

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2552183

СПОСОБ ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ИМПУЛЬСНОГО ТИПА ПО ВРЕМЕННЫМ ДАННЫМ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А." (СГТУ имени Гагарина Ю.А.) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014120266

Приоритет изобретения 20 мая 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 29 апреля 2015 г.

Срок действия патента истекает 20 мая 2034 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий





**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014120266/08, 20.05.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
20.05.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 20.05.2014

(45) Опубликовано: 10.06.2015 Бюл. № 16

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2464704 C1, 20.10.2012, (см. прод.)

Адрес для переписки:

410054, г.Саратов, ул. Политехническая, 77,
СГТУ имени Гагарина Ю.А., патентно-
лицензионный отдел ЦТТ, Галковской И.Л.

(72) Автор(ы):

Павлов Алексей Николаевич (RU),
Макаров Валерий Анатольевич (RU),
Москаленко Ольга Игоревна (RU),
Короновский Алексей Александрович (RU),
Храмов Александр Евгеньевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

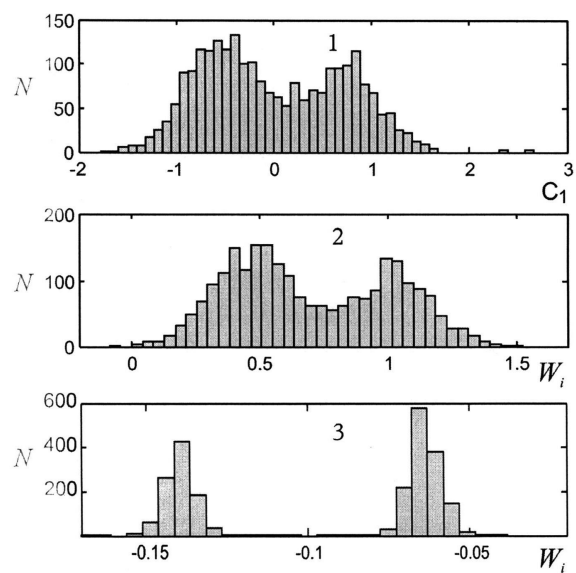
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А." (СГТУ
имени Гагарина Ю.А.) (RU)

(54) СПОСОБ ВЫДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ИМПУЛЬСНОГО ТИПА ПО ВРЕМЕННЫМ ДАННЫМ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области биомедицинских технологий и может использоваться для автоматического выделения сигналов импульсного типа по временным данным нейрофизиологических систем. Достижимый технический результат - выделение сигналов нейронов из суммарной электрической активности нейронного ансамбля для обеспечения автоматической настройки параметров для распознавания импульсных сигналов при наличии помех. Способ выделения сигналов импульсного типа по временным данным включает в себя регистрацию сигнала, представляющего собой аддитивную сумму сигналов ансамбля систем, проведение его порогового детектирования с последующим центрированием всех импульсов, амплитуда которых превышает пороговый

уровень, определение характерных форм импульсов каждой системы, соответствующих максимумам функции плотности распределения масштабных коэффициентов первых главных компонент, нахождение оптимального набора параметров, максимизирующих различия между характерными формами импульсов в пространстве вейвлет-коэффициентов, проводят расчет коэффициентов вейвлет-преобразования, после чего проводят фильтрацию импульсов с использованием фильтра нижних частот по характерным формам импульсов каждой системы, а частоту среза фильтра определяют в диапазоне 100-150 Гц из условия максимизации различий между характерными формами импульсов в пространстве вейвлет-коэффициентов. 1 з.п. ф-лы, 3 ил.



Фиг. 3

(56) (продолжение):

RU 2440608 C1, 20.01.2012, RU 2109406 C1, 20.04.1998, EP 1811681 A1, 25.07.2007

RU 2 5 5 2 1 8 3 C 1

RU 2 5 5 2 1 8 3 C 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2014120266/08, 20.05.2014**(24) Effective date for property rights:
20.05.2014

Priority:

(22) Date of filing: **20.05.2014**(45) Date of publication: **10.06.2015** Bull. № 16

Mail address:

**410054, g.Saratov, ul. Politekhnikeskaja, 77, SGTU
imeni Gagarina Ju.A., patentno-litsenizionnyj otdel
TsTT, Galkovskoj I.L.**

(72) Inventor(s):

**Pavlov Aleksej Nikolaevich (RU),
Makarov Valerij Anatol'evich (RU),
Moskalenko Ol'ga Igorevna (RU),
Koronovskij Aleksej Aleksandrovich (RU),
Khramov Aleksandr Evgen'evich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego
professional'nogo obrazovanija "Saratovskij
gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni
Gagarina Ju.A." (SGTU imeni Gagarina Ju.A.)
(RU)**

(54) **METHOD OF PULSE SIGNAL ISOLATION BY TIME DATA**

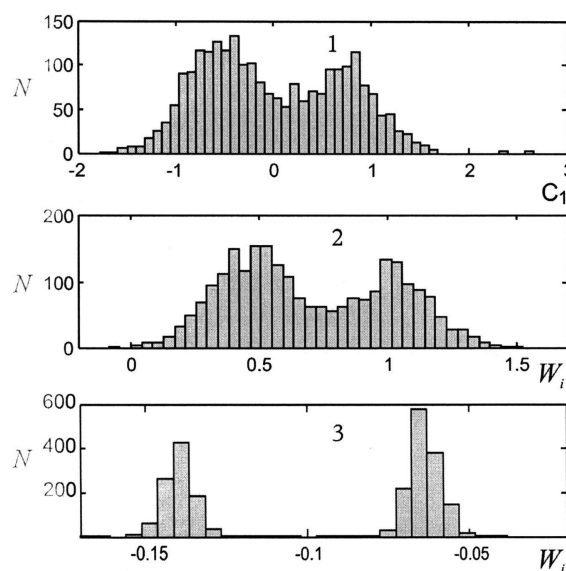
(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: proposed method comprises registration of signal composed of the additive sum of signals of systems ensemble. It is subjected to threshold rectification with further alignment of all pulses with amplitude exceeding the threshold level. Characteristic pulse shapes of every system corresponding to peaks of scale factor distribution density of the first main components are defined. Optimum set of parameters maximizing the differences between characteristic pulse shapes in wavelet-factor space is defined. Wavelet-conversion factors are calculated. Then, pulses are filtered with the help of low-pass filter by characteristic pulse shaped of every system. Filter frequency cut-off is defined in the range of 100-150 Hz proceeding from maximization of differences between said shapes in wavelet factor space.

EFFECT: pulse signal isolation by time data.

2 cl, 3 dwg



Фиг. 3

Изобретение относится к области биомедицинских технологий и предназначено для автоматического выделения сигналов импульсного типа по временным данным нейрофизиологических систем. В частности, изобретение может применяться для распознавания сигналов электрической активности отдельных нейронов в составе нейронного ансамбля по сигналам внеклеточного электрического потенциала, а также при решении более общей задачи выделения характерных паттернов импульсного типа при наличии помех.

Задача распознавания формы сигнала в присутствии помех возникает во многих областях науки и техники, включая изучение процессов кодирования и передачи информации в нейронных сетях. Традиционно в нейрофизиологических исследованиях используется метод регистрации мультинейронной активности, что позволяет получить информацию о динамике нейронов, расположенных в некоторой локальной области вблизи микроэлектрода [K. Harris, D. Henze, J. Csicsvari, H. Hirase, G. Buzsaki. J. Neurophysiol. 84 (2000), 401-414, E.R. Kandel, J.H. Schwartz, T.M. Jessell. Principles of neural science. 4 ed. New York: McGrawHill, 2000].

Для анализа информационного кода, передаваемого нейронным ансамблем, необходимо выделить в регистрируемом сигнале активность отдельных нервных клеток. В настоящее время известны различные способы решения данной задачи, основанные на расчете геометрических характеристик, факторном анализе и вейвлет-преобразовании [M. Lewicki. Net. Com. Neu. Sys. 9 (1998), R53-R78, J. Letelier, P. Weber. J. Neurosci. Methods 101 (2000), 93-106, E. Hurlata, R. Segev, Y. Shapira, M. Benveniste, E. Ben-Jacob. Phys. Rev. Lett. 85 (2000), 4637-4640, R. Quiñero, Z. Nadasdy, Y. Ben-Shaul. Neural Computation 16 (2004), 1661-1687, A.N. Pavlov, V.A. Makarov, I. Makarova, F. Panetsos, Natural Computing 6 (2007), 269-281, А.А. Короновский, В.А. Макаров, А.Н. Павлов, Е.Ю. Ситникова, А.Е. Храмов. Вейвлеты в нейродинамике и нейрофизиологии. М.: Физматлит, 2013 и др.]. В частности, такие способы позволяют проводить распознавание формы сигналов при относительно небольшом уровне шума. При высоком уровне помех они не обеспечивают приемлемое качество решения задачи распознавания сигналов и возникает потребность в снижении ошибки распознавания, в том числе за счет адаптивной фильтрации.

Наиболее близким к заявляемому способу является способ вейвлетной классификации с учетом формы потенциала действия, предложенный в [A.N. Pavlov, V.A. Makarov, I. Makarova, F. Panetsos, Natural Computing 6 (2007), 269-281]. В данном способе снимают сигнал, представляющий собой аддитивную сумму сигналов ансамбля систем, проводят пороговое детектирование с последующим центрированием всех импульсов, амплитуда которых превышает пороговый уровень, определяют характерные формы импульсов каждой системы, соответствующие максимумам функции плотности распределения масштабных коэффициентов первых главных компонент [M. Lewicki. Net. Com. Neu. Sys. 9 (1998), R53-R78, J. Letelier, P. Weber. J. Neurosci. Methods 101 (2000), 93-106], находят оптимальный набор параметров, максимизирующий различия между характерными формами импульсов в пространстве вейвлет-коэффициентов, проводят расчет коэффициентов вейвлет-преобразования при найденном оптимальном наборе параметров и далее с использованием выбранных вейвлет-коэффициентов осуществляют более точную классификацию.

Этот способ обеспечивает возможность снижения ошибки распознавания импульсных сигналов на 30-40% (в зависимости от формы импульса и уровня шума) по сравнению с методами классификации, не предусматривающими настройку параметров вейвлет-преобразования. Его эффективность может быть также улучшена за счет дополнительной фильтрации экспериментальных сигналов [A.N. Pavlov, D.V. Dumsky,

A.N. Tupitsyn, O.N. Pavlova, F. Panetsos, V.A. Makarov. Proc. of SPIE 6085 (2006) 608501].

Однако он не предусматривает возможность автоматизации выбора полосы частот фильтра, что приводит к существенной зависимости ошибки распознавания от формы нейронных потенциалов действия.

- 5 Задачей изобретения является разработка универсального способа, позволяющего проводить выделение сигналов нейронов из суммарной электрической активности нейронного ансамбля, который обеспечивает автоматическую настройку параметров для распознавания импульсных сигналов при наличии помех.

- 10 Поставленная задача решается тем, что в способе выделения сигналов импульсного типа по временным данным, включающем в себя регистрацию сигнала, представляющего собой аддитивную сумму сигналов ансамбля систем, проведение его порогового детектирования с последующим центрированием всех импульсов, амплитуда которых превышает пороговый уровень, определение характерных форм импульсов каждой системы, соответствующих максимумам функции плотности распределения масштабных
- 15 коэффициентов первых главных компонент, нахождение оптимального набора параметров, максимизирующих различия между характерными формами импульсов в пространстве вейвлет-коэффициентов, проведение расчета коэффициентов вейвлет-преобразования при найденном оптимальном наборе параметров, согласно изобретению фильтрацию импульсов с использованием фильтра нижних частот проводят после
- 20 расчета коэффициентов вейвлет-преобразования по характерным формам импульсов каждой системы, при этом частоту среза фильтра определяют в диапазоне 100-150 Гц из условия максимизации различий между характерными формами импульсов в пространстве вейвлет-коэффициентов.

- Изобретение поясняется чертежами, где на фиг. 1 представлен типичный пример
- 25 перекрывания областей, соответствующих разным типам импульсных сигналов, на фиг. 2 представлены зависимость ошибки распознавания сигналов (E , %) от параметра различий между характерными формами импульсов в пространстве вейвлет-коэффициентов и зависимость этого параметра от частоты среза фильтра нижних частот, на фиг. 3 представлены гистограммы характеристик нейронных сигналов,
- 30 вычисленные с помощью анализа главных компонент, стандартного вейвлет-анализа и способа автоматического выделения сигналов нейронов из суммарной электрической активности нейронного ансамбля, где приняты следующие обозначения:

- 1 - результат анализа главных компонент;
- 2 - результат стандартного вейвлет-анализа;
- 35 3 - результат заявляемого способа выделения сигналов отдельных нейронов.

- Заявляемый способ выделения сигналов отдельных нейронов из суммарного сигнала нейронного ансамбля при наличии помех заключается в следующем. Снимают сигнал, представляющий собой аддитивную сумму сигналов ансамбля систем. Устанавливают пороговый уровень $\Theta = [0.3, 0.5] A_{\max}$, где $A_{\max}$ - максимальная амплитуда импульсов
- 40 элементов ансамбля. Проводят пороговое детектирование с заданным уровнем Θ для отделения от фонового шума всех импульсов (нейронных потенциалов действия), формы которых необходимо распознать. Импульсы, амплитуда которых превышает пороговый уровень Θ , центрируют по их максимумам. Задают фиксированное число отсчетов временного ряда $n = [32, 64]$, одинаковое для каждого импульса $x_i(t)$, $i = 1, \dots, M$, и
- 45 определяющее его длительность $\tau = n\Delta t$, где Δt - интервал дискретизации. Проводят предварительное разделение импульсов по группам на основе метода анализа главных компонент [M. Lewicki, Network: Computation in Neural Systems 9 (1998), R53-R78] по

значениям масштабных коэффициентов C_1 и C_2 первых двух главных компонент.

Выбирают область перекрытия масштабных коэффициентов, в пределах которой анализ главных компонент не позволяет разделить импульсы двух типов (фиг. 1). Если таких областей несколько, последующие действия проводят для каждой области поочередно.

Для разделения импульсов двух различных типов осуществляют расчет функции плотности распределения масштабных коэффициентов C_1 первой главной компоненты. Формы импульсов, соответствующие максимумам функции плотности распределения (центрам кластеров точек на фиг. 1), используют в качестве характерных сигналов

отдельных систем, входящих в состав ансамбля $x^1(t)$ и $x^2(t)$, $t=j\Delta t$, $j=1, \dots, n$.

Далее определяют оптимальный набор параметров, максимизирующих различия между характерными формами импульсов в пространстве вейвлет-коэффициентов. Для этого проводят непрерывное вейвлет-преобразование сигналов $x^1(t)$ и $x^2(t)$ с базисной функцией WAVE

$$W^{1,2}(a,b) = \int_0^T x^{1,2}(t) \psi_{a,b}(t) dt, \quad \psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \left(\frac{t-b}{a} \right) \exp \left(-\frac{(t-b)^2}{2a^2} \right), \quad (1)$$

и вычисляют расстояние между значениями $W^{1,2}(a,b)$ в пространстве вейвлет-коэффициентов

$$\hat{W}(a,b) = \frac{W^2(a,b) - W^1(a,b)}{2} = \frac{1}{2} \int_0^T (x^2 - x^1) \psi_{a,b}(t) dt. \quad (2)$$

Проводят оценку спектра мощности экспериментального шума $S(\omega_k)$ для $\omega_k = 2\pi f_k$, $f_k \in [0, 3]$ кГц. В типичном случае (при относительно низкой частоте появления импульсов нейронов) в качестве аппроксимации $S(\omega_k)$ рассматривают спектр всего регистрируемого сигнала. Задают частоту среза фильтра нижних частот $f_{HЧ}$ и проводят оценку спектра мощности экспериментального шума после фильтрации $P(\omega_k) = S(\omega_k) \cdot H^2(\omega_k)$, где $H(\omega_k)$ - частотная характеристика фильтра нижних частот. Определяют дисперсию экспериментального шума по приближенной формуле [А.А. Короновский, В.А. Макаров, А.Н. Павлов, Е.Ю. Ситникова, А.Е. Храмов. Вейвлеты в нейродинамике и нейрофизиологии. М.: Физматлит, 2013]

$$\sigma^2(a, f_{HЧ}) = \frac{8}{a} \sum_k \frac{P(\omega_k)}{\omega_k^2} \sin^4 \frac{a\omega_k}{4} \quad (3)$$

в диапазоне частот, ограниченном частотой среза фильтра $\omega_k \in [0, 2\pi f_{HЧ}]$. Вычисляют параметр различий между характерными формами импульсов в пространстве вейвлет-коэффициентов [А.А. Короновский, В.А. Макаров, А.Н. Павлов, Е.Ю. Ситникова, А.Е. Храмов. Вейвлеты в нейродинамике и нейрофизиологии. М.: Физматлит, 2013]

$$\Delta(a, b, f_{HЧ}) = \frac{\hat{W}(a, b)}{\sqrt{2\sigma(a, f_{HЧ})}}. \quad (4)$$

На следующем этапе проводят поиск значений $(a^*, b^*, f_{HЧ}^*)$, соответствующих максимуму $\Delta(a, b, f_{HЧ})$, что обеспечивает минимальную ошибку распознавания сигналов (см. фиг. 2а). Для найденной частоты среза фильтра нижних частот $f_{HЧ}^*$ проводят фильтрацию импульсов и вычисляют коэффициенты $W_i(a^*, b^*)$ для всех импульсов после проведенной фильтрации. Строят распределение коэффициентов $W_i(a^*, b^*)$, задают

пороговый уровень W_{th} , соответствующий минимуму бимодального распределения, и проводят разделение импульсов в соответствии с коэффициентами W_i :

$$5 \quad \begin{cases} W_i < W_{th}, & \text{импульс типа 1,} \\ W_i \geq W_{th}, & \text{импульс типа 2.} \end{cases} \quad (5)$$

Далее те же действия осуществляют для другой области перекрытия масштабных коэффициентов главных компонент (при ее наличии). Как альтернативу анализу главных компонент можно использовать дискретное вейвлет-преобразование [J. Letelier, P. Weber, J. Neurosci. Methods 101 (2000), 93-106]. В этом случае в качестве характерных
10 сигналов отдельных систем выбирают импульсы, соответствующие максимумам функции плотности распределения наибольших по модулю вейвлет-коэффициентов.

Для проверки эффективности распознавания сигналов электрической активности отдельных нейронов в составе нейронного ансамбля по сигналам внеклеточного электрического потенциала были проведены тестовые эксперименты с искусственно
15 сгенерированными сигналами - в экспериментальный сигнал (запись внеклеточного электрического потенциала) добавлялись потенциалы действия двух разных нейронов, имеющие похожую форму, что обеспечивало возможность вычислить ошибку распознавания. Дополнительно проводились эксперименты с тетродными микроэлектродами, позволяющими контролировать принадлежность импульсного
20 сигнала определенному типу путем анализа многоканальных записей внеклеточного электрического потенциала.

В приближении нормального закона распределения экспериментального шума теоретический минимум ошибки распознавания сигналов двух нейронов оценивается по формуле [А.А. Короновский, В.А. Макаров, А.Н. Павлов, Е.Ю. Ситникова, А.Е.
25 Храмов. Вейвлеты в нейродинамике и нейрофизиологии. М.: Физматлит, 2013]

$$R_{\min} = \frac{\gamma \cdot \operatorname{erfc}\left(\Delta + \frac{\ln \gamma}{4\Delta}\right) + \operatorname{erfc}\left(\Delta - \frac{\ln \gamma}{4\Delta}\right)}{2(1 + \gamma)}, \quad \Delta = \Delta(a, b, f_{HЧ}), \quad \gamma = M_1 / M_2, \quad (6)$$

30 где erfc - функция ошибок, M_1 и M_2 - число импульсов 1-го и 2-го типов.

Проведенные исследования подтвердили, что ошибка способа автоматического выделения сигналов нейронов из суммарной электрической активности нейронного ансамбля при анализе экспериментальных данных в среднем на 40-60% меньше, чем у вейвлетных методов классификации, не предусматривающих настройку параметров (в
35 том числе, частоты среза фильтра) в зависимости от индивидуальных особенностей анализируемых сигналов.

Типичный пример зависимости параметра различий между характерными формами импульсов в пространстве вейвлет-коэффициентов от частоты среза фильтра нижних частот представлен на фиг. 2б. Максимальное значение $\Delta(a, b, f_{HЧ})$ достигается при f_c
40 ≈ 120 Гц. В результате статистического анализа большого объема экспериментальных данных было установлено, что максимум $\Delta(a, b, f_{HЧ})$ для нейронных потенциалов действия достигается в диапазоне 100-150 Гц. Фильтрация сигнала внеклеточного электрического потенциала позволяет повысить надежность автоматического
45 распознавания сигналов отдельных нейронов за счет уменьшения области перекрытия характеристик импульсов в пространстве вейвлет-коэффициентов (см. фиг. 3). В тестовом примере, приведенном на фиг. 3, достигнута ошибка распознавания $E=0.7\%$, теоретический минимум составил $R_{\min}=0.3\%$. Ошибка распознавания, вычисленная на

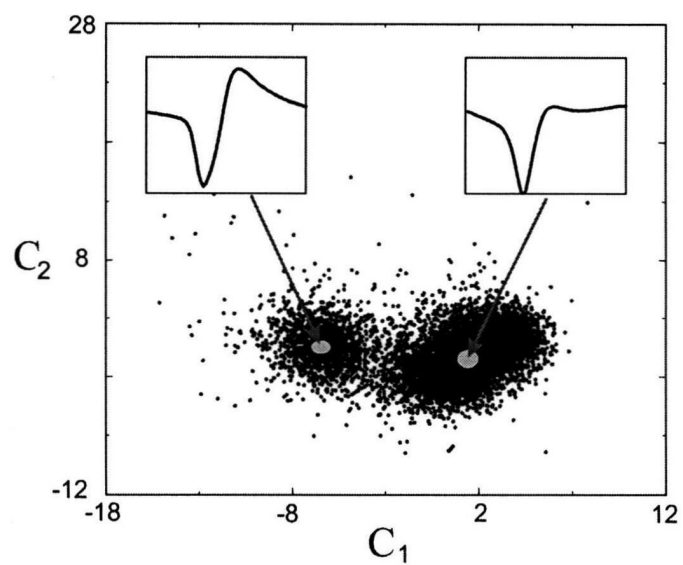
основе анализа главных компонент и стандартного вейвлет-анализа [J. Letelier, P. Weber, J. Neurosci. Methods 101 (2000), 93-106], составила 5.3% и 4.2% соответственно.

Таким образом, техническим результатом заявляемого способа является обеспечение возможности распознавания сигналов электрической активности отдельных нейронов в составе нейронного ансамбля по сигналам внеклеточного электрического потенциала при наличии помех. Данный способ также применим при решении более общей задачи выделения характерных паттернов в зашумленных сигналах.

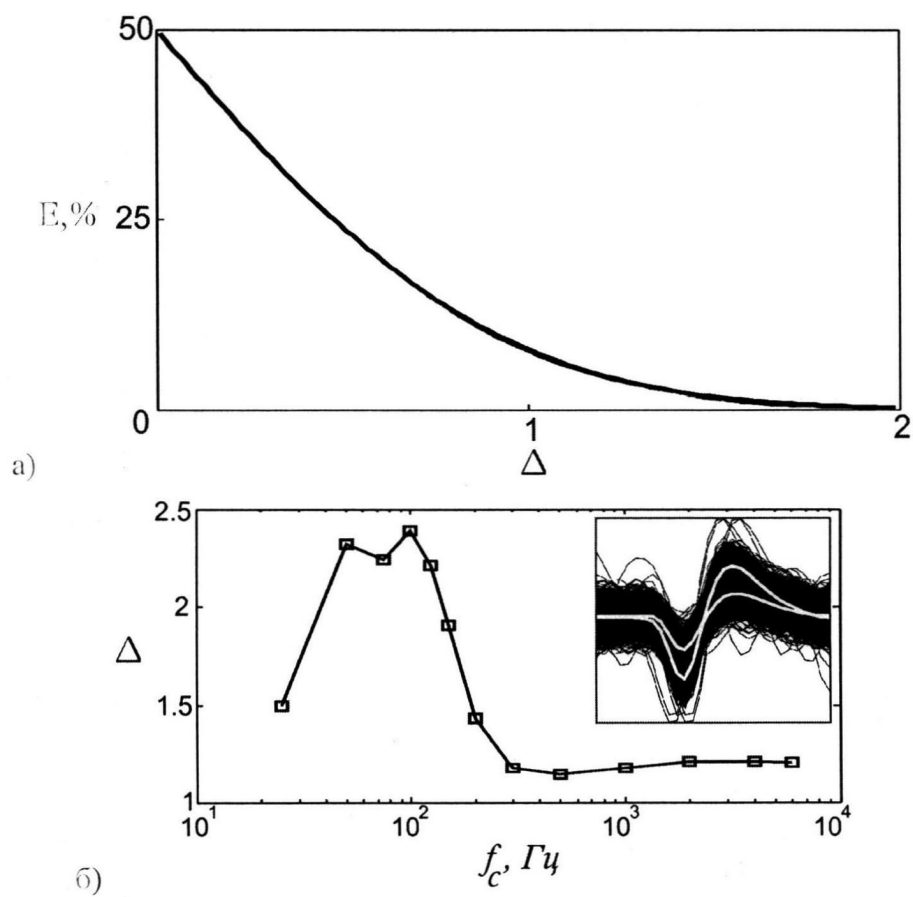
Формула изобретения

1. Способ выделения сигналов импульсного типа по временным данным, заключающийся в том, что снимают сигнал, представляющий собой аддитивную сумму сигналов ансамбля систем, устанавливают пороговый уровень, проводят пороговое детектирование с последующим центрированием всех импульсов, амплитуда которых превышает пороговый уровень, определяют характерные формы импульсов каждой системы, соответствующие максимумам функции плотности распределения масштабных коэффициентов первых главных компонент, находят оптимальный набор параметров, максимизирующий различия между характерными формами импульсов в пространстве вейвлет-коэффициентов, проводят расчет коэффициентов вейвлет-преобразования при найденном оптимальном наборе параметров, отличающийся тем, что фильтрацию импульсов с использованием фильтра нижних частот проводят после расчета коэффициентов вейвлет-преобразования по характерным формам импульсов каждой системы, при этом частоту среза фильтра определяют в диапазоне 100-150 Гц из условия максимизации различий между характерными формами импульсов в пространстве вейвлет-коэффициентов.

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что характерные формы импульсов каждой системы определяют по максимумам функции плотности распределения коэффициентов вейвлет-преобразования.



Фиг. 1



Фиг. 2