ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 622.271.32:681.5 DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-106-114

Аппарат вейвлет-преобразований в автоматизированной системе управления перемещением карьерных беспилотных транспортных средств

Чичерин И. В.[1], Федосенков Б. А.[1], Сыркин И. С.[1], Садовец В. Ю.[1]*, Дубинкин Д. М.[1]

[1] Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, г. Кемерово, Россия

e-mail: vsadovec@yandex.ru

Реферат

Введение, цель работы. *В рамках автоматизированной системы сформирована технология способа управления текущими траекториями (ТТ) беспилотных транспортных средств (БТС) при их перемещении по маршрутам в карьере в условиях открытых горных работ. Цель представленных исследований – анализ приложения аппарата вейвлет-преобразований к задаче маршрутизации беспилотных транспортных средств при их перемещении по маршрутам в пределах карьерных автодорог.*

Методология. *Представлены результаты моделирования одномерных сигналов, соответствующих текущим траекториям БТС при их отклонении влево и вправо от номинальной осевой траектории (НОТ), а также их время-частотных отображений в вейвлет-среде. Разработан и описан алгоритм процедуры отображения скалярных сигналов управления ТТ БТС в комплексной среде время-частотных вейвлет-преобразований. Подобное преобразование позволяет функционально прозрачно и информационно емко выполнять мониторинг перемещения БТС и эффективно управлять процессами траекторной маршрутизации автосамосвалов в карьере.*

Анализ и результаты исследований. *Процессы видоизменения текущих траекторий перемещения БТС под управлением автоматизированной системы генерируются с помощью методов вейвлет-преобразований. В их основе – алгоритмы проецирования траекторных сигналов с время-зависимой частотой (чирп-сигналов) на множество вейвлет-функций в составе вейвлет-тезауруса (словаря вейвлетов), процедур вейвлет-поиска соответствия, отображения скалярных сигналов в специфической многомерной среде время-частотных распределений класса Коэна. Приведены результаты моделирования в виде осциллограмм траекторных (ТТ-) сигналов и их трехмерных время-частотных отображений в форме карт Вигнера, отображающих перемещение БТС в старт-стопном режиме, а также сигналы сформированных непрерывных девиационных траекторий при их отклонении влево и вправо от НОТ. Представлен алгоритм формирования 3D-отображения одномерного сигнала о текущей траектории БТС.*

Заключение. *Сделан вывод о том, что для автоматизированного контроля и управления динамикой перемещений БТС по маршрутам в пределах карьерных автодорог наиболее целесообразным и эффективным является математический аппарат вейвлет-преобразований.*

Ключевые слова: *беспилотные транспортные средства; текущие траектории; чирп-сигнал; вейвлет-функции Габора; алгоритм вейвлет-поиска соответствия; время-частотные распределения; вейвлет-среда.*

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения № 075-11-2019-034 от 22.11.2019 г. с ПАО «КАМАЗ» по комплексному проекту «Разработка и создание высокотехнологичного производства автономных тяжелых платформ для безлюдной добычи полезных ископаемых в системе “Умный карьер”», при участии ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» в части выполнения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ.

Введение, цель работы. В условиях открытых горных работ в рамках глобальной структуры «Умный карьер» [1] перемещение породы и полезного ископаемого из рабочего забоя до места разгрузки осуществляется большегрузными автосамосвалами на беспилотной основе – автономными тяжелыми платформами [2] или беспилотными транспортными средствами (БТС). В статье представлена структура и описание аппарата вейвлет-преобразований, с помощью которого в рамках автоматизированной системы сформирована технология способа управления текущими траекториями БТС при их перемещении по маршрутам в карьере в условиях открытых горных работ.

Методология. В статье «Аппарат вейвлет-преобразований для автоматизированного управления перемещением карьерных беспилотных транспортных средств» [3] показано, что для автоматизированного контроля и управления процессами динамики перемещений БТС по маршрутам в пределах карьерных автодорог наиболее целесообразным и эффективным математическим средством, позволяющим семантически прозрачно и функционально емко осуществлять слежение в режиме реального времени за работающими БТС, является аппарат вейвлет-преобразований [4].

В данной работе представлены результаты моделирования одномерных сигналов, а также их время-частотных отображений в вейвлет-среде, соответствующих текущим траекториям при их отклонении влево/вправо от номинальной осевой траектории (НОТ) в процессе перемещения БТС по маршрутам в карьере.

Кроме того, разработан и описан алгоритм процедуры отображения скалярных сигналов управления текущими траекториями (ТТ) БТС в комплексной среде время-частотных вейвлет-преобразований. Подобное преобразование позволяет функционально прозрачно и информационно емко выполнять мониторинг перемещения БТС и эффективно управлять процессами траекторной маршрутизации автосамосвалов в карьере.

Анализ результатов исследований. Процессы видоизменения текущих траекторий перемещения БТС [1] под управлением автоматизированной системы генерируются с помощью методов вейвлет-преобразований. В их основе – алгоритмы проецирования траекторных сигналов с время-зависимой частотой (чирп-сигналов) [1, 4] на множество вейвлет-функций в составе вейвлет-тезауруса (словаря вейвлетов) [5], процедур вейвлет-поиска соответствия [4, 5], отображения скалярных сигналов в специфической многомерной среде время-частотных распределений класса Коэна [4, 6–9].

В частности, при разъезде на маршруте со встречным беспилотным транспортным средством или при осторожном объезде какого-либо препятствия БТС по командам автоматизированной системы диспетчеризации переходит в старт-стопный режим движения. Соответствующий пример представлен на рис. 1, *а* импульсной осциллограммой *сигнала* старт-стопного режима перемещения БТС по ТТ, уходящей влево от НОТ (т. е. соответствующего *чирп-сигнала* [4], сигнала с время-зависимой мгновенной частотой), *который* в аналитическом виде может быть записан следующим образом:

$$x(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{10}\left(A_k \cos\left(\frac{\omega_k}{t}\right) + B_k \sin\left(\frac{\omega_k}{t}\right)\right),$$

где $A_0 = \dfrac{2X_{d\max}}{\lambda}$, $A_k = \dfrac{X_{d\max}}{k\pi}\left(\sin\left(\dfrac{2k\pi}{\lambda}\right)\right)$, $B_k = \dfrac{2X_{d\max}}{k\pi}\left(\sin\left(\dfrac{k\pi}{\lambda}\right)\right)$, $\omega_k = \dfrac{2\pi k}{T}$.

После разложения сигнала по алгоритму вейвлет-поиска соответствия [4, 5] получаем его время-частотное распределение – ВЧР [4, 6, 8] (рис. 1, *в*), адекватность которого установлена путем сравнения исходного сигнала (рис. 1, *а*) с восстановленным по спектральным составляющим (рис. 1, *б*).

На карте Вигнера [4, 8, 10, 11] отчетливо прослеживается экспоненциально ниспадающий характер частоты чирп-сигнала старт-стопного режима, а следовательно, и дискретной траектории, по которой происходит ее девиация влево от НОТ. В частности, видим, что исходный сигнал старт-стопного режима перемещения БТС (рис. 1, *а*), а также восстановленный по ВПС-алгоритму сигнал (рис. 1, *б*) отображаются на вейвлет-карте (*W*-карте) семью время-частотными атомами (ВЧА) [4, 7]: первые пять импульсов отображены пятью ВЧА на время-частотном распределении Вигнера, шестой – двумя ВЧА.

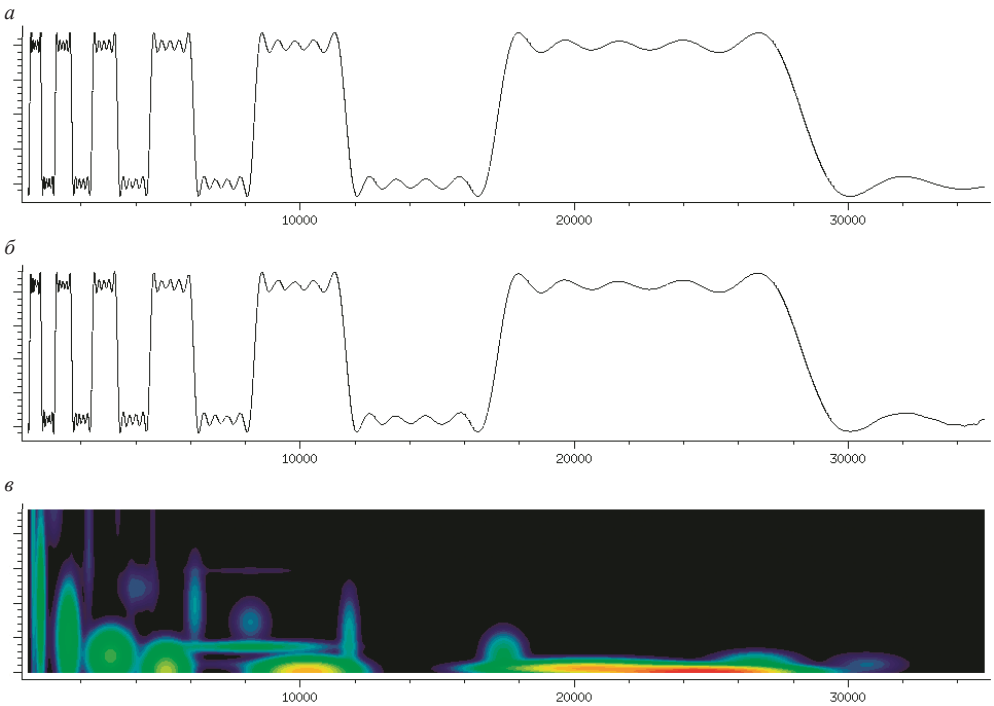

Рис. 1. Осциллограмма сигнала старт-стопного режима перемещения БТС по ТТ, уходящей влево от НОТ, и ее время-частотное распределение
Fig. 1. The waveform of the signal corresponding to the start-stop mode of the UMV moving along the CT leaving to the left of the NAT, and its time-frequency distribution

На рис. 2 показан сигнал прямого переходного процесса при девиации ТТ влево от НОТ в центрированном виде; кроме того, здесь же представлен реконструированный по ВПС-алгоритму сигнал этого режима, а также ошибка аппроксимации сигнала. При этом процесс имеет вид чирп-сигнала с падающей время-зависимой мгновенной частотой.

Здесь же приведена карта Вигнера для прямого переходного процесса при девиации ТТ влево от НОТ, экспериментально зафиксированная программно-аппаратным комплексом в директориях подсистем внешнего и автономного управления (ПСВУ и ПСАУ). Представленная карта Вигнера демонстрирует чирп-сигнал со снижением мгновенной частоты с 0,5 Гц ($\omega = 3{,}14$ с$^{-1}$) до $f = 0{,}02$ Гц ($\omega = 0{,}13$ с$^{-1}$). Подобная девиация ТТ БТС может быть вызвана наличием на маршруте динамического препятствия в виде группы идущих людей, стационарного препятствия

типа временно установленных средств освещения, электротехнических распределительных устройств с воздушным/кабельным отведением или лежащих на дорожном полотне негабаритных кусков породы/угля.

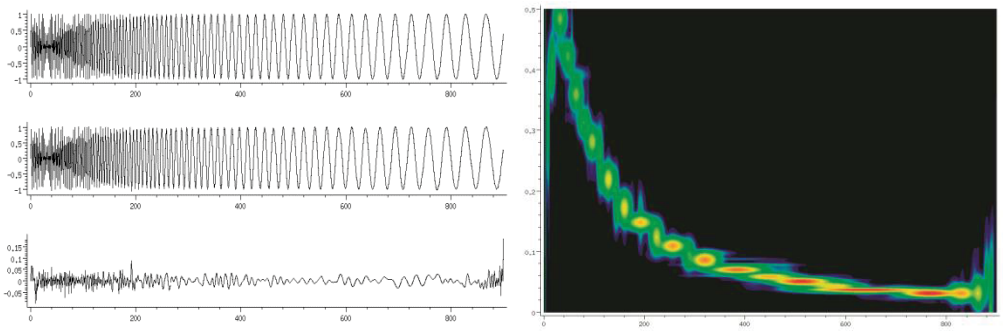

Рис. 2. Одномерный сигнал (в подсистемах внешнего и автономного управления ТТ БТС) о формировании ТТ, отклоняющейся влево от НОТ, и его карта Вигнера
Fig. 2. A one-dimensional signal (in the subsystems of external and autonomous control of UMV CT) of forming the CT deviating to the left from the NAT, and its Wigner map

На рис. 3 демонстрируется в центрированном виде сигнал прямого переходного процесса при девиации ТТ вправо от НОТ; здесь же представлен реконструированный по ВПС-алгоритму сигнал этого режима, а также ошибка аппроксимации сигнала. При этом процесс имеет вид чирп-сигнала с возрастающей

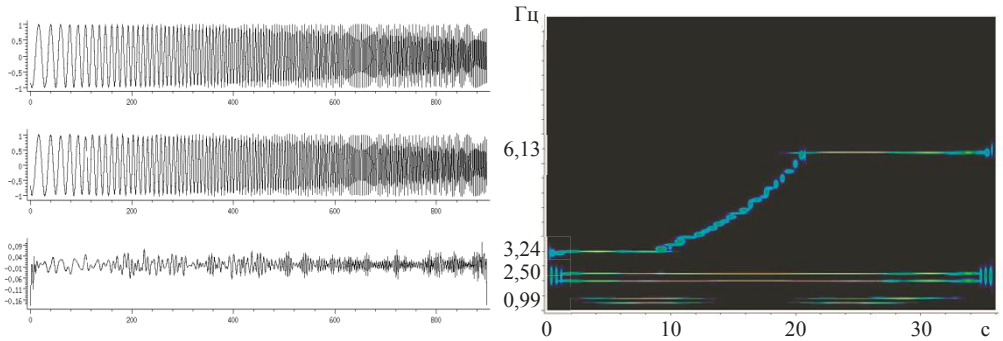

Рис. 3. Слева – одномерный сигнал (в подсистемах внешнего и автономного управления ТТ БТС) о формировании ТТ, отклоняющейся вправо от НОТ; справа – время-частотное отображение восходящего прямого переходного процесса (автономно-спорадического) или обратного процесса (принудительно-модального); частота чирп-сигнала варьируется в диапазоне $f(t)_{var}$ = 3,24–6,13 Гц
Fig. 3. Left – a one-dimensional signal (in the subsystems of external and autonomous control of UMV CT) of forming the TT deviating to the right of the NAT
On the right – time-frequency representation of the upward forward transient process (autonomous-sporadic) or the reverse process (forced-modal); the chirp signal frequency varies in the range $f(t)_{var}$ = 3,24–6,13 Hz

время-зависимой мгновенной частотой. На вейвлет-карте рис. 3 показан зафиксированный экспериментально восходящий прямой переходный *процесс* при отклонении ТТ вправо от НОТ или также восходящий, но обратный процесс принудительной компенсации левой девиации ТТ, возвращающий текущую траекторию к НОТ, *который* отображен в формате вейвлет-распределения Вигнера. Здесь же, в совмещенном виде, отображены ВЧР двух непрерывных стационарных ТТ на

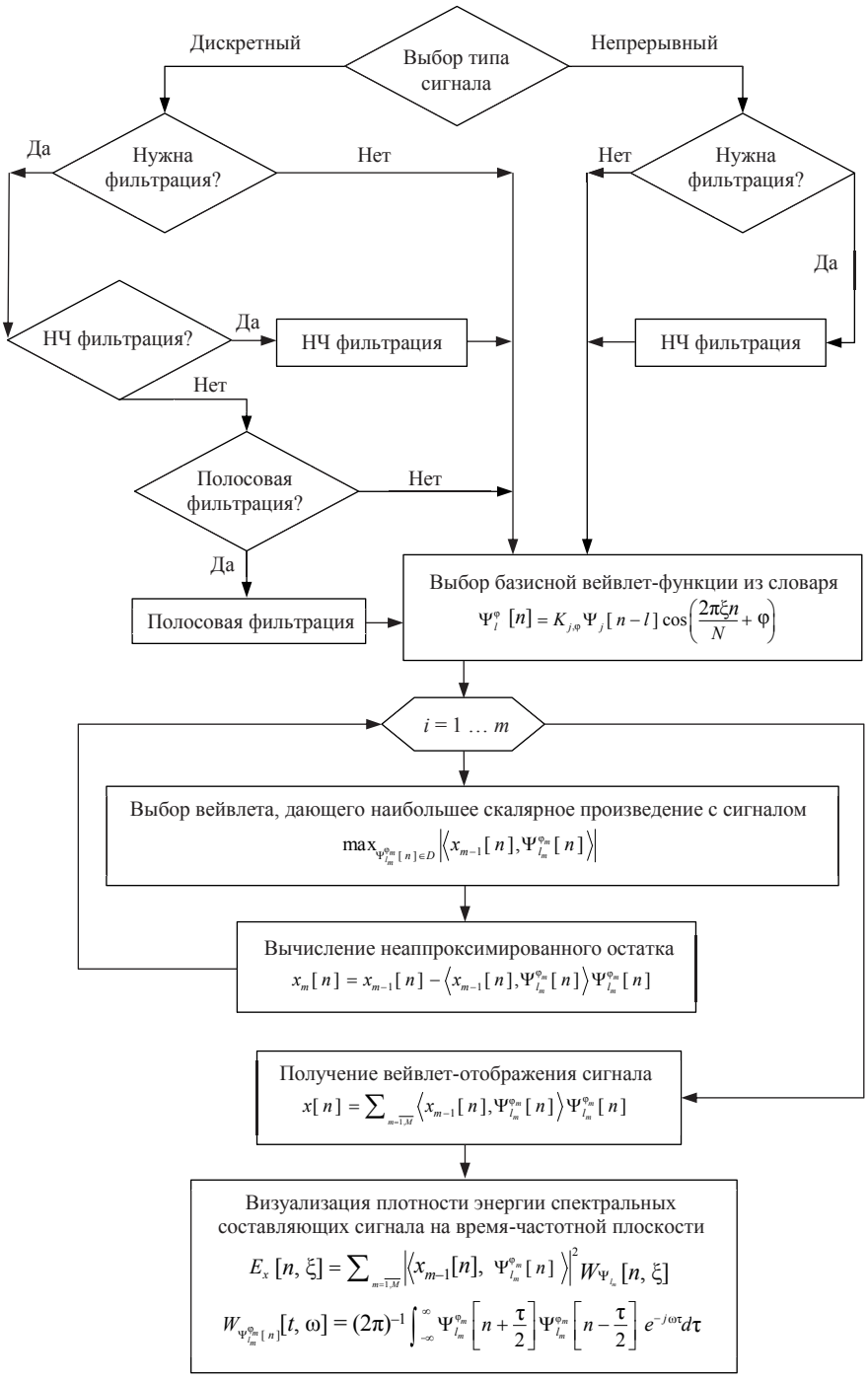

Рис. 4. Алгоритм формирования 3D-отображения одномерного сигнала текущей траектории БТС

Fig. 4. Algorithm for generating the 3D-representation of the UMV current trajectory one-dimensional signal

частотах 2,03 Гц и 2,50 Гц, а также ВЧР двух стационарных старт-стопных ТТ соответственно с параметрами повторно-кратковременных режимов:

– при частоте 0,99 Гц длительность интервала движения – 10 с, останов – в течение 8 с, период цикла движения БТС по дискретной прямой траектории – 18 с. Таким образом, индекс режима движения – 60 %;

– при частоте 0,82 Гц длительность интервала движения – 8 с, останов – 7,8 с, период цикла движения АТП/БТС по дискретной прямой траектории – 15,8 с. Индекс режима движения – 50 %.

Отметим, что восходящий обратный переходный процесс (т. е. принудительно-модальный [12, 13]) при реализации процедуры компенсации девиации ТТ влево от НОТ принят в автоматизированной системе управления таким же по форме, что и восходящий прямой при отклонении ТТ вправо от НОТ, с целью формирования процессов, восстанавливающих номинальный режим перемещения БТС в естественном виде, с точки зрения функционирования (торможения и ускорения) исполнительных механизмов БТС.

При непрерывном мониторировании в вейвлет-среде динамического состояния ТТ БТС на маршруте после обработки траекторного 1D-сигнала следует комплексная *операция* построения время-частотных карт Вигнера, алгоритм *которой* представлен на рис. 4. Отметим, что в результате построения ВЧР сигнала девиации ТТ подсистема ПСАУ/ПСВУ подает команду на бортовые исполнительные механизмы ходовой части БТС, которые формируют начальный («прямой») двухэкспоненциальный участок девиаций ТТ в виде апериодической переходной функции второго порядка [12, 13]. По окончании нейтрализации спорадического возмущения, вызванного возникновением на пути БТС препятствия, система формирует принудительно-модальный («обратный») переходный процесс, компенсирующий отклонение ТТ от НОТ.

После выполнения предварительных процедур, связанных с фильтрацией траекторных сигналов, производится проецирование ТТ-сигнала на словарь вейвлет-функций [4, 5], содержащий вейвлеты Габора [4, 7] с четырьмя параметрами: смещение l, масштаб N, частота ξ, начальная фаза синусоидальной компоненты φ.

Далее в итеративном цикле при текущем номере итерации $i = 1 \ldots m$ реализуется процедура выбора из словаря определенной вейвлет-функции, удовлетворяющей условию максимизации скалярного произведения [4, 5, 14] с фрагментом аппроксимируемого ТТ-сигнала. Следующим шагом по расчету вейвлет-представления сигнала является вычисление неаппроксимированного остатка, который на последующих итерациях также аппроксимируется, и процедура проецирования сигнала на словарь повторяется.

В конечном счете, *сумма* выбранных из словаря вейвлет-функций со своими коэффициентами в виде скалярных произведений сигнала и соответствующих вейвлетов, выбранных из словаря, *является* адаптивной аппроксимацией [4, 5] анализируемого одномерного траекторного сигнала.

После окончания процесса адаптивной аппроксимации ТТ-сигнала вейвлет-функциями Габора в системе формируется вейвлет-отображение сигнала в виде вейвлет-ряда, после чего на W-карте визуально отображается собственно 3D-время-частотное распределение ТТ-сигнала в форме плотности энергии спектральных составляющих сигнала $E_x(n, \xi)$ на время-частотной плоскости:

$$E_x(n,\xi) = \sum_{\xi}\sum_{\tau}\sum_{s}\left|\left\langle x(n), \psi_{(s,\tau,\xi)m}(n)\right\rangle\right|^2 W_{\psi(s,\tau,\xi)m}(n,\xi) =$$

$$= \sum_{m=1}^{M}\left|\left\langle x_{m-1}(n), \psi_{(s,\tau,\xi)m}(n)\right\rangle\right|^2 W_{\psi(s,\tau,\xi)m}(n,\xi).$$

Согласно представленной информации, вейвлет-функции выбираются из избыточного словаря по критерию максимумов скалярного произведения между сигналом и соответствующим вейвлетом. Отметим, что операции расчета скалярного произведения предшествуют процедуры центрирования, дискретизации и нормализации [12] исходного сигнала о динамическом состоянии ТТ. Иными словами, исходный сигнал после центрирования и дискретизации преобразуется в соответствии с операцией приведения к квадратичной норме $\|\bar{x}(t)\| = 1$ [4, 14].

Алгоритм вейвлет-поиска соответствия с габоровским словарем обеспечивает наиболее точное описание время-частотных структур среди доступных в настоящее время методов [3]. Данный алгоритм, оперирующий габоровским словарем, обладает наибольшей точностью при описании время-частотных структур, так как он описывает представленные в сигнале компоненты в терминах их времени возникновения, частотного и временного охвата, амплитуды и фазы – с разрешением, которое может быть настроено до теоретических пределов.

Заключение. Результаты исследований показывают, что математический аппарат вейвлет-преобразований представляет собой эффективный способ автоматизированного контроля и управления динамикой перемещений БТС по маршрутам в пределах карьерных автодорог.

В работе рассмотрены процедуры преобразования *одномерных сигналов*, характеризующих динамическое состояние ТТ БТС на технологических маршрутах в угольном карьере, в *их многомерные* время-частотные отображения. Необходимость подобного преобразования сигнальных функций одномерного пространства в многомерную вейвлет-среду дает возможность информационно емко и функционально прозрачно контролировать в этой среде динамическое состояние карьерных беспилотных транспортных средств и управлять их текущими маршрутными траекториями в автоматизированном режиме в условиях открытых горных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чичерин И. В., Федосенков Б. А., Сыркин И. С., Садовец В. Ю., Дубинкин Д. М. Концепция управления беспилотными транспортными средствами в условиях открытых горных работ // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 8. С. 109–120.

2. Дубинкин Д. М. Современное состояние техники и технологий в области автономного управления движением транспортных средств угольных карьеров // Горное оборудование и электромеханика. 2019. № 6. С. 8–15.

3. Чичерин И. В., Федосенков Б. А., Сыркин И. С., Садовец В. Ю., Дубинкин Д. М. Использование вейвлет-среды для автоматизированного управления перемещением беспилотных транспортных средств по карьерным маршрутам // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 2. С. 103–112. (In Eng.) DOI: 10.21440/0536-1028-2021-2-103-112

4. Mallat S. A wavelet tour of signal processing. New York: Academic Press (2nd Ed.), Ecole Politechnique, Paris; Courant Institute, New York University, Library of Congress Catalog Card Number: 99-65087, 1999; Reprinted 2001. 637 p.; 3d Edition. The Sparse Way. Academic Press, 2008. 832 p.

5. Mallat S., Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries // IEEE Transactions on Signal Processing. 1993. Vol. 41. No. 12. P. 3397–3415.

6. Auger F., Chassande-Mottin E. Quadratic time-frequency analysis I: Cohen's class, Time-frequency analysis: concepts and methods // ISTE. 2008. January. P. 131–163.

7. Федосенков Д. Б., Симикова А. А., Судаков И. В., Федосенков Б. А. Техническая реализация автоматизированной системы управления смесеприготовительными процессами в вейвлет-среде // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM – 2016). Труды XVI / под ред. Ф. В. Толока. М.: Аналитик, 2016. С. 241–244.

8. Boashash B. Measures, performance assessment, and enhancement TFDs. Time-Frequency Signal Analysis and Processing: a comprehensive reference // Academic Press. 2016, January. P. 387–452.

9. Fedosenkov D. B., Simikova A. A., Kulakov S. M., Fedosenkov B. A. Cohen's class time-frequency distributions for measurement signals as a means of monitoring technological processes // Steel in Translation. 2019. Vol. 49. No. 4. P. 252–256.

10. Debnath L. Recent development in the Wigner-Ville distribution and time-frequency signal analysis // PINSA. January 2002. Vol. 68(A). No. 1. P. 35–56.

11. Debnath L. Wavelet transforms and their applications. Boston: Birkhauser, 2002. 565 p.

12. Дорф Р. С., Бишоп Р. Х. Современные системы управления. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.
13. Проектирование систем управления / Г. К. Гудвин [и др.]. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 911 с.
14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Книга по требованию, 2012. 832 с.

Поступила в редакцию 18 января 2021 года

Сведения об авторах:

Чичерин Иван Владимирович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных и автоматизированных производственных систем Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева. E-mail: chicivan@yandex.ru
Федосенков Борис Андреевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных и автоматизированных производственных систем Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева. E-mail: rafwaveletsve@mail.ru
Сыркин Илья Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и автоматизированных производственных систем Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева. E-mail: ilya.syrkin@mail.ru
Садовец Владимир Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных и автоматизированных производственных систем Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева. E-mail: vsadovec@yandex.ru
Дубинкин Дмитрий Михайлович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлорежущих станков и инструментов Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева. E-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-106-114

The technique of wavelet transforms in the computer-aided system for controlling the unmanned dump trucks movement

Ivan V. Chicherin[1], Boris A. Fedosenkov[1], Ilia S. Syrkin[1], Vladimir Iu. Sadovets[1], Dmitrii M. Dubinkin[1]
[1] T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia.

Abstract
Introduction, purpose of the work. *Within the framework of the computer-aided system, the technology of a method is formed to control the current trajectories (CT) of unmanned vehicles (UMV) when they move along quarry routes in open-pit mining. The purpose of the presented research is to analyze the application of the wavelet transforms technique to the problem of routing unmanned vehicles when they move along quarry routes.*
Methodology. *The results of modeling one-dimensional signals corresponding to the UMV current trajectories are presented, when the latters deviate to the left / right from the nominal axial trajectory (NAT), as well as their time-frequency distributions in the wavelet medium. The algorithm of the procedure for displaying scalar signals is developed and described to control UMV CT in a complex medium of time-frequency wavelet transforms. This transformation allows you to monitor the movement of UMV in a functionally transparent and informative way and effectively manage the processes of trajectory routing of dump trucks in the quarry.*
The analysis of research results. *The processes of modifying the current trajectories of the UMV movement under the control of the computer-aided system are generated using the methods of wavelet transforms. They are based on algorithms for projecting trajectory signals with a time-dependent frequency (chirp signals) onto a set of wavelet functions within a wavelet thesaurus (wavelet dictionary), wavelet matching pursuit procedures, and representing scalar signals in a specific multidimensional medium of Cohen's class time-frequency distributions. Simulation results in the form of waveform trajectory (CT-) signals and their three-dimensional Wigner time-frequency maps representing the movement of UMV in a start-stop mode, and the signals of formed continuous deviation trajectories while they deflect to the left and right of NAT. The algorithm for generating a 3D-image of a UMV current trajectory one-dimensional signal is presented.*
Conclusion*. It is concluded that the mathematical technique of wavelet transforms is the most appropriate and effective one for computer-aided monitoring and controlling the dynamics of UMV moving along opencast mine routes.*

Keywords: *unmanned vehicles; current trajectories; chirp signal; Gabor wavelet functions; wavelet matching pursuit algorithm; time-frequency distributions; wavelet medium.*

Acknowledgements. *The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of agreement no. 075-11-2019-034*

of 22.11.2019 with PJSC KAMAZ on the comprehensive project "Development and creation of high-tech production of autonomous heavy platforms for deserted mining in the Smart Quarry system", with the participation of T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.

REFERENCES

1. Chicherin I. V., Fedosenkov B. A., Syrkin I. S., Sadovets V. Iu., Dubinkin D. M. The concept of controlling the unmanned vehicles in open pit mining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2020; 8: 109–120. (In Russ.)

2. Dubinkin D. M. Current state of technics and technologies in the field of autonomous control movement vehicles of coal mine quarries. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika = Mining Equipment and Electromechanics.* 2019; 6: 8–15. (In Russ.)

3. Chicherin I. V., Fedosenkov B. A., Syrkin I. S., Sadovets V. Iu., Dubinkin D. M. Using a wavelet medium for computer-aided controlling the movement of unmanned vehicles along quarry routes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal.* 2021; 2: 103–112. Available from: DOI: 10.21440/0536-1028-2021-2-103-112

4. Mallat S. *A wavelet tour of signal processing.* New York: Academic Press (2nd ed.), Ecole Politechnique, Paris; Courant Institute, New York University, Library of Congress Catalog Card Number: 99-65087, 1999; Reprinted 2001. 637 p.; 3d Edition. The Sparse Way. Academic Press, 2008. 832 p.

5. Mallat S., Zhang Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries. *IEEE Transactions on Signal Processing.* 1993; 41(12): 3397–3415.

6. Auger F., Chassande-Mottin E. Quadratic time-frequency analysis I: Cohen's class, Time-frequency analysis: concepts and methods. *ISTE.* 2008; January: 131–163.

7. Fedosenkov D. B., Simikova A. A., Sudakov I. V., Fedosenkov B. A. Engineering realization of a computer-aided control system jointly working with a mixture-producing aggregate based on the wavelet transforms. In: Tolok F. V. (ed.) *CAD/CAM/PDM – 2016: Proceedings of the 16th Intern. Youth Conf.* Moscow: Analitik Publishing; 2016. p. 241–244. (In Russ.)

8. Boashash B. Measures, performance assessment, and enhancement TFDs. Time-Frequency Signal Analysis and Processing: a comprehensive reference. *Academic Press.* 2016; January; 387–452.

9. Fedosenkov D. B., Simikova A. A., Kulakov S. M., Fedosenkov B. A. Cohen's class time-frequency distributions for measurement signals as a means of monitoring technological processes. *Steel in Translation.* 2019; 49(4): 252–256.

10. Debnath L. Recent development in the Wigner-Ville distribution and time-frequency signal analysis. *PINSA.* January 2002; 68(A); 1: 35–56.

11. Debnath L. *Wavelet transforms and their applications.* Boston: Birkhauser, 2002. 565 p.

12. Dorf R. C., Bishop R. H. *Modern control systems.* Moscow: Laboratoriia bazovykh znanii Publishing; 2002.

13. Goodvwin G. C. et al. *Control system design*. Moscow: BINOM, Laboratoriia znanii Publishing; 2004. (In Russ.)

14. Korn G., Korn T. *Mathematical handbook for scientists and engineers.* Moscow: Kniga po trebovaniiu Publishing; 2012. (In Russ.)

Received 18 January 2021

Information about authors:

Ivan V. Chicherin – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Information and Computer-aided Manufacturing Systems, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. E-mail: chicivan@yandex.ru

Boris A. Fedosenkov – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Information and Computer-aided Manufacturing Systems, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. E-mail: rafwaveletsve@mail.ru

Ilia S. Syrkin – PhD (Engineering), associate professor of the Department of Information and Computer-aided Manufacturing Systems, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. E-mail: ilya.syrkin@mail.ru

Vladimir Iu. Sadovets – PhD (Engineering), Associate Professor, associate professor of the Department of Information and Computer-aided Manufacturing Systems, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. E-mail: vsadovec@yandex.ru

Dmitrii M. Dubinkin – PhD (Engineering), Associate Professor, associate professor of the Department of Metal-Cutting Machines and Tools, T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. E-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Для цитирования: Чичерин И. В., Федосенков Б. А., Сыркин И. С., Садовец В. Ю., Дубинкин Д. М. Аппарат вейвлет-преобразований в автоматизированной системе управления перемещением карьерных беспилотных транспортных средств // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 3. С. 106–114. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-106-114

For citation: Chicherin I. V., Fedosenkov B. A., Syrkin I. S., Sadovets V. Iu., Dubinkin D. M. The technique of wavelet transforms in the computer-aided system for controlling the unmanned dump trucks movement. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 3: 106–114. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-3-106-114