Концепция управления беспилотными транспортными средствами в условиях открытых горных работ

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. В статье представлены результаты исследований, касающиеся описания синтеза и дальнейшего анализа динамического поведения беспилотных транспортных средств (БТС), эксплуатирующихся на угольных разрезах и других горнорудных предприятиях. Актуальность темы исследований продиктована необходимостью создания безопасных и эффективных условий проведения вскрышных / добычных и горнотранспортных работ. Это обеспечивается, в том числе, эксплуатацией беспилотных автосамосвалов большой грузоподъемности.

Цель работы. В ходе исследований выработана концепция формирования маршрутных параметров и моделей динамики перемещения БТС по технологическим маршрутам.

Методология. В работе описана технология формирования и обработки сигналов в подсистемах управления в составе автоматизированной системы диспетчеризации и бортовой подсистемы автономного управления БТС. Методы исследования включают проработку форм и характеристик текущих траекторий (ТТ) по отношению к номинальной осевой траектории (НОТ). При этом текущая траектория БТС рассматривается в рамках так называемых S-фреймов, которые формируются в виде геолокаций на рабочем маршруте БТС от забоя к месту разгрузки и наоборот. В качестве переменной, характеризующей поведение БТС на текущей траектории, принят 1D-сигнал с времязависимой частотой, характер изменения которой определяется динамической формой ТТ относительно НОТ.

Результаты. Такие чирп-сигналы совместно с введенным в рассмотрение аппаратом вейвлет-преобразований позволяют в семантически прозрачной и информационно насыщенной видеографической форме отображать и подвергать дальнейшей обработке сигналы, характеризующие текущее поведение БТС на маршруте. Получаемые параметры вторичных вейвлет-отображений текущей динамики БТС (вейвлет-карт) далее планируется использовать в подсистеме динамического модального управления перемещением БТС в карьере.

Выводы. Результаты проведенных исследований позволяют формировать текущие маршруты перемещения БТС по моделям, генерируемым на базе сопровождающих динамику БТС аналитических средств, предложенных в работе.

Ключевые слова: беспилотное транспортное средство; текущая траектория; номинальная осевая траектория; переходный процесс; S-фрейм; вейвлет-преобразования; вейвлет-карты.

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. Предметом исследования в предлагаемой работе является динамика перемещения беспилотных транспортных средств в условиях ведения текущих работ на угольных карьерах. Сложность решения поставленной задачи опре-

деляется чрезвычайно тяжелыми условиями проведения вскрышных / добычных и транспортных работ. Необходимость создания безопасных и эффективных условий труда в транспортном фрагменте системы «Умный карьер» диктует актуальность проведения такого рода исследований. Актуальность подтверждается проведением интенсивных исследований: работ по моделированию, проектированию, созданию условий и систем сопровождения беспилотных автосамосвалов, работающих в карьерных условиях во многих угольно-добывающих странах мира.

Методология. Система управления умным карьером (СУУК) предназначена для реализации глобальных функций полномасштабного управления структурой угольного карьера.

Центральным ядром системы управления «Умный карьер» является автоматизированная система диспетчеризации (АСД).

Структура СУУК подразумевает наличие 2 уровней функционального назначения:

- стратегического – охватывающего все объекты горнотранспортного комплекса;
- тактико-оперативного – уровня локальной отработки компьютерного сопровождения текущего состояния беспилотных транспортных средств (БТС) как предмета данных исследований.

Для выполнения задач на стратегическом и тактико-оперативном уровнях служит модуль диспетчеризации текущего состояния БТС, входящий в состав СУУК как один из ее фрагментов.

Далее рассмотрим решение задач по автоматизации функций стратегического и тактико-оперативного уровней управления в системе «Умный карьер».

1. Проведение картографических и фотограмметрических работ. Для достижения цели глобального управления системой «Умный карьер» необходимо решить следующие задачи по автоматизации функций стратегического и тактико-оперативного уровней:

- прокладка маршрутов передвижения БТС;
- наблюдение за статическим и динамическим состоянием горнотранспортного оборудования (ГТО), находящегося в активной рабочей фазе;
- наблюдение за состоянием сооружений административно-хозяйственного комплекса карьера;
- наблюдение за объектами и ГТО, находящимися в состоянии резерва и ремонта в соответствующих местах дислокации;
- управление социально-экономической сферой, формируемой администрацией карьера.

Для решения задачи по прокладке маршрутов БТС с целью введения их в цифровой форме в соответствующие директории автоматизированных рабочих мест (АРМ) центра управления (ЦУ) в составе СУУК предложен способ формирования цифровых наземных локаций планируемых маршрутов на основе картографирования поверхности карьера с помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) мультироторного типа [1–4], оснащенных необходимым для этих целей оборудованием. Такая задача будет описана в дальнейших исследованиях.

2. Формирование сплайн-фреймов маршрутов передвижения БТС. При получении фотолокации карьера далее она транзитируется в ПСВУ ЦУ (подсистему внешнего управления центра управления). Там этот материал подвергается интерактивной обработке, алгоритм которой заключается:

- 1) в сегментировании локаций «Карьер» на кадры всего маршрута БТС от забоя до места разгрузки / склада, т. е. в разбиении каждой такой глобальной i -й

локации на локальные субмаршруты соответствующего технологического маршрутного назначения;

2) формировании в цифровом виде каждого локального субмаршрута, форма которого определяется шириной уступа, шириной маршрутной проезжей части, геометрическими размерами БТС. В результате в ПСВУ фиксируются 3 квазипрямоугольных фрагмента с заданной локальной шириной, соответствующих 3 локальным субмаршрутам (при синхронно встречном движении БТС по уступу таких фрагментов будет 6);

3) в фиксации в цифровом виде границ субмаршрутов. Поскольку линии границ (как НОТ-линия, так и линии боковых границ) в общем случае представляют собой криволинейные отрезки, уместно назвать сформированные фрагменты **сплайн-фреймами (S-фреймами)**;

4) во введении в базу данных «БД S-фреймов» ПСВУ СУУК фотокарт всех S-фреймов в цифровом виде.

Отметим, что при выполнении частной задачи по проектированию S-фреймов для передвижения БТС в карьере требуется только фиксация, тем или иным способом, координат опорных точек на местности (в данном случае – координат 4 угловых точек каждого локального S-фрейма из множества S-фреймов в их БД).

Немаловажно отметить, что с помощью лидаров производится категоризация и контроль изменения поверхности дорог и окружающей обстановки в процессе движения БТС, а также изменения плана и профиля карьера в ходе его эксплуатации.

Функция ПСАУ (подсистемы автономного управления) и ПСВУ по автоматизированному поиску и захвату / фиксации места расположения БТС под загрузкой в забое относительно ГТО (экскаватора – ЭР – или автопогрузчика) реализуется средствами лидарно-сонарного узла ПСАУ по команде ПСВУ «поиск / захват места БТС под загрузкой». Выполнение этой процедуры производится с учетом и на основании комплекса регламентированных задающих параметров, обеспечивающего адекватное взаимное позиционирование ГТ-механизмов в паре «БТС – ЭР / автопогрузчик» в k -м забое.

После окончания процесса загрузки БТС производится процедура поиска позиции начала (начальной точки номинальной осевой траектории – НОТ) локального S-фрейма выезда БТС из k -го забоя по опорным точкам начала следующего смежного фрейма. Отметим, что «сшивание» локальных маршрутных S-фреймов производится в программном пакете DJI GO (производство КНР). Кроме того, такими же возможностями обладает наземная станция D-RTK-2, работающая совместно с БПЛА DJI «Phantom 4 Pro RTK».

3. Описание маршрута передвижения БТС в рамках S-фреймов. Автоматизированная система диспетчеризации (АСД) фиксирует момент вхождения в «S-фрейм выезда из забоя» j -го БТС из k -го забоя и движения БТС по этому фрейму. Затем фиксируется момент окончания движения БТС в рамках «S-фрейма выезда» и вхождения в «S-фрейм i -го магистрального маршрута» j -го БТС по l -у уступу карьера. Далее АСД регистрирует момент окончания движения БТС в рамках локального «магистрального S-фрейма» и вхождения в локальный «S-фрейм въезда на место разгрузки» (на склад готового продукта: угля / породы / вспомогательных материалов).

Необходимо также фиксировать моменты начала и окончания разгрузки БТС (запрос ЦУ в адрес оператора на месте разгрузки о готовности БТС к разгрузке – ответ оператора; подача сигнала из ЦУ на борт БТС о начале разгрузки; сигнал от оператора об окончании разгрузки).

После окончания операции разгрузки БТС АСД фиксирует моменты начала старта БТС с места разгрузки и вхождения БТС в зону локального «S-фрейма вы-

езда с места разгрузки» i -го глобального маршрута и движения по этому фрейму. Далее в АСД происходит фиксация момента окончания движения БТС (на i -м глобальном маршруте) в рамках локального «S-фрейма выезда с места разгрузки» и вхождения в зону локального «S-фрейма магистрального маршрута» – движение по этому фрейму. За этой операцией следует процедура фиксации момента окончания движения БТС в рамках локального «S-фрейма магистрального маршрута» и вхождения в зону локального «S-фрейма въезда в забой». После этого фиксируется момент останова БТС в забое и подача сигнала из ПСАУ в ЦУ; подача разрешающего сигнала из ПСВУ на борт экскаватора о начале загрузки / ответный прием. Далее в ПСВУ и ПСАУ принимается сигнал обратной связи (ОС) от машиниста экскаватора / автопогрузчика об окончании загрузки. В ПСВУ фиксируется время загрузки, после чего подается разрешающий сигнал ПСВУ на борт БТС (в ПСАУ) о начале движения и вхождения БТС в зону «S-фрейма выезда из забоя».

Далее по замкнутому циклу в программной части реализуется повтор стадий алгоритма сопровождения БТС внешней подсистемой управления (ПСВУ ЦУ) по заданному маршруту.

4. Функциональное назначение подсистемы автономного управления (ПСАУ).

4.1. Обеспечение возможности адекватной реакции на сигналы бортовых технических средств контроля, управления, сигнализации, защиты и блокировки:

– *лидарно-радарно-сонарного узла;*

– *видеокамер* – для регистрации окружающей БТС обстановки на магистральном маршруте и мест загрузки / разгрузки – в составе видео-пентасистемы; камеры установлены по бокам БТС и одна сверху – для связи со спутником ГНСС / БПЛА и фиксации препятствий, расположенных высоко над поверхностью дороги;

– *о состоянии средств контроля и управления БТС и бортовых технических узлов АТП.*

4.2. Обеспечение постоянной связи с подсистемой внешнего управления ПСВУ в центре управления ЦУ с целью восприятия управляющих сигналов от ПСВУ и передачи сигналов обратной связи от ПСАУ к ПСВУ.

4.3. Обеспечение трансляции управляющих сигналов от ПСВУ на исполнительные механизмы (ИМ) и силовые агрегаты БТС, а также регистрации сигналов от первичных преобразователей (датчиков), установленных на узлах систем управления рабочими элементами БТС (шасси, колесной системой, дизельным агрегатом (ДА), тормозной системой, подсистемами охлаждения, маслосмазки, кондиционирования, контроля топливных ресурсов, скорости движения, положения АКПП и т. д.).

5. Функциональное назначение подсистемы внешнего управления (ПСВУ). ПСВУ входит в состав СУУК и предназначена для контроля и управления из центра управления динамикой БТС на технологических маршрутах.

Функционал ПСВУ обеспечивает выполнение следующих операций:

5.1. Контроль и управление всеми стадиями перемещения БТС на технологических маршрутах ($i = 1, M$, где i – номер технологического маршрута, т. е. движения БТС – одного или нескольких – по одному уступу карьера; $j = 1, N$, где j – номер БТС на i -м маршруте). Так, номер j -го БТС на i -м маршруте имеет вид ji .

Все наличные БТС в парке карьера должны быть пронумерованы и внесены в базу данных «БД БТС». Актуальные технологические маршруты (ТМ) нумеруются и также вводятся в базу «БД ТМ».

5.2. Контроль и управление параметрами текущего состояния всех узлов бортовой системы ПСАУ БТС и ее силовых агрегатов:

5.2.1. Обеспечение возможности дистанционной перестройки параметров элементов ПСАУ путем воздействия на нее управляющими сигналами ПСВУ из ЦУ;

5.2.2. Реализация полного спектра функций ПСАУ вследствие выхода из строя ее локальных узлов управления бортовыми средствами контроля / управления, т. е. исполнение процедуры трансфера функций ПСАУ подсистеме внешнего управления ПСВУ.

5.3 Связь с машинистами ГТО (экскаваторов, автопогрузчиков, буровых станков, топливозаправочных станций и других объектов) в забоях k , где $k = 1, P$ – номер забоя.

Таким образом, БТС ($ijkl$) – это БТС с № i на маршруте № j , работающий в забое № k с экскаватором № l .

Рис. 1. Схема возникновения возмущенных прямых (девиационных) и формирования обратных восстанавливающих траекторий БТС на прямом участке S-фрейма некоторого маршрута при уходе ТТ влево и вправо от НОТ
Fig. 1. The scheme of perturbed straight lines (deviation) generation and the development of reverse recovery trajectories of UMV at the straight section of the S-frame of a particular route when CT leaves to the left and to the right of NAP

6. Модальное управление перемещением БТС по технологическим маршрутам. В представленном исследовании разработано и используется динамическое модальное управление (обсуждение этого вида управления планируется представить в очередных публикациях), которое, в отличие от статического [9–11], оперирует перемещением созвездия полюсов управляемой системы в ходе переходных процессов, представляющих собой отклонения текущих траекторий (ТТ) БТС от НОТ на маршруте.

Рассмотрим принцип управления передвижением БТС по технологическому маршруту карьера.

На рис. 1 схематично изображены на прямом S-фрейме две девиационные текущие траектории с указанием прямых (отклоняющихся от НОТ) и обратных (возвращающихся к НОТ) ТТ, т. е. в терминах сигналов в системе АСД – прямых и обратных переходных процессов (ПП).

Рис. 2. Искривленные S-фреймы с ТТ, уходящими влево и вправо от номинальной осевой траектории, изображенные в совмещенном виде

Fig. 2. Curved S-frames with CT leaving to the left and to the right of the nominal axial path; combined view

На рис. 1 приведены следующие обозначения: LSF (Local Spline Frame) – локальный S-фрейм; LSSF (Local Sub-Spline Frame) – локальный суб-S-фрейм; НОТ – номинальная осевая траектория движения БТС; LFTP / RFTP (Left Forward Transient Process / Right Forward Transient Process) – соответственно прямые переходные процессы девиации текущей траектории движения БТС влево / вправо от НОТ; LRTP / RRTP (Left Reverse Transient Process / Right Reverse Transient Process) – соответственно обратные переходные процессы восстановления НОТ при девиации текущей траектории (ТТ) движения БТС влево / вправо от НОТ.

Обозначим $x(t)_l$ и $x(t)_r$ обобщенную координату движения БТС при девиации траектории соответственно влево и вправо от номинальной осевой траектории по ходу движения.

На рис. 2 в совмещенной форме изображены искривленные S-фреймы маршрутов БТС с текущими траекториями, уходящими влево и вправо от номинальной осевой траектории. Точками A_l и B_l обозначены точки перегиба соответственно на левых прямой и обратной траекториях, точкой C_l – точка перегиба на правой прямой траектории. Точки D_l и E_l – моменты активации процедуры модального управления на левосторонней и правосторонней траекториях. При этом сигнал, характеризующий правую обратную траекторию БТС, имеет вид импульсной переходной характеристики апериодики 1-го порядка [11]:

$$x(t) = w(t) = (k / T) \exp(-t / T).$$

Такая форма сигнала возвращает ТТ к НОТ быстрее, нежели сигнал апериодики 2-го порядка. Это предотвращает возможность удара БТС о борт уступа при перемещении БТС по маршруту *забой–склад–борт уступа справа* и падения с уступа на маршруте *забой–склад–борт уступа слева*.

Рис. 3. W-карта для стационарного и *прямого нестационарного* сигналов с понижающейся мгновенной время-зависимой частотой; *последний* характеризует уход ТТ БТС влево от НОТ

Fig. 3. W-map for stationary and *direct non-stationary* signals with decreasing instantaneous time-dependent frequency; the latter characterizes CT UMV leaving to the left of NAP

При отклонении ТТ влево на вогнутом участке S-фрейма, уходящем также влево, возврат ТТ к НОТ под действием модального управления производится более плавно – во избежание перерегулирования (пересечения НОТ в обратную сторону) – по апериодике 2-го порядка. При этом лидарно-радарно-сонарный узел непрерывно сканирует окружающую обстановку, в частности на предмет обнаружения встречного БТС.

На фрагменте S-фрейма, уходящего по кривой вправо, точками A_r и B_r отмечены точки перегиба сигнала левой и правой прямой траекторий, а точкой E_r – точка перегиба на правой обратной траектории. Точки активации процедуры модального управления – это моменты C_r и D_r на левой и правой траекториях соответственно.

Обратные ПП в режиме модального управления для этого S-фрейма имеют такой же характер, что и для S-фрейма с левым искривлением.

С целью информативно полной и семантически прозрачной обработки сигналов ПСАУ и ПСВУ в программные комплексы последних введены фрагменты, обеспечивающие формирование так называемых вейвлет-функций [12, 13] и квадратичных вейвлет-распределений класса Козна [14–16].

На рис. 3 представлен вид-реконструкция вейвлет-карты (W-карты), на которой в формате время-частотных распределений Вигнера [13, 16, 17] изображен сигнал ухода ТТ БТС влево от НОТ, а на рис. 4 – сигнал отклонения ТТ БТС вправо. При этом девиации ТТ влево от НОТ соответствует задаваемое в программно-аппаратном комплексе АСД снижение частоты сигнала обобщенной переменной $x(t)$, а девиации ТТ вправо от НОТ – повышение.

На рис. 3 момент τ_l соответствует началу девиации ТТ БТС от НОТ под действием автономно-спорадических возмущений. Характер сигнала ТТ определяется аperiodической 2-го порядка и сформирован из отдельных время-частотных атомов (ВЧА) в соответствии с алгоритмом вейвлет-поиска соответствия [13, 16, 18]. По параметрам отображения данного нестационарного процесса определяются параметры предстоящего режима, режима динамического модального управления. Кроме того, здесь же приведена форма вейвлет-отображения стационарного по частоте $f_{\text{НОТ}}$ сигнала.

На рис. 4 демонстрируется время-частотная динамика сигнала, характеризующего ТТ БТС в стационарном и нестационарном режимах при уходе ТТ вправо от НОТ. Здесь момент τ_r – момент начала ухода ТТ от НОТ.

Процесс девиации (отклонения) текущей траектории БТС может быть описан двухэкспоненциальной функцией переходной характеристики аperiodического звена второго порядка:

$$x(t)_{b/ei} = x(t)_{0b/ei} + x(t)_{mb/ei} \sin[2\pi f_{\text{var}}(t - \tau_b) - \varphi_0],$$

где $f_{\text{var}} = f_b[1(t - \tau_b)] + (f_e - f_b)[1(t - \tau_e) - \exp[-(t - \tau_b)/T_3]T_3/(T_3 - T_4) + \exp[-(t - \tau_b)/T_4]T_4/(T_3 - T_4)]$ – изменение частоты chirp-сигнала [17] (частотно-время-зависимого сигнала) прямого процесса девиации траектории БТС от НОТ; $x(t)_{mb/ei} = x_{mbi} + t/T$, $\tau_b \leq t \leq \tau_e$ – изменение амплитуды переменной составляющей этого сигнала; $x(t)_{0b/ei} = x_{0bi}[1(t - \tau_b)] + (x_{0ei} - x_{0bi})[1(t - \tau_e) - \exp[-(t - \tau_b)/T_3]T_3/(T_3 - T_4) + \exp[-(t - \tau_b)/T_4]T_4/(T_3 - T_4)]$ – изменение аperiodической составляющей прямого процесса девиации текущей траектории от НОТ.

Таким образом, полный график переходных процессов при двух циклах девиации текущей траектории включает в себя прямые возмущенные и обратные восстанавливающие процессы.

Результаты. В работе изложено решение актуальной в научном и прикладном значении комплексной задачи разработки планируемых маршрутов передвижения беспилотных транспортных средств в карьере, моделей маршрутов в рамках так называемых S-фреймов.

Описана структурная позиция программного комплекса в составе автоматизированной системы диспетчеризации в рамках глобальной структуры управления «Умный карьер» (СУУК).

Рассмотрено функциональное назначение разрабатываемой автоматизированной системы диспетчеризации (АСД) как фрагмента центра управления (ЦУ), входящего в состав системы СУУК.

Приведена информация по характеру планируемых маршрутов БТС.

Кроме того, приведены данные, позволяющие спроектировать автоматизированную систему модального управления нестационарным движением БТС по маршрутам, разработанным с помощью картографических систем.

Приведена информация о математической формализации временных сигналов, характеризующих прямые и обратные переходные процессы, которые отражают динамику текущих траекторий БТС на рабочих маршрутах.

Схематично представлены графики переходных процессов в одномерном формате и в многомерном виде (в форме вейвлет-распределений); это позволяет вести текущую обработку сигналов, отображающих перемещение БТС, в семантически прозрачном и информационно насыщенном виде.

Рис. 4. W-карта для стационарного и *прямого нестационарного* сигналов с повышающейся мгновенной время-зависимой частотой; последний характеризует уход ТТ БТС вправо от НОТ

Fig. 4. W-map for stationary and *direct non-stationary* signals with increasing instantaneous time-dependent frequency; the latter characterizes CT UMV leaving to the right of NAP

Решение этой задачи представляет существенный научный и практический интерес для экономики страны, в частности для горнорудной отрасли, и может быть востребовано и эффективно использовано как в указанной отрасли, так и при проектировании дорог, лишенных дорожной разметки, в городской и сельской местностях, в других отраслях промышленности.

Выводы. В статье описаны два подхода для получения снимков локаций, позволяющих создавать фрейм-модели как локальных маршрутов для БТС, так и состояния горнотранспортного оборудования в целом.

Предложен проект описания характеристик функций управления, заложенных в подсистемы автономного и внешнего управления (ПСАУ и ПСВУ).

В концепцию формирования моделей перемещения БТС по текущим маршрутам введено использование аппарата вейвлет-преобразований для регистрации и отображения на видеографическом уровне комплекса сигналов, характеризующих динамику БТС при ведении вскрышных / добычных работ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Беспилотные летательные аппараты. Воронеж: Научная книга, 2015. 616 с.
2. Бодрова А. С., Безденежных С. И. Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами: конф. Коломна, 2016. С. 106–113.
3. Бойко А. Области применения беспилотников. URL: <http://robotrends.ru/robopedia/oblasti-primeneniya-bespilotniko/> (дата обращения 22.09.2020).
4. Василин Н. Я. Беспилотные летательные аппараты. Минск: Попурри, 2017. С. 5–7, 98–105.
5. Хлебникова Т. А., Оприцова О. А. Экспериментальное исследование современных программных продуктов для моделирования геопространства по материалам БПЛА // Интер-

ЭКСПОГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгресс: Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. материалов в 2 т. (Новосибирск. 17–21 апреля 2017 г.). Новосибирск: СГУГиТ, 2017. Т. 1. С. 3–6.

6. Agisoft Photo Scan Professional Edition. Руководство пользователя. Версия 1.2. URL: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_ru.pdf.

7. PHOTOMOD. Руководство пользователя. Версия 5.3. М.: Пакурс, 2014. 181 с.

8. Dubinkin Dmitry, Sadovets Vladimir, Syrkin Ilya, and Chicherin Ivan. Assessment of the need to create contro sytem of unmanned dump truck // XVIII Scientific Forum "Ural Mining Decade" (UMD 2020): E3S Web of Conferences. 177, 03022 (2020).

9. Гудвин Г. К., Гребен С. Ф., Сальгадо М. Э. Проектирование систем управления. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 911 с.

10. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления / пер. с англ. Под ред. Я. З. Цыпкина. Наука, Главн. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1985. 296 с.

11. Федосенков Б. А. Теория автоматического управления. Классические и современные разделы. Кемерово: КемГУ, 2018. 322 с.

12. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. 671 с.

13. Федосенков Б. А., Федосенков Д. Б. Автоматизированное управление смесеприготовительными процессами в вейвлет-среде: монография. Кемерово: КемТИПП, 2015. 189 с.

14. Cohen L. Time-frequency analysis. New York: Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1995. 299 p.

15. Cohen's class time-frequency distributions for measurement signals as a means of monitoring technological processes / D. B. Fedosenkov [et al.] // Steel in Translation. 2019. Vol. 49. No. 4. P. 252–256.

16. Mallat S. A wavelet tour of signal processing. New York: Academic Press (2nd Ed.), Ecole Polytechnique, Paris; Courant Institute, New York University, Library of Congress Catalog Card Number: 99-65087, 1999; Reprinted 2001. 637 p.

17. Cohen L. Wigner distribution for finite duration or band-limited signals and limiting cases // IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing. 1987. Vol. ASSP-35. No. 6. P. 796–806.

18. Probabilistic matching pursuit with Gabor dictionaries / S. E. Ferrando [et al.] // Signal Processing. 2000. Vol. 80. P. 2099–2120.

Поступила в редакцию 9 октября 2020 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, 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, руководитель научного центра цифровых технологий Кузбасского государственного технического университета имени Т. Ф. Горбачева. E-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-109-120

The concept of controlling the unmanned vehicles in open pit mining

Ivan V. Chicherin¹, Boris A. Fedosenkov¹, Ilya S. Syrkin¹, Vladimir Iu. Sadovets¹, Dmitrii M. Dubinkin¹

¹ T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia.

Abstract

Introduction. The article presents the results of studies related to the description of the synthesis and further analysis of the dynamic behavior of unmanned vehicles (UMV) operating in coal-mining pits and other mining quarries. The urgency of the discussed study is dictated by the need to create safe and effective conditions for stripping / mining and transportation operations. This is ensured, among other things, by the operation of unmanned heavy-duty dump cars.

Research aim is to develop the concept for the formation of route parameters and models of the movement dynamics of vehicles along technological routes.

Methodology. The paper describes the technology for generating and processing the signals in control subsystems as parts of both the computer-aided dispatching system and the on-board autonomous

control subsystem of the UMV. The methods used in the research include the study of the forms and characteristics of current trajectories (CT) in relation to a nominal axial trajectory (NAT). In this case, a current trajectory of the UMV is considered within the framework of the so-called S-frames, which are generated in the form of geolocations on a working route of the UMV from the mining face to the place of unloading and vice versa. As a variable characterizing the behavior of the UMV on a current trajectory, a 1D-signal with a time-dependent frequency is adopted, the nature of the change of which is determined by the dynamic shape of a CT with regard to the NAT.

Results. Such chirp-signals, together with the wavelet transform apparatus introduced into consideration, allow in a semantically transparent and information-rich video graphic form to represent and subject to further processing the signals characterizing a certain UMV current behavior on the route. The obtained parameters of such secondary wavelet representations of the UMV current dynamics (wavelet maps) are further planned to be used in the subsystem for dynamic modal controlling the UMV movement in the opencast mine.

Conclusions. The results of the research allow us to form current routes of UMV's movement according to the models based on the analytical tools accompanying the dynamics of the UMV, proposed in the work.

Key words: unmanned vehicle; current trajectory; nominal axial trajectory; transient processes; S-frame; wavelet transforms; wavelet maps.

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. 075-11-20 19-034 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. *Unmanned vehicles*. Voronezh: Nauchnaya kniga Publishing; 2015. (In Russ.).
2. Bodrova A. S., Bezdenezhnykh S. I. *The prospect of developing and applying the complexes with unmanned aerial vehicles: conf.* Kolomna; 2016. (In Russ.).
3. Boiko A. *Unmanned vehicles application areas*. Available from: <http://robotrends.ru/robopedia/oblasti-primeneniya-bespilotniko> [Accessed 22 September 2020].
4. Vasilin N. Ia. *Unmanned aerial vehicles*. Minsk: Popurri Publishing; 2017. (In Russ.).
5. Khlebnikova T. A., Opritova O. A. Experimental research on modern software for geospace simulation according to the data from UAV. In: *Inter-expo GEO-Siberia-2017. 13th International scientific conf. "Remote sensing techniques and photogrammetry, environmental monitoring, and geocology": proc. in 2 vol.* Novosibirsk, 17–21 April 2017. Novosibirsk: SSUGT Publishing; 2017. Vol. 1. P. 3–6. (In Russ.).
6. *Agisoft Photo Scan Professional Edition*. Available from: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_ru.pdf.
7. *PHOTOMOD. User's manual. Version 5.3*. Moscow: Rakurs Publishing; 2014. (In Russ.).
8. Dubinkin Dmitry, Sadovets Vladimir, Syrkin Ilya, and Chicherin Ivan. Assessment of the need to create contro sytem of unmanned dump truck. In: *XVIII Scientific Forum "Ural Mining Decade" (UMD 2020): E3S Web of Conferences*. 177, 03022 (2020).
9. Gudvin G. K., Grebe S. F., Salgado M. E. *Designing control systems*. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy Publishing; 2004. (In Russ.).
10. Streits V. *State space method in the theory of discrete linear control systems: translation from English*. Tsyarkin Ia. Z. (ed.) Nauka, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury Publishing; 1985. (In Russ.).
11. Fedosenkov B. A. *The theory of automatic control. Classical and modern parts*. Kemerovo: KemSU Publishing; 2018. (In Russ.).
12. Malla S. *Wavelets in signal processing*. Moscow: Mir Publishing; 2005. (In Russ.).
13. Fedosenkov B. A., Fedosenkov D. B. *Computer-assisted control of mixture blending in a wavelet-medium: monograph*. Kemerovo: KemIFST Publishing; 2015. (In Russ.).
14. Cohen L. Time-frequency analysis. New York: Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1995. 299 p.
15. Fedosenkov D. B. [et al.] Cohen's class time-frequency distributions for measurement signals as a means of monitoring technological processes. *Steel in Translation*. 2019; 49(4): 252–256.
16. Mallat S. *A wavelet tour of signal processing*. New York: Academic Press (2nd Ed.), Ecole Polytechnique, Paris; Courant Institute, New York University, Library of Congress Catalog Card Number: 99-65087, 1999; Reprinted 2001. 637 p.
17. Cohen L. Wigner distribution for finite duration or band-limited signals and limiting cases. *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*. 1987. Vol. ASSP-35. No. 6. P. 796–806.
18. Ferrando S. E. et al. Probabilistic matching pursuit with Gabor dictionaries. *Signal Processing*. 2000; 80: 2099–2120.

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

Ilya S. Syrkin – 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: 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, Head of the Scientific Center “Digital Technologies”, 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. Концепция управления беспилотными транспортными средствами в условиях открытых горных работ // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 8. С. 109–120. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-109-120

For citation: 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.). DOI: 10.21440/0536-1028-2020-8-109-120