



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.55: 004.942

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-1>

Методы формирования цифрового двойника акватории для навигации беспилотных судов



Игорь РОЗЕНБЕРГ



Сергей СОКОЛОВ



Ирина ДУБЧАК

Игорь Наумович Розенберг¹, Сергей Сергеевич Соколов², Ирина Александровна Дубчак³

^{1, 2, 3} Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

¹ ORCID 0000-0001-9589-6783; Scopus Author ID: 15136568900; РИНЦ SPIN-код: 2958–4186; РИНЦ Author ID: 652172.

² ORCID 0000-0002-4581-2518; WoS Researcher ID: A-9507-2015; Scopus Author ID: 56606754000; РИНЦ SPIN-код: 3175-5350; РИНЦ Author ID: 207642.

³ РИНЦ SPIN-код: 1330-5849; РИНЦ Author ID: 1152475.

✉ ³ info@science-ru.ru.

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрен комплекс методов, с помощью которых возможно формирование цифрового двойника акватории для осуществления автономной навигации речного судна для решения задач моделирования движения автономного судна в акватории при различных параметрах окружающей среды (скорости течения, скорости ветра и пр.), в том числе динамически изменяемых в процессе движения, отработки алгоритмов действия автономного судна в условиях возникающих угроз и чрезвычайных происшествий. Предложенные методы включают в себя аэрофотосъемку с беспилотных авиационных систем, воздушное лазерное сканирование и координирование результатов их обработки с применением геодезического оборудования, функционирующего

с использованием глобальных навигационных спутниковых систем и служащего для увязки всех получаемых пространственных данных в единую систему координат, для формирования высокоточных компонентов цифрового двойника акватории, включая линию уреза воды и части надводных элементов.

Для формирования донной части цифрового двойника акватории рассмотрена возможность применения данных батиметрической съемки многолучевым эхолотом, а также данных аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна, оснащенного высокоточным геодезическим приемником и бортовой инерциальной системой для закладки маршрутов батиметрической съемки.

Ключевые слова: цифровой двойник акватории, автономное судовождение, цифровая модель рельефа, цифровая модель дна, воздушное лазерное сканирование, аэрофотосъемка, водный транспорт.

Для цитирования: Розенберг И. Н., Соколов С. С., Дубчак И. А. Методы формирования цифрового двойника акватории для навигации беспилотных судов // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-1>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире растёт интерес к созданию автоматизированных беспилотных (безэкипажных) судов [1]. Управление безэкипажным судном представляет собой сложнейшую техническую проблему, одной из компонент которой является цифровой двойник акватории (ЦДА), содержащий в себе всю полноту данных, требуемых для навигации беспилотных (автономных) судов [2].

В 2002 году концепция цифрового двойника была первоначально представлена как «модель отражения информации» профессором Мичиганского университета Майклом Гривзом [3; 4]. Термин «цифровой двойник» (ЦД) был официально принят в 2010 году, когда Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) США предоставило подробную концепцию. Это описание относится к комплексному использованию физических моделей, датчиков, исторических эксплуатационных данных и соответствующей дополнительной информации для моделирования междисциплинарных и многомасштабных процессов. Цель состоит в том, чтобы создать виртуальное представление, которое может отражать весь жизненный цикл соответствующего физического объекта [5]. По сути, предлагаемая модель ЦД включает в себя три основных компонента: физический продукт, виртуальный продукт и связь между этими двумя продуктами.

Хотя концепция ЦД первоначально появилась в аэрокосмической и производственной областях, с тех пор она эволюционировала, распространив своё применение на нематериальные процессы, такие как умные города [6], прецизионное здравоохранение [7–9], цифровую Землю и даже метавселенную [10–14]. ЦД вошел в десятку ключевых технологических трендов цифровой индустрии 2019 года по версии Gartner [15]. Ярким примером применения ЦД является проект «Destination Earth», инициированный Европейским союзом в марте 2021 года. Этот проект направлен на создание чрезвычайно точного ЦД Земли для непрерывного и точного мониторинга здоровья планеты. Кроме того, он направлен на содействие высокоточному прогнозированию стихийных бедствий и антропогенной деградации окружающей среды, а также на изучение социально-

экономических последствий изменения климата и серьёзных стихийных бедствий [13].

С развитием технологии ЦД диапазон её применения постепенно расширяется, включает в том числе морскую среду, тем самым способствуя появлению цифрового двойника океана (ЦДО). На сегодняшний день реализовано множество применений ЦД в различных сценариях [16]. Например, с помощью реконструкции волн и прогнозирования движения судов были разработаны системы ЦД, обеспечивающие в режиме реального времени работу морских судов [17]. С применением технологии ЦД созданы высокоточные системы моделирования для беспилотных подводных глайдеров [18].

ГОСТ определяет «цифровой двойник изделия» как «систему, состоящую из цифровой модели изделия и двусторонних информационных связей с изделием (при наличии изделия) и (или) его составными частями»¹. Если расширять понятие цифрового двойника за рамки «изделия», то получило признание определение «цифрового двойника как цифровой (виртуальной) модели любых объектов, систем, процессов или людей, точно воспроизводящей форму и действия оригинала и синхронизированной с ним»². Цифровой двойник необходим «для моделирования процессов в оригинале в тех или иных условиях»².

Согласно определению, данному в Водном кодексе Российской Федерации, акватория – «водное пространство в пределах естественных, искусственных или условных границ», то есть некоторая водная поверхность, ограниченная условно или физически. Однако в процессе навигации используется в первую очередь информация о глубинах акватории, рельефе дна, течениях, береговых навигационных знаках, препятствиях и пр.

Отсюда следует, что цифровой двойник акватории (ЦДА) – это копия в виртуальной среде подводной и береговых частей акватории, а также её водной толщи, в полноте и достоверности достаточной для осуществ-

¹ ГОСТ Р 57700.37-2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения».

² Что такое цифровые двойники и где их используют // РБК Тренды. [Электронный ресурс]: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6107e5339a79478125166eeb?from=copy>. Доступ 02.11.2023.





вления автономного судовождения, являющаяся синтезом 3D-моделей этих частей, картографической и семантической информации об объектах, на них расположенных, и динамических процессов, протекающих на их территории.

С помощью ЦДА возможно решение спектра задач, включающих, например, моделирование движения в акватории автономного судна при различных параметрах окружающей среды (скорости течения, скорости ветра), в том числе динамически изменяемых в процессе движения, отработка алгоритмов действия автономного судна в условиях возникающих угроз и ЧП [19], моделирование маршрутов судна в зависимости от задач (самый быстрый маршрут, самый экономный маршрут), использование при осуществлении навигации для точного позиционирования судна путем сравнения данных с внешних датчиков с данными ЦДА [20] и выбора дальнейших действий в зависимости от обстановки и текущих задач.

Целью исследования являлось определение комплекса методов, с помощью которых возможно формирование цифрового двойника акватории для осуществления автономной навигации речного судна для решения задач моделирования его движения в акватории при различных параметрах окружающей среды, в том числе динамически изменяемых в процессе движения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Объекты и структура цифрового двойника акватории

Для успешного функционирования ЦДА следует наполнить его всеми данными, используемыми для навигации судов. Основное требование к данным ЦДА – все данные должны быть увязаны между собой и находиться в единой системе координат. Компоненты ЦДА по отношению к изменению координат в пространстве и к своей форме подразделяются на статические, переходные и динамические. Кроме того, в ЦДА динамические объекты зависят от факторов – переменных величин, влияющих на состояние объекта.

К статическим объектам ЦДА относятся объекты, не меняющие своего пространственного положения: это большинство антропогенных объектов – мосты, причалы, навигационные знаки, плотины и пр. Также к стати-

ческим объектам в большинстве случаев можно отнести береговую линию.

К переходным объектам ЦДА относятся объекты, обладающие возможностью изменять свою форму и координаты с течением времени. Как правило, это объекты, перемещающиеся и меняющие форму в реках под воздействием русловых потоков. Также к переходным объектам следует отнести часть антропогенных объектов, таких как бакены, вехи и иные, изменяющих свое положение в зависимости от ветра и течения, а также, в каждую новую навигацию, – из-за ошибок места постановки якоря плавучего знака.

К динамическим объектам ЦДА относятся движущиеся в пределах акватории объекты – суда, паромы, плавучие препятствия и т.д. Движение динамических объектов зависит от факторов – переменных величин, влияющих на состояние объекта, – скорости и направления течения и ветра.

Компоненты ЦДА объединены между собой в единую структуру данных, представляющую собой совокупность элементов данных, между которыми установлены определенные связи, а также способ организации данных для более эффективного использования. Структура данных в рамках цифрового двойника акватории представляет собой атрибутивную информацию, заложенную в каждый слой каждого компонента.

Слои или объекты обозначаются тремя следующими типами знаков: площадные (полигональные), линейные и точечные.

Площадными знаками отмечаются объекты, изображаемые в масштабе карты, то есть такие, размеры которых (длину, ширину и площадь) можно измерить по карте, например, крупное озеро, река и др. Нормативные документы ранее давали такое определение: «Площадной знак состоит из контура изображаемого объекта и заполняющих его фоновой окраски, цветовой штриховки или сетки одинаковых значков. Контурные объектов показываются на карте сплошными линиями или пунктиром в соответствии с их очертаниями на местности»³.

Линейными знаками изображаются узкие протяженные объекты, шириной которых

³ Приказ Министерства регионального развития Российской Федерации от 31 января 2007 года N 4 «Об утверждении Требований к способам отображения на картах (схемах) точечных, линейных и площадных объектов, предусмотренных Положением о составе схем территориального планирования Российской Федерации».

в масштабе карты можно пренебречь, а длины которых выражаются в масштабе карты (железнодорожные пути, дороги, водотоки, ЛЭП, продуктопроводы и другие объекты).

Точечные объекты – это объекты, расположенные только в одной точке пространства в масштабе карты (одинокое дерево, дома, колодцы, пункты государственной геодезической сети). Точечные объекты могут быть обозначены координатами своего местоположения.

В зависимости от требуемого масштаба формируемого плана один и тот же объект может изображаться по-разному, то есть при создании плана крупных масштабов объект может быть обозначен площадным знаком, а при создании плана мелкого масштаба – точечным.

В каждом слое содержится собственная атрибутивная информация, которая в свою очередь подразделяется на два типа: позиционная и непозиционная.

Позиционная информация описывает положение объектов в пространстве в двухмерных или трёхмерных координатах.

К непозиционной информации относятся качественные характеристики объектов – семантические данные, а также количественные – статистика. Непозиционная информация представляется в виде текстовых и/или числовых параметров. В большинстве случаев при непосредственной работе с данными тип объекта маркируется и опознается по его атрибутивным параметрам (например, мост имеет название и идентифицируется по строительным материалам (железобетонный, металлический, каменный, деревянный), ширине, высоте, наличию судоходных пролетов, количеству судоходных пролетов).

Таким образом, атрибутивная информация объектов различных компонентов ЦДА будет содержать в себе следующие данные:

- позиционные – положение объекта в пространстве: X , Y , Z . Данный тип информации наиболее применим к точечным объектам, однако для площадных и линейных объектов также возможен вывод пространственной информации в атрибуты путём создания отдельного точечного слоя с извлеченными из полигона или линии вершинами;

- непозиционные – семантическое и статистическое описание объекта: номер объекта, имя объекта, характеристика объекта,

связь с пространственной природой объекта (площадь, периметр, ширина, высота).

Методы формирования цифрового двойника акватории

Сбор пространственных данных для формирования цифрового двойника акватории производится одновременно несколькими способами – путём воздушного лазерного сканирования, аэрофотосъёмки, наземной геодезией и батиметрической съёмкой.

Воздушное лазерное сканирование, аэрофотосъёмка, наземная геодезия применяются для создания элементов береговой и надводной части ЦДА. Для подводной части ЦДА используется батиметрическая съёмка.

Воздушное лазерное сканирование

Воздушное лазерное сканирование (ВЛС) или лидарная съёмка – технология, позволяющая создавать на основе полученных облаков точек цифровые модели рельефа, цифровые модели местности и трёхмерные модели объектов.

Данный метод является самым быстрым, полным и достоверным способом сбора пространственно-геометрической информации о местности. Сутью метода воздушного лазерного сканирования является процесс записи координат X , Y , Z для каждого из отражений. Благодаря этому в результате получается пространственно-определённая модель местности.

Метод воздушного лазерного сканирования осуществляется при помощи вращающегося зеркала на модуле лидара, угол поворота которого измеряется энкодером, установленным на оси вращения зеркала. Энкодер – поворотный датчик, который имеет специальный поворотный круг, разделенный на секторы, именно благодаря ему данная конструкция позволяет быстро определить угол поворота. При движении воздушного судна сканирующий лазерный пучок направляется на различные объекты местности в плоскости, перпендикулярной оси вращения зеркала. Отраженный сигнал сканирующего лазерного пучка попадает на зеркало и регистрируется приёмником излучения, а затем преобразуется в привычные координаты X , Y , Z .

Результатом воздушного лазерного сканирования является облако точек лазерных отражений (ТЛО), которое в дальнейшем



преобразуется в облако точек достаточной плотности для последующего создания цифровых моделей.

Один из важнейших этапов обработки данных ВЛС – классификация плотного облака. Данный процесс позволяет разбить на классы облако точек, что в дальнейшем упрощает процесс работы с данными. Суть классификации плотного облака точек – вынос группы точек по различным признакам в определённый класс. Данный процесс является автоматическим, но требует контроля.

Аэрофотосъёмка

«Современная аэрогеодезия базируется на методах сбора геопространственной информации с движущихся носителей – цифровой аэро- и космической фотосъёмке (АФС), методах прямого геопозиционирования и методах цифровых преобразований результатов условно статических и динамических съёмки объектов к их статическим моделям в заданной системе координат» [21].

«Ортофотоплан – фотографический план местности на точной геодезической опоре, полученный путём аэрофотосъёмки с последующим преобразованием аэроснимков (из центральной проекции в ортогональную) на основе эффективного метода их дифференциального ортофототрансформирования» [22], и представляет из себя топографический цифровой фотоплан, составленный из ортофотоснимков, полученных в результате ортотрансформирования. Ортофотоплан создаётся в рамках номенклатурных листов или в заданных границах и характеризуется определённым номинальным пространственным разрешением.

Процесс создания ортофотоплана состоит из нескольких этапов: это фототриангуляция, увязка с наземным обоснованием, уточнение параметров внешнего ориентирования снимков, ортотрансформирование снимков [23].

Завершающий этап в построении ортофотоплана – ортотрансформирование снимков. Ортотрансформирование – математически строгое преобразование исходного изображения (снимка) в ортогональную проекцию и устранение искажений, вызванных рельефом, условиями съёмки и типом камеры.

Наземное геодезическое обоснование

Для точной привязки воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъёмки необ-

ходимо выполнить геодезическое обоснование береговой части полигона ЦДА путём измерения координат центров авиационных опознаков на территории проведения ВЛС и АФС. Для этого требуется предварительное размещение авиационных опознаков на точках с известными координатами с целью последующей точной координатной привязки результатов фотограмметрической обработки материалов АФС и ВЛС.

В качестве опознаков рекомендуется использовать имеющие «твёрдые контуры на местности, контрастные с окружающим фоном и хорошо различимые на аэрофотоснимках» объекты. «Рекомендуется производить надёжное маркирование опознаков. При необходимости опознаки наносятся краской на дорожное покрытие. Форма опознака должна обеспечивать безошибочное определение его центра», в связи с чем рекомендуется использовать «опознаки типа «мишень», полукрест или крест»⁴.

Расположение авиационных опознаков должно подчиняться следующим принципам:

- на прямоугольных участках опознаки располагаются по схеме «конверт», предусматривающей установку не менее пяти знаков; четыре авиационных опознака устанавливаются в углах прямоугольника и один в зоне пересечений диагоналей. При увеличении геометрической сложности границ полигона АФС, сложности застройки и рельефа количество опознаков должно увеличиваться с равномерным распределением внутри площади съёмки и в каждой угловой зоне (рис. 1);

- при выполнении съёмки линейно-протяжённого объекта опознаки располагаются попарно в начале и конце участка съёмки и далее по линии трассы участка не реже чем через каждые 500 м вдоль оси (рис. 2);

- «при проектировании нескольких полётных заданий с планируемыми зонами перекрытия, необходимо установить не менее 2-х опознаков в зоне перекрытия. При ширине перекрытия полётных заданий более 1 км рекомендуется устанавливать опознаки не реже чем через 250 м»⁴;

⁴ ОДМ 218.9.017-2019. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по производству аэрофототопографических работ с использованием беспилотных летательных аппаратов при изысканиях в целях строительства и реконструкции автомобильных дорог. Федеральное дорожное агентство (РОСАВТОДОР). Москва, 2021.

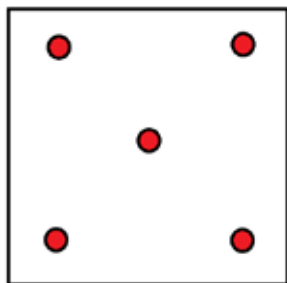


Рис. 1. Расположение опознаков при площадной АФС [выполнено авторами].

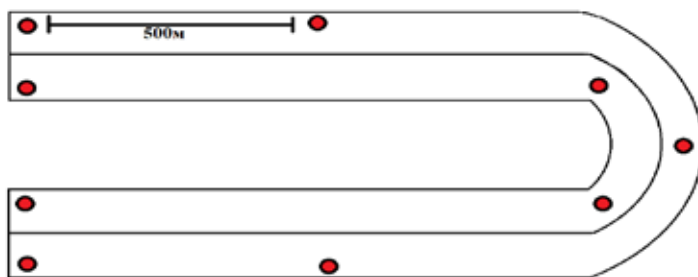


Рис. 2. Расположение опознаков при коридорной АФС [выполнено авторами].

– «на участках с разницей высот более 20 м, рекомендуется устанавливать дополнительные опознаки в характерных переломных точках»⁴;

– предпочтительное размещение опознаков – на уровне земли;

– над опознаком не должно быть объектов, загораживающих его от АФС в надири, включая деревья, контактные сети и провода ЛЭП;

– не размещать авиационные опознаки рядом с высокими объектами, включая заборы, столбы, деревья и пр.

Измерение координат центров опознаков целесообразно выполнять с применением оборудования глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) геодезического класса в режиме дифференциальной коррекции для сокращения времени измерений.

Дифференциальная коррекция – это метод улучшения точности собираемых ГНСС-данных. Метод дифференциальной коррекции состоит в улучшении точности ГНСС-приёмника за счёт учёта навигационных поправок, получаемых со сторонних источников. Как правило, для выделения поправок используется ГНСС-приёмник, неподвижно расположенный в точке с известными координатами (базовая станция). Это позволяет выделять «шум» основного сигнала, обусловленный различными искажениями (неоднородности атмосферы, помехи от статичных и движущихся объектов, перетражения сигнала), формировать поправки и передавать их по каналу связи на второй подвижный приёмник (ровер), используемый для измерения точек с неизвестными координатами, что позволяет устранить ошибки в координатах, полученных на передвижном приёмнике, и с большей точностью определить его координаты.

Суть выполнения геодезических ГНСС-измерений в режиме реального времени

(кинематика реального времени, РТК) – получение дифференциальных поправок базовой станцией от каждого спутника на орбите, к которому она подключена, обработка этих дифференциальных поправок в онлайн-режиме и передача их (посредством мобильной связи или радиосвязи) в ровер.

В результате данных действий ровер, получивший поправки, автоматически уточняет своё местоположение, выводит дифференциально скорректированные координаты на экран, а также записывает эти координаты в каталог при непосредственном выполнении измерений.

В случае выполнения ГНСС-измерений с последующей камеральной обработкой (кинематика в пост-обработке, РРК) базовая станция записывает все полученные от спутника дифференциальные поправки, в то время как ровер записывает телеметрию.

Далее в камеральных условиях файл с дифференциальными поправками объединяется с телеметрией ровера в специализированном программном обеспечении, к ним добавляется файл эфемерид и производится обработка.

В результате получается каталог уточнённых геодезических измерений.

Также существует возможность произвести постобработку ГНСС-измерений, выполненных в режиме РТК, на случай если сигнал, передающий дифференциальные поправки от базовой станции к роверу, прервётся. Ровер, даже после потери сигнала, продолжит записывать данные телеметрии, которые позволят в постобработке получить каталог измеренных точек.

Батиметрическая съёмка

Батиметрические съёмки на водных объектах (реках, озерах, водохранилищах и в прибрежной зоне моря) выполняются



для картирования рельефа дна. В зависимости от ожидаемой сложности рельефа дна формируется сеть точек измерений, по которой в дальнейшем проводится измерение глубин.

Промеры производят по маршрутам, расположенным таким образом, чтобы минимизировать объем работ при заданной точности съёмки подводного рельефа [24].

Оптимизация маршрутов батиметрической съёмки может выполняться на основе аэрокосмической съёмки, так как видимая часть солнечного спектра хорошо пропускается водой и, как следствие, позволяет оценивать глубину с хорошей точностью [25]. К ограничивающим факторам определения донного рельефа аэрокосмическими методами относятся прозрачность воды (мутность), отсутствие хорошего освещения и наличие на поверхности воды возмущений (ряби).

Современная батиметрическая съёмка выполняется, как правило, с использованием многолучевого эхолота (МЛЭ) [26], выполняющего трёхмерное картирование рельефа дна на основании данных гидролокатора, сканирующего дно в плоскости, перпендикулярной направлению движения носителя. При этом для правильной привязки данных батиметрической съёмки носитель МЛЭ должен точно определять свое положение в пространстве. Определение положения в пространстве носителя осуществляется, как правило, с применением ГНСС-методов, либо в режиме RTK, либо в режиме PPK.

Современное гидроакустическое оборудование совместно «с программным обеспечением для производства гидрографических работ позволяет с высокой точностью производить сбор и обработку данных о рельефе дна» [27]. Гидроакустическое оборудование может устанавливаться на «гидрографические и специализированные суда, ...автономные и дистанционно управляемые подводные аппараты» [27].

«Данные, собранные и обработанные бортовым гидроакустическим комплексом, характеризуют уникальные особенности донного рельефа, как правило, представленные массивом глубин с географическими координатами. Полученные значения глубины характеризуются неопределенностями, вызываемыми отличием расчетных и фактических значений скорости звука в воде, и из-за аку-

стического рассеивания и поглощения донным грунтом» [27].

Многолучевой эхолот является одной из самых современных, эффективных и наиболее информативных систем для выполнения площадной гидроакустической съёмки и поэтому заслуживает внимания с точки зрения применения в целях навигационного ориентирования беспилотных автономных судов.

Датчик МЛЭ монтируется на днище судна. Подобное место размещения способствует получению более точных данных, снижает влияние на сигнал различных помех и искажений. Установленный МЛЭ при помощи преобразователей излучает короткие акустические импульсы в направлении дна акватории, формируя диаграммы направленности: широкую (120° – 150°), расположенную перпендикулярно ходу судна, и узкую (порядка 1° для высокоточных систем), расположенную вдоль хода судна.

«Таким образом, система выполняет пространственную фильтрацию акустических импульсов, отраженных от различных дискретных областей дна акватории вдоль полосы обзора, называемых пятнами облучения или пятнами засветки луча» [28]. Так во времени задержки акустического импульса и угла прихода луча формируется цифровой двойник рельефа дна.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Таким образом, для создания цифрового двойника акватории целесообразно применять комбинированные методы сбора информации. Для формирования береговой части ЦДА и надводных элементов эффективно использовать облако точек и трехмерные модели, построенные по данным аэрофотосъёмки и воздушного лазерного сканирования с геопривязкой по опознакам, измеренным геодезическими ГНСС-приемниками. Кроме того, данные аэрофотосъёмки могут использоваться для закладки маршрутов батиметрической съёмки.

Для формирования донной части ЦДА целесообразно использовать данные батиметрической съёмки МЛЭ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кириллова М. А., Рожко А. И. Перспективы развития безэкипажных судов в Российской Федерации // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2020. – № 3. – С. 16–22. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2020-3-16-22>.

2. Титов А. В., Баракат Л., Хаизаран А. Состояние и перспективы реализации технологии е-Навигации // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. – 2019. – Т. 11. – № 4. – С. 621–630. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-621-630.
3. Grieves, M. W. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. International Journal of Product Development, 2005, Vol. 2, Iss. 1–2, pp. 71–84. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJPD.2005.006669>.
4. Grieves, M. W. Digital Twins: Past, Present, and Future. In: The Digital Twin. Springer International Publishing, Cham, 2023, pp. 97–121. DOI: 10.1007/978-3-031-21343-4.
5. Glaessgen, E., Stargel, D. The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U. S. Air Force Vehicles. Structural Dynamics and Materials Conference, Honolulu, 2012, 1818. DOI: 10.2514/6.2012-1818.
6. Qi, Y., Li, H., Pang, Z., Gao, W., Liu, C. A Case Study of the Relationship Between Vegetation Coverage and Urban Heat Island in a Coastal City by Applying Digital Twins. Frontiers in Plant Science, 2022, Vol. 13, 861768. DOI: 10.3389/fpls.2022.861768.
7. Torkamani, A., Andersen, K. G., Steinhubl, S. R., Topol, E. J. High-Definition Medicine. Cell, 2017, Vol. 170, Iss. 5, pp. 828–843. DOI: 10.1016/j.cell.2017.08.007.
8. Rozenberg, O., Greenbaum, D. Making It Count: Extracting Real World Data from Compassionate use and Expanded Access Programs. American Journal of Bioethics, 2020, Vol. 20, Iss. 7, pp. 89–92. DOI: 10.1080/15265161.2020.1779857.
9. Barat, S., Parchure, R., Darak, S., Kulkarni, V., Paranjape, A., Gajrani, M. [et al]. An Agent-Based Digital Twin for Exploring Localized Non-Pharmaceutical Interventions to Control COVID-19 Pandemic. Transactions of the Indian National Academy of Engineering, 2021, Vol. 6, Iss. 2, pp. 323–353. DOI: 10.1007/s41403-020-00197-5.
10. Tao, F., Zhang, H., Liu, A., Nee, A. Y. C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, Vol. 15, Iss. 4, pp. 2405–2415. DOI: 10.1109/TII.2018.2873186.
11. Huang, S., Wang, G., Yan, Y., Fang, X. Blockchain-based data management for digital twin of product. Journal of Manufacturing Systems, 2020, Vol. 54, pp. 361–371. DOI: 10.1016/j.jmsy.2020.01.009.
12. Shen, W., Hu, T., Zhang, C., Ma, S. Secure sharing of big digital twin data for smart manufacturing based on blockchain. Journal of Manufacturing Systems, 2020, Vol. 61, pp. 338–350. DOI: 10.1016/j.jmsy.2021.09.014.
13. Bauer, P., Stevens, B., Hazeleger, W. A digital twin of Earth for the green transition. Nature Climate Change, 2021, Vol. 11, pp. 80–83. DOI: 10.1038/s41558-021-00986-y.
14. Wu, Y., Zhang, K., Zhang, Y. Digital Twin Networks: A Survey. IEEE Internet of Things Journal, 2021, Vol. 8, Iss. 18, pp. 13789–13804. DOI: 10.1109/IIOT.2021.3079510.
15. Panetta, K. Gartner Top 10 strategic technology trends for 2019. October 15, 2018. [Электронный ресурс]: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019>. Доступ 02.11.2023.
16. Qu, Q., Nurgaliev, I., Muzammal, M., Jensen, C. S., Fan, J. On spatio-temporal blockchain query processing. Future Generation Computer Systems, 2019, Vol. 98, pp. 208–218. DOI: 10.1016/j.future.2019.03.038.
17. Lee, J.-H., Nam, Y.-S., Kim, Y., Liu, Y., Lee, J., Yang, H. Real-time digital twin for ship operation in waves. Ocean Engineering, 2022, Vol. 266, Part 2, 112867. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.112867.
18. Hu, S., Liang, Q., Huang, H., Yang, C. Construction of a digital twin system for the blended-wing-body underwater glider. Ocean Engineering, 2023, Vol. 270, 113610. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.113610.
19. Сорокин А. Ю., Иванов Е. В., Безвесильная А. А., Клишкин А. А. О подходе к повышению точности цифровых двойников рельефа местности на основе анализа цифровых пространственных геоданных // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2022. – № 1 (52). – С. 50–61. [Электронный ресурс]: <https://amchs.ru/upload/iblock/bba/ZHurnal-2022-1.pdf> [полный текст выпуска]. Доступ 23.11.2023.
20. Пинский А. С. Е-навигация и безэкипажное судовождение // Транспорт Российской Федерации. – 2016. – № 4 (65). – С. 50–54. EDN: WMAHYT.
21. Зотов Р. В. Аэрогеодезия: Учеб. пособие: в 2 книгах. Книга 1 – Омск: СибАДИ, 2012. – 216 с.
22. Большая советская энциклопедия: [в 30 т.] / гл. ред. А. М. Прохоров. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.
23. Павловский А. А., Карелов А. И., Щеглов М. А., Нуйкин А. В. Применение беспилотных авиационных систем при проведении топографо-геодезических изысканий на железнодорожном транспорте // Автоматика, связь, информатика. – 2021. – № 3. – С. 21–24. DOI: 10.34649/AT.2021.3.3.003.
24. Мустафин М. Г., Вальков В. А., Павлов Н. С., Виноградов К. П., Боголюбова А. А. Мониторинг водных объектов дистанционными методами // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий (СГУГиТ). – 2023. – Т. 28. – № 2. – С. 67–75. DOI: 10.33764/2411-1759-2023-28-2-67-75.
25. Ткаченко К. С. Использование аэрокосмической съемки в гидробиологических исследованиях // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – № 1. – С. 15–31. EDN: PDBWOJ.
26. Фирсов Ю. Г. Основные требования к обеспечению качества современной батиметрической (топографической) съемки // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2014. – № 3 (25). – С. 171–179. EDN: SFNIAF.
27. Попко А. О. Учет неопределенности съемки дна многолучевым эхолотом при формировании гидроакустических образов рельефа для целей навигационного ориентирования // Национальная Ассоциация Ученых. – 2015. – № 5–2 (10). – С. 76–80. EDN: YFTQHD.
28. Колосков Е. Н., Корнипаев Б. А. Способы сбора данных обратного рассеивания морского дна, реализованные в современных многолучевых эхолотах // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2016. – № 6 (40). – С. 96–105. EDN: XHLRKY.

Информация об авторах:

Розенберг Игорь Наумович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, научный руководитель Российского университета транспорта, Москва, Россия, info@science-rut.ru.

Соколов Сергей Сергеевич – доктор технических наук, доцент, проректор Российского университета транспорта, Москва, Россия, sokolov.ss@mit.ru.

Дубчак Ирина Александровна – начальница управления новых проектов и технологий Российского университета транспорта, Москва, Россия, info@science-rut.ru.

Статья поступила в редакцию 02.11.2023, одобрена после рецензирования 24.12.2023, принята к публикации 29.12.2023.

