адаптированного коэффициента фильтрации к принятой выборке данных, причем первая и вторая операции синхронизированы таким образом, что определение адаптированных коэффициентов фильтрации и модулированных выборок данных производится поочередно. Фильтр, который включает в себя средство фильтрации и средство адаптации, характеризуется тем, что средство адаптации осуществляет адаптацию коэффициента фильтрации для получения адаптированного коэффициента, а средство фильтрации прикладывает адаптивный коэффициент фильтрации к принятой выборке данных, причем работа средства фильтрации и средства адаптации синхронизирована таким образом, что определение адаптивных коэффициентов фильтрации и модулированных выборок данных производится поочередно. Заявка РФ № 97105757, МПК H03N 21/00, 20.04.1999. Данное техническое решение принято в качестве прототипа.

Недостатком указанного способа и фильтра для его реализации является то, что первая операция адаптации коэффициента фильтрации и вторая операция приложения адаптированного коэффициента фильтрации к принятой выборке данных производится поочередно, что приводит к запаздыванию изменения выходного сигнала, представленного последовательностью выходных выборок данных, по отношению к входному сигналу, представленного последовательностью принятых выборок данных. Кроме того, для реализации указанного способа необходимо по крайней мере восемь выборок данных и сравнительно большое количество математических операций, что увеличивает время установления выходного сигнала и затрудняет применение указанного способа в приложениях с ограниченными вычислительными ресурсами, в частности в приборах со сверхнизким потреблением.

Техническим результатом настоящего изобретения является снижение требований к вычислительным ресурсам при реализации способа адаптивной фильтрации путем минимизации математических операций, необходимых для выполнения адаптивной фильтрации; уменьшение времени установления выходного сигнала: обеспечение подавления высокоамплитудных импульсных помех при сохранении крутизны фронта скачкообразного изменения сигнала, причем степень подавления импульсных помех увеличивается пропорционально их амплитуде.

Технический результат достигается тем, что в способе адаптивной цифровой фильтрации, заключающийся в том, что входной сигнал подают одновременно на операцию адаптации по крайней мере одного коэффициента фильтрации в зависимости от принятой выборки данных и на операцию рекурсивной фильтрации с по крайней мере одним изменяемым коэффициентом фильтрации, адаптацию по крайней мере одного коэффициента фильтрации осуществляют путем вычисления абсолютного значения скорости изменения входного сигнала, представленного последовательностью дискретных выборок, с последующим масштабированием полученного по крайней мере одного адаптируемого коэффициента фильт-

рации; полученный по крайней мере один адаптируемый коэффициент фильтрации прикладывают к операции фильтрации, изменяя частотные свойства операции фильтрации таким образом, чтобы уменьшить или исключить в выходном сигнале импульсные помехи. Вычисление по крайней мере одного адаптируемого коэффициента фильтрации и его применение в операции фильтрации производится на текущей выборке данных.

Фильтрация производится в соответствии с выражением, описывающим рекурсивный фильтр 1-го порядка:

$$y(n) = (x(n) + y(n-1) * (k(n) - 1)) / k(n),$$

где $x(n)$ - входная выборка сигнал в текущий дискретный момент времени;

$y(n)$ - выходная выборка сигнал в текущий дискретный момент времени;

$x(n-1)$ - входная выборка сигнал в предыдущий дискретный момент времени;

$k(n)$ - адаптируемый коэффициент фильтрации, зависящий пропорционально через операцию масштабирования от результата вычисления скорости изменения входного сигнала.

Адаптируемый коэффициент $k(n)$ вычисляется как произведение модуля скорости изменения входного сигнала $|x'(n)|$ на масштабирующий коэффициент K_a . Скорость изменения входного сигнала определяется вычислением дискретной производной входного сигнала, являющейся обратной разностью двух соседних отсчетов - на текущей операции и на предыдущей операции в соответствии с выражением:

$$x'(n) = x(n) - x(n-1).$$

Скорость изменения входного сигнала определяется с помощью дифференцирующего звена, представленного рекурсивным фильтром верхних частот 1-го порядка:

$$x'(n) = 1 - a * x(n) + b * y(n-1),$$

где $x(n)$ - входная выборка сигнал в текущий дискретный момент времени;

$x'(n)$ - дифференциал входного сигнала;

a, b - коэффициенты, определяющие параметры дифференцирующего звена.

Технический результат достигается также тем, что в адаптивном фильтре, который включает в себя детектор абсолютного значения скорости изменения входного сигнала, масштабирующее звено и перестраиваемый фильтр нижних частот первого порядка, имеющий один вход для подачи обрабатываемого сигнала, второй вход для подачи сигнала изменения его частоты среза и выход, один вход перестраиваемого фильтра нижних частот первого порядка соединен со входом детектора абсолютного значения скорости изменения входного сигнала, выход детектора абсолютного значения скорости изменения входного сигнала соединен со входом масштабирующего звена, выход масштабирующего звена соединен со вторым входом перестраиваемого фильтра нижних частот первого порядка для подачи сигнала изменения его частоты среза, при этом сигнал с выхода детектора скорости изменения входного сигнала через масштабирующее звено перестраивает фильтр нижних частот первого порядка таким образом, что при наличии импульсной помехи в обрабатываемом сигнале частота среза изменяется обратно пропорционально величине амплитуды импульсной помехи.

В качестве основы способа адаптивной цифровой фильтрации импульсных помех используется способ рекурсивной фильтрации нижних частот 1-го порядка, требующий минимума вычислительных ресурсов для фильтрации и обладающий простотой обеспечения устойчивости, а адаптация, т.е. адаптивная подстройка, по крайней мере одного коэффициента фильтрации производится путем определения абсолютного значения скорости изменения входного сигнала. Кроме того, рекурсивная фильтрация при одинаковом порядке с нерекурсивной фильтрацией обеспечивает большую эффективность. При этом детектирование скорости изменения сигнала производится посредством использования либо способа рекурсивной фильтрации верхних частот 1-го порядка, либо математической операции вычисления дискретной производной сигнала, являющейся разностью двух соседних дискретных отсчетов. При этом вычисление адаптированных коэффициентов и их применение в рекурсивном фильтре нижних частот первого порядка производится на текущей выборке данных.

Сущность устройства, использующего способ адаптивной фильтрации, заключается в применении детектора абсолютного значения скорости изменения входного сигнала и масштабирующего звена, выполняющего операцию масштабирования, т.е. умножения на коэффициент масштабирования, для адаптации по крайней мере одного коэффициента рекурсивного фильтра 1-го порядка в соответствии со способом адаптивной фильтрации.

Сущность изобретения, поясняется чертежами.

На фиг. 1 представлена структурная схема, где:

1 - детектор абсолютного значения скорости изменения входного сигнала;

2 - перестраиваемый фильтр нижних частот первого порядка;

3 - масштабирующее звено.

На фиг. 2 представлены исходный сигнал и результат его обработки адаптивным фильтром.

При реализации способа сигнал, представленный дискретными выборками $x[n]$, одновременно является входным для операции адаптации по крайней мере одного коэффициента фильтрации и для операции фильтрации. На операции адаптации производится вычисление абсолютного значения скорости

изменения входного сигнала посредством вычисления абсолютного значения его производной по текущей выборке сигнала $x[n]$ и предшествующей выборке сигнала $x[n-1]$:

$$|x'[n]| = |x[n] - x[n-1]| \quad (1)$$

или вычисления абсолютного значения его дифференциала на основе способа рекурсивной фильтрации верхних частот первого порядка (дифференцирующего звена):

$$|x'[n]| = |1 - a*x[n] + b*x'[n-1]|, \quad (2)$$

где $x[n]$ - входная выборка сигнала в текущий дискретный момент времени;

$x'[n-1]$ - выходная выборка сигнала рекурсивного фильтра верхних частот в предшествующий дискретный момент времени;

a, b - коэффициенты, определяющие параметры рекурсивного фильтра верхних частот 1-го порядка.

Абсолютное значение скорости изменения входного сигнала $|x'[n]|$ подвергается масштабированию путем умножения на коэффициент масштабирования Ka , по крайней мере один, в результате чего получается по крайней мере один адаптируемый коэффициент фильтрации $k[n]$.

$$k[n] = |x'[n]| * Ka. \quad (3)$$

Адаптируемый коэффициент фильтрации $k[n]$, по крайней мере один, используется в операции фильтрации, описываемой выражением рекурсивного фильтра 1-го порядка:

$$y[n] = (x[n] + y[n-1] * (k[n] - 1)) / k[n], \quad (4)$$

где $x[n]$ - входная выборка сигнала в текущий дискретный момент времени;

$y[n]$ - выходная выборка сигнала в текущий дискретный момент времени;

$y[n-1]$ - выходная выборка сигнала в предшествующий дискретный момент времени;

$k[n]$ - адаптируемый коэффициент фильтрации, зависящий пропорционально через операцию масштабирования от результата вычисления абсолютного значения скорости изменения входного сигнала $|x'[n]|$.

При воздействии импульсной помехи на входной сигнал с ростом амплитуды этой помехи будет расти вычисляемое по формулам (1) или (2) абсолютное значение скорости изменения входного сигнала $|x'[n]|$, и, соответственно, будет расти вычисляемый по формуле (3) адаптируемый коэффициент $k[n]$, что будет приводить к снижению частоты среза рекурсивного фильтра нижних частот 1-го порядка, описываемого выражением (4), вызывая подавление указанной импульсной помехи. Таким образом, применение операции вычисления абсолютного значения скорости изменения сигнала для адаптации коэффициента фильтрации позволяет обеспечить увеличение степени подавления импульсных помех пропорционально увеличению их амплитуды. В то же время при скачкообразном изменении сигнала с одного установившегося состояния в другое установившееся состояние во втором установившемся состоянии абсолютное значение скорости изменения сигнала $|x'[n]|$ будет стремиться к нулю, что не будет приводить к снижению частоты среза рекурсивного фильтра нижних частот первого порядка. В результате задержка выходного сигнала фильтра при скачкообразном изменении сигнала не превысит один дискретный временной интервал.

Как показано на вышеприведенных выражениях (1)-(4), операции рекурсивной фильтрации 1-го порядка требуют не более 4 математических операций, следовательно, предложенный способ адаптивной фильтрации в целом требует не более 10 математических операций вместе с нахождением абсолютного значения (модуля) скорости изменения сигнала и его масштабированием. Такое минимальное количество математических операций для реализации способа адаптивной фильтрации импульсных помех (не более 10) позволяет получить малое время установления выходного сигнала и использовать его в устройствах с ограниченными вычислительными ресурсами, в том числе в приборах со сверхнизким энергопотреблением.

Устройство работает следующим образом.

Входной сигнал $x[n]$ подается одновременно на вход детектора абсолютного значения скорости изменения входного сигнала 1 и на первый вход перестраиваемого фильтра нижних частот первого порядка 2. В детекторе 2 производится вычисление абсолютного значения скорости изменения входного сигнала $|x'[n]|$ в соответствии с выражениями (1) или (2). Вычисленное абсолютное значение скорости изменения входного сигнала $|x'[n]|$ подается на вход масштабирующего звена 3, где в соответствии с выражением (3) производится вычисление по крайней мере одного адаптируемого коэффициента $k[n]$, подаваемого на второй вход перестраиваемого фильтра нижних частот 1-го порядка 2, описываемого выражением (4), изменяя при этом его частоту среза пропорционально абсолютному значению скорости изменения входного сигнала.

Фиг. 2б иллюстрирует результат обработки заявляемым адаптивным фильтром исходного сигнала (фиг. 2а), содержащего высокоамплитудные импульсные помехи (А) и скачкообразное изменение сигнала (В). Результатом работы заявляемого фильтра является практически полное подавление высокоамплитудных импульсных помех (А) при сохранении крутизны фронта скачкообразного изменения сигнала (В), а также подавление низкоамплитудных шумов составляющих.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

1. Способ адаптивной цифровой фильтрации, заключающийся в том, что входной сигнал подают одновременно на операцию адаптации по крайней мере одного коэффициента фильтрации в зависимости от принятой выборки данных и на операцию рекурсивной фильтрации с по крайней мере одним изменяемым коэффициентом фильтрации, отличающийся тем, что адаптацию по крайней мере одного коэффициента фильтрации осуществляют путем вычисления абсолютного значения скорости изменения входного сигнала, представленного последовательностью дискретных выборок, с последующим масштабированием полученного по крайней мере одного адаптируемого коэффициента фильтрации; полученный по крайней мере один адаптируемый коэффициент фильтрации прикладывают к операции фильтрации, изменяя частотные свойства операции фильтрации таким образом, чтобы уменьшить или исключить в выходном сигнале импульсные помехи.

2. Способ адаптивной цифровой фильтрации по п.1, отличающийся тем, что вычисление по крайней мере одного адаптируемого коэффициента фильтрации и его применение в операции фильтрации производится на текущей выборке данных.

3. Способ адаптивной цифровой фильтрации по пп.1, 2, отличающийся тем, что фильтрация производится в соответствии с выражением, описывающим рекурсивный фильтр 1-го порядка:

$$y(n) = (x(n) + y(n-1) * (k(n) - 1)) / k(n),$$

где $x(n)$ - входная выборка сигнала в текущий дискретный момент времени;

$y(n)$ - выходная выборка сигнала в текущий дискретный момент времени;

$x(n-1)$ - входная выборка сигнала в предыдущий дискретный момент времени;

$k(n)$ - адаптируемый коэффициент фильтрации, зависящий пропорционально через операцию масштабирования от результата вычисления скорости изменения входного сигнала.

4. Способ адаптивной цифровой фильтрации по п.3, отличающийся тем, что адаптируемый коэффициент $k(n)$ вычисляется как произведение модуля скорости изменения входного сигнала $|x'(n)|$ на масштабирующий коэффициент K_a .

5. Способ адаптивной цифровой фильтрации по п.3, отличающийся тем, что скорость изменения входного сигнала определяется вычислением дискретной производной входного сигнала, являющейся обратной разностью двух соседних отсчетов - на текущей операции и на предыдущей операции в соответствии с выражением:

$$x'(n) = x(n) - x(n-1).$$

6. Способ адаптивной цифровой фильтрации по п.3, отличающийся тем, что скорость изменения входного сигнала определяется с помощью дифференцирующего звена, представленного рекурсивным фильтром верхних частот 1-го порядка:

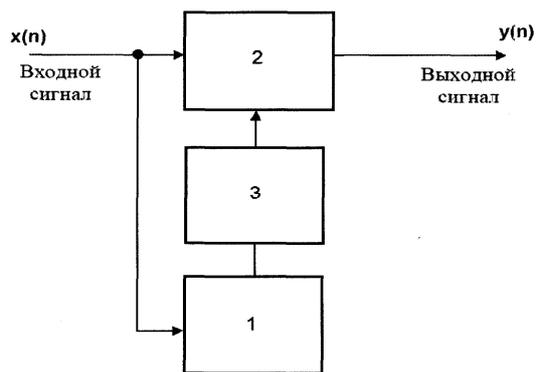
$$x'(n) = 1 - a * x(n) + b * y(n-1),$$

где $x(n)$ - входная выборка сигнала в текущий дискретный момент времени;

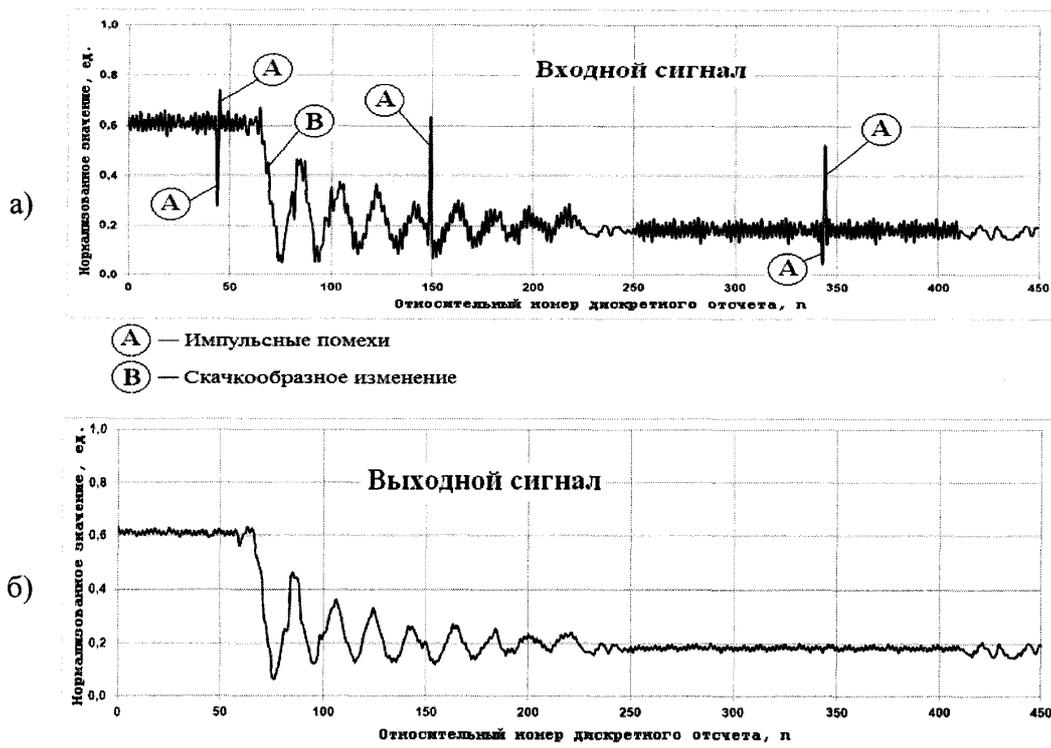
$x'(n)$ - дифференциал входного сигнала;

a, b - коэффициенты, определяющие параметры дифференцирующего звена.

7. Адаптивный фильтр, который включает в себя детектор абсолютного значения скорости изменения входного сигнала, масштабирующее звено и перестраиваемый фильтр нижних частот первого порядка, имеющий один вход для подачи обрабатываемого сигнала, второй вход для подачи сигнала изменения его частоты среза и выход, отличающийся тем, что один вход перестраиваемого фильтра нижних частот первого порядка соединен со входом детектора абсолютного значения скорости изменения входного сигнала, выход детектора абсолютного значения скорости изменения входного сигнала соединен со входом масштабирующего звена, выход масштабирующего звена соединен со вторым входом перестраиваемого фильтра нижних частот первого порядка для подачи сигнала изменения его частоты среза, при этом сигнал с выхода детектора скорости изменения входного сигнала через масштабирующее звено перестраивает фильтр нижних частот первого порядка таким образом, что при наличии импульсной помехи в обрабатываемом сигнале частота среза изменяется обратно пропорционально величине амплитуды импульсной помехи.



Фиг. 1



Фиг. 2