

ФОРМИРОВАНИЕ ДОСТОВЕРНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ В ЗАДАЧАХ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ АВТОНОМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФРАСТРУКТУРЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СРЕДЫ¹

Трефилов П. М.², Романова М. А.³
(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

В условиях развития интеллектуальной транспортной среды немаловажную роль играет точное позиционирование автономных робототехнических устройств. Авторами представлен способ ориентации и навигации робототехнических систем с возможным использованием инфраструктуры интеллектуальной транспортной среды. Алгоритм ориентации и навигации роботов в интеллектуальной транспортной среде описывает процесс сбора, обработки, фильтрации, интерполяции и экстраполяции данных для определения местоположения робота и планирования маршрута движения. Предложен способ формирования приоритетного режима работы бортового навигационного комплекса в условиях информационной избыточности навигационных параметров. Способ представляет оптимизационную задачу выбора режима работы бортового навигационного комплекса, который на момент времени имеет наиболее точную оценку при учете внешних условий. Также затрагивается понятие концепции достоверности результатов измерения. Выделены критерии достоверности измерительной информации для обеспечения эффективности принятия решений при управлении измерительными процессами. Описан подход к определению достоверности навигационно-измерительной информации на основе метода теории статистических решений предельных значений результатов измерений. Этот подход позволяет достаточно быстро анализировать, полученную измерительную информацию по статистическим показателям и оценивать степень достоверности результатов.

Ключевые слова: интеллектуальная транспортная система, задачи навигации и ориентации, достоверность, робототехнические системы.

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00338, <https://rscf.ru/project/23-19-00338/>.

² Петр Михайлович Трефилов, научный сотрудник (petertf@ipu.ru).

³ Мария Андреева Романова, научный сотрудник (rmarda@ipu.ru).

1. Введение

Тенденции развития отраслей экономики ориентированы на цифровизацию, изменение степени автономности и повышение интенсивности различных видов потоков, в том числе и транспортных. Развитие и интеллектуализация транспортной среды позволяет повысить эффективность управления трафиком, уровень безопасности и осведомленности о дорожной ситуации и другие аспекты транспортной инфраструктуры [11]. Ключевым компонентом инфраструктуры интеллектуальной транспортной среды (ИТС) является транспортное средство, которое характеризуется степенью автономности. Одной из приоритетных задач ИТС является повышение степени автономности транспортных робототехнических средств. Значительный рост инвестиций и активных исследований в данной сфере свидетельствует о высокой активности в развитии подобных технологий [7].

Например, в работе [14] рассматривается оптимизационная задача систем управления транспортными потоками с интегрированной интеллектуальной транспортной системой, регулирующей параметры транспортной сети и управления движением отдельных транспортных средств.

В статье предложены методы управления сложной интеллектуальной транспортной системой в виде динамической переменной структуры с распределенными параметрами. В работе [30] предложен подход к решению поиска оптимального маршрута с помощью генетических алгоритмов. Предлагаемый авторами метод позволяет находить оптимальные маршруты в условиях ИТС. Однако в предложенных работах рассматривается оптимизационная задача построения траектория пути, а не ориентация и навигация робототехнических систем (РТС).

В статье [17] авторы представили обзор существующих алгоритмов навигации и ориентации роботов в ИТС. Они обсудили различные методы и подходы, включая геопозиционирование, построение карт, планирование маршрута и обмен информацией с инфраструктурой ИТС. Авторы отметили, что эти алгоритмы имеют потенциал для применения в различных сферах, таких как логистика, службы доставки и автономные автомобили.

В другом исследовании [26] была представлена обзорная статья, посвященная алгоритмам и архитектуре сотрудничающих систем транспортного средства-инфраструктура (Vehicle-Infrastructure Systems, VIS). Авторы рассмотрели различные аспекты взаимодействия роботов с интеллектуальной транспортной средой, такие как обмен информацией с дорожной инфраструктурой, взаимодействие с другими участниками дорожного движения и согласование движения. Они представили обзор существующих алгоритмов и подчеркнули важность разработки эффективных методов кооперации между роботами и инфраструктурой ИТС.

В работе [20] для решения задач ориентации и навигации предлагается использовать улучшенный метод k -ближайших соседей, отличающийся от традиционного непрерывного k -ближайшего соседа тем, что динамический объект на протяжении маршрута обращается только к точкам интереса в пространстве перед точкой запроса в соответствии с заданным направлением движения.

В статье [24] предлагается подход для устранения искажения в облаках точек и позволяет повысить эффективности работы системы в реальном времени.

Перечисленные выше работы предлагают новые возможности для повышения эффективности и безопасности роботизированных систем в контексте интеллектуальной транспортной среды. Таким образом, направление исследований, связанное с алгоритмами ориентации и навигации роботов, требует поиска новых решений с активно развивающейся инфраструктурой ИТС.

Существует еще одна область исследований и разработок, направленная на способы получения навигационной информации. Соответственно рассматриваются и обзорные исследования задач локализации и навигации автономных транспортных средств в ИТС, например, в работах [12, 20] авторы рассматривают методы сенсорного объединения, применение БПЛА, сопоставление карт и алгоритмы планирования маршрутов и управления движением.

Автономные робототехнические устройства в ИТС используют несколько способов получения навигационной информации, такие как:

- навигационная спутниковая система (использование систем, таких как GPS, ГЛОНАСС, Галилео) [28];
- картирование и локальные базы данных (использование картографических данных и локальных баз данных, которые включают в себя информацию о дорогах, знаках, светофорах и других объектах в городе) [13];
- датчики и оборудование на борту (использование различных датчиков, так как лидары, радары и камеры, которые помогают собирать информацию об окружающей среде и других участниках движения на дороге) [24, 27];
- связь с инфраструктурой (взаимодействие с инфраструктурой ИТС, такой как сети связи, сенсоры на дорогах и сигнализация для получения актуальной информации о дорожной обстановке) [13, 21];
- системы искусственного интеллекта (использование алгоритмов искусственного интеллекта для анализа данных, собранных от различных источников, и принятия решений на основе этой информации) [4, 15].

Задача в области ориентации и навигации робототехнических устройств в ИТС заключается в определении точного местоположения РТС в пространстве. Определение местоположения необходимо и относительно других участников движения в реальном времени. Ориентация и навигация беспилотных транспортных средств или других роботизированных устройств имеет решающее значение для успешного выполнения функциональных задач в условиях «Умной транспортной среды». Для достижения высокой точности позиционирования роботов в ИТС применяются различные алгоритмы, которые интегрируются в соответствующие аппаратные устройства.

2. Способы ориентации и навигации в ИТС

Для решения задач ориентации и навигации РТС в пространстве необходимо наличие бортового навигационного комплекса, оснащенного системами счисления пути. Самостоятельность

каждого из объектов системы ИТС позволит повысить надежность системы в целом, исключит возможность массовых сбоев.

Одной из основных технологий, широко используемой для решения задач ориентации и навигации РТС или мобильных объектов, является глобальная система позиционирования или спутниковая навигационная система (СНС). СНС основана на сети спутников, которые передают сигналы с информацией о своих точных координатах и времени. Приемники СНС на РТС используют эти сигналы для расчета своего местоположения на основе трехмерной триангуляции. СНС обеспечивает высокую точность позиционирования, однако в городской среде могут возникать проблемы из-за перекрытия сигнала высокими зданиями или отражения сигнала, что может приводить к снижению точности или полного выхода из строя систем позиционирования реального времени.

Для устранения недостатков СНС и повышения точности позиционирования в алгоритмах ориентации и навигации роботов широко применяются инерциальные навигационные системы (ИНС). ИНС состоит из акселерометров и гироскопов, которые измеряют ускорение и угловые скорости робота соответственно. С помощью интеграции этих измерений на основе математических моделей движения робота можно определить его текущее местоположение и ориентацию. Однако в долгосрочной перспективе измерения ИНС подвержены ошибкам, которые могут накапливаться со временем, в результате чего возникает проблема с точностью позиционирования.

Радиоидентификация – еще одна технология, используемая в алгоритмах ориентации и навигации РТС. Она основана на обмене радиосигналами между роботом и установленными на дороге радиомаяками. Радиомаяки передают свои уникальные идентификаторы, и робот может использовать эту информацию для определения своего местоположения. Радиоидентификация позволяет достичь высокой точности позиционирования, особенно в условиях, когда сигнал СНС ограничен или нестабилен, однако требует инфраструктуры и дополнительных устройств на дороге.

Активно развивается научный прогресс в области технического зрения с внедрением алгоритмов позиционирования. С помощью камер и алгоритмов технического зрения РТС могут анализировать окружающую среду, распознавать дорожные знаки, ориентироваться по маркировке дороги и определять свое местоположение на основе этих данных. Техническое зрение позволяет роботам уточнять свою позицию и ориентацию в реальном времени, что способствует повышению точности навигации.

Еще одна важная область исследования связана с использованием машинного обучения для улучшения алгоритмов навигации и ориентации роботов в ИТС. В статье [23] авторы представили обзор существующих исследований, где методы машинного обучения были применены к задачам ИТС. Они обсудили применение нейронных сетей, генетических алгоритмов и других методов машинного обучения для улучшения ориентации, планирования маршрута и прогнозирования трафика. Авторы подчеркнули, что машинное обучение является мощным инструментом, который может значительно улучшить производительность и эффективность роботизированных систем в ИТС.

Авторами в работе [16] проведено исследование и анализ использования робототехнических сетей датчиков в интеллектуальных транспортных системах. Они обсуждают различные типы датчиков, такие как видеокамеры, радары и лидары, и исследуют их применение в задачах обнаружения препятствий, распознавания дорожных знаков и анализа трафика.

Однако в ИТС возможно не только бортовое позиционирование, но и внешнее. Например, в работах [19, 22] рассматривается возможность позиционирования транспортных средств с помощью дорожных камер.

Интеграция различных технологий в алгоритмах ориентации и навигации роботов позволяет достичь высокой точности определения местоположения и эффективно следовать заданному маршруту в городской среде. Рассмотренные технологии обладают своими преимуществами и ограничениями, поэтому объединение измерительной информации имеет решающую роль в задачах ориентации и навигации.

3. Подход к решению задач ориентации и навигации РТС в ИТС

Один из ключевых аспектов ИТС заключается в эффективной интеграции алгоритма навигации с интеллектуальной инфраструктурой. Для этого робототехническое устройство должно быть способным получать данные и обмениваться информацией с другими участниками дорожного движения и сетью интеллектуальной транспортной системы. Это может включать обмен данными с дорожными знаками, светофорами, радиомаяками или другими автомобилями в режиме реального времени.

Интеллектуальная транспортная среда может быть динамичной и изменчивой, что влияет на движение РТС. Различные факторы, такие как плотность движения, пробки, возникновение новых препятствий или изменение траектории других транспортных средств, могут повлиять на оптимальный план движения робота. Поэтому алгоритм навигации должен быть способен адаптироваться к динамическим изменениям среды, чтобы эффективно планировать новый маршрут или корректировать текущий.

Абоненты в ИТС часто оснащены не только бортовой системой счисления пути, но и различными сенсорами, такими как лидары, радары, камеры и инфракрасные датчики. Данные с этих сенсоров используются для восприятия окружающей среды, обнаружения препятствий, определения местоположения других транспортных средств и дорожной инфраструктуры. Алгоритм навигации должен быть способен обрабатывать и объединять данные с различных сенсоров для получения более полной и точной картины окружающей среды.

Одной из основных целей алгоритма навигации в ИТС является обеспечение безопасного движения робота и предотвращение аварий. При планировании маршрута и принятии решений, алгоритм должен учитывать правила дорожного движения, предупреждать об опасных ситуациях и принимать преосторожные меры для минимизации рисков. В городской среде роботы могут сталкиваться с множеством плоскостей и уровней, таких как дороги, подземные переходы, мосты и туннели. Алгоритм навига-

ции должен быть способен планировать маршруты с учетом многоплановости и оптимально перемещаться по различным уровням окружающей среды.

3.1. МОДЕЛЬ ОШИБОК ИТС В ЗАДАЧЕ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ

В рамках решения задачи в общем виде необходимо учитывать, что алгоритм ориентации и навигации должен быть способен масштабироваться для работы с различными типами роботов и в разных городских средах. Он должен быть гибким и легко настраиваемым для адаптации к разнообразным сценариям и условиям.

Для интеграции ИТС в алгоритмы ориентации и навигации транспортных средств рассмотрим классическое решение задачи ориентации и навигации. Так, каждый абонент ИТС оборудован бортовым навигационным комплексом (БНК). БНК состоит из системы счисления пути, основанной на инерциальных измерительных системах, в подавляющем большинстве работающих по принципам бесплатформенных инерциальных навигационных систем, и систем коррекции, допустим, на спутниковой навигационной системе. Для решения задач локальной ориентации и реализации системы предотвращения столкновений БНК может быть оборудован другими измерительными устройствами, такими, как лидар, радар и др. В дальнейшем системы коррекции будут представлены в общем виде, так как описать математические модели всех систем коррекции не предоставляется возможным. Все эти измерительные комплексы формируют обратную связь с ИНС для выработки управляющего сигнала.

Для решения задач ориентации и навигации необходимо представить модель ошибок инерциальной системы счисления. Смещение нуля в показаниях инерциальных датчиков является основной причиной, вызывающей погрешность ИНС. В показаниях датчиков угловой скорости (ДУС) и акселерометров присутствуют составляющие, обусловленные смещением нулевых сигналов датчиков [3] Пусть

$$(1) \Delta X = \frac{1}{2} b_a t^2,$$

$$(2) \Delta \varphi = b_\omega t;$$

где b_a, b_ω – смещение нуля акселерометра и ДУС по соответствующей оси; t – время работы ИНС; ΔX – погрешность в определении линейного движения носителя ИНС; $\Delta\varphi$ – погрешность в определении углового движения носителя ИНС.

В измерениях ИНС присутствуют ошибки масштабных коэффициентов, которые имеют такой же характер, как и ошибка, вызванная смещением нуля, и представлены в виде

$$(3) \Delta X = \frac{1}{2} S_a a t^2,$$

$$(4) \Delta\varphi = S_\omega \omega t.$$

где S_a, S_ω – масштабный коэффициент акселерометра и ДУС; t – время работы ИНС; a – значение ускорения носителя ИНС по соответствующей оси; ω – значение угловой скорости носителя ИНС по соответствующей оси; ΔX – погрешность в определении линейного движения носителя ИНС; $\Delta\varphi$ – погрешность в определении углового движения носителя ИНС.

В измерениях присутствуют погрешности измерений ускорений и угловых скоростей, которые можно представить в виде:

$$(5) A_{\text{измеренное}} = A_{\text{ист}} + A_{\text{смещение0}} + V_{\text{аксел.}} w_{\text{аксел.}}$$

где $A_{\text{измеренное}}$ – вектор измеренных проекций ускорения в связанной системе координат (3×1); $A_{\text{истинное}}$ – вектор истинных проекций ускорения в связанной системе координат (3×1); $A_{\text{смещение0}}$ – вектор смещения нулевого сигнала в показаниях акселерометров в связанной системе координат (3×1); $w_{\text{аксел.}}$ – вектор формирующих белых шумов (3×1) с нулевым математическим ожиданием и единичной матрицей интенсивности;

$w_{\text{аксел.}} = (w_{\delta a_x} w_{\delta a_y} w_{\delta a_z})^T$; $V_{\text{аксел.}}$ – матрица коэффициентов шумов (3×1); $V_{\text{аксел.}} = \begin{pmatrix} \sigma_{\delta a_x} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\delta a_y} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\delta a_z} \end{pmatrix}$; $\sigma_{\delta a_x}, \sigma_{\delta a_y}, \sigma_{\delta a_z}$ –

СКО шумовых ошибок акселерометров, м/сек².

В матричной форме модель ошибок ИНС запишется как [2]

$$(6) \frac{d\delta X_{\text{ИНС}}}{dt} = F_{\text{ИНС}} \delta X_{\text{ИНС}} + G V_{\text{ИНС}} w_{\text{ИНС}},$$

где $\delta X_{\text{ИНС}}$ – вектор состояния модели ошибок ИНС (15×1);

$$\delta X_{\text{ИНС}} = \begin{pmatrix} \delta North & \delta Height & \delta East \\ \delta V_{North} & \delta V_{Height} & \delta V_{East} \\ \delta Roll & \delta Yaw & \delta Pitch \\ \delta Acc_{0X} & \delta Acc_{0Y} & \delta Acc_{0Z} \\ \delta Gyro_{0X} & \delta Gyro_{0Y} & \delta Gyro_{0Z} \end{pmatrix}^T; \delta North – \text{ошибка опре-}$$

деления северной координаты местоположения, м; $\delta Height$ – ошибка определения высоты местоположения м; $\delta East$ – ошибка определения восточной координаты местоположения, м; δV_{North} – ошибка определения северной проекции скорости, м/сек; δV_{Height} – ошибка определения вертикальной проекции скорости, м/сек; δV_{East} – ошибка определения восточной проекции скорости, м/сек; $\delta Roll$ – ошибка определения угла крена, рад; δYaw – ошибка определения угла курса, рад; $\delta Pitch$ – ошибка определения угла тангажа, рад; δAcc_{0X} – смещение нулевого сигнала акселерометра по оси OX связанной системы координат, м/сек²; δAcc_{0Y} – смещение нулевого сигнала акселерометра по оси OY связанной системы координат, м/сек²; δAcc_{0Z} – смещение нулевого сигнала акселерометра по оси OZ связанной системы координат, м/сек²; $\delta Gyro_{0X}$ – смещение нулевого сигнала ДУС по оси OX связанной системы координат, рад/сек; $\delta Gyro_{0Y}$ – смещение нулевого сигнала ДУС по оси OY связанной системы координат, рад/сек; $\delta Gyro_{0Z}$ – смещение нулевого сигнала ДУС по оси OZ связанной системы координат, рад/сек. $F_{\text{ИНС}}$ – переходная матрица системы (15×15);

$$F_{\text{ИНС}} = \begin{pmatrix} 0_{3 \times 3} & F_{\text{ИНС}1} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & F_{\text{ИНС}2} & 0_{3 \times 3} & F_{\text{ИНС}3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & F_{\text{ИНС}4} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{pmatrix};$$

$$F_{\text{ИНС}1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$$F_{\text{ИНС}2} = \begin{pmatrix} -\frac{\delta V_{\text{Height}}}{R_1} & -\frac{\delta V_{\text{North}}}{R_1} & -\frac{\delta V_{\text{East}} \operatorname{tg}(\varphi)}{R_2} - 2u \sin(\varphi) \\ -\frac{\delta V_{\text{North}} \operatorname{tg}(\varphi)}{R_2} & 0 & \frac{\delta V_{\text{East}}}{R_2} - 2u \cos(\varphi) \\ \frac{\delta V_{\text{East}} \operatorname{tg}(\varphi)}{R_2} + 2u \sin(\varphi) & 2u \cos(\varphi) & \frac{\delta V_{\text{North}}}{R_2} - \frac{\delta V_{\text{Height}}}{R_1} \end{pmatrix};$$

$$F_{\text{ИНС}3} = C;$$

$$F_{\text{ИНС}4} = C;$$

C – матрица перехода от связанной системы координат к географическому сопровождающему трехграннику; R_1 – радиус кривизны меридионального сечения земного эллипсоида:

$$(7) R_1 = a(1 - e^2)(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-3/2},$$

R_2 – радиус кривизны экваториального сечения земного эллипсоида:

$$(8) R_2 = a(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-1/2},$$

где a – большая полуось земного эллипсоида (радиус земного экватора), $a = 6378245$ м; b – малая полуось земного эллипсоида, $b = 6356863$ м; e^2 – квадрат эксцентриситета земного эллипсоида, $e^2 = 0,0066934216$; φ – широта местоположения, рад; u – угловая скорость вращения Земли, u – скорость вращения земли, $u = 7.2922115 \cdot 10^{-5}$ рад/сек; dt – время дискретизации работы ИНС, сек; $w_{\text{ИНС}}$ – вектор формирующих белых шумов (6×1) с нулевым математическим ожиданием и единичной матрицей интенсивности:

$$w_{\text{ИНС}} = (w_{\delta a_x} w_{\delta a_y} w_{\delta a_z} w_{\delta \omega_x} w_{\delta \omega_y} w_{\delta \omega_z})^T;$$

$V_{\text{ИНС}}$ – матрица коэффициентов шумов (6×6);

$$V_{\text{ИНС}} = \begin{pmatrix} V_{\text{ИНС}1} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & V_{\text{ИНС}2} \end{pmatrix};$$

$$V_{\text{ИНС}1} = \begin{pmatrix} \sigma_{\delta a_x} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\delta a_y} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\delta a_z} \end{pmatrix};$$

$$V_{\text{ИНС}2} = \begin{pmatrix} \sigma_{\delta \omega_x} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\delta \omega_y} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\delta \omega_z} \end{pmatrix};$$

G – матрица шумов системы (15×6):

$$G = \begin{pmatrix} 0_{3 \times 3} & 0_{6 \times 3} \\ C & C \\ 0_{9 \times 3} & 0_{6 \times 3} \end{pmatrix}.$$

3.2. СПОСОБ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

Одним из методов оценки неопределенности входных параметров в системе интегрального контроля навигационного комплекса является использование перестраиваемого алгоритма комплексной обработки информации, получаемой от (ИНС) и систем коррекции, алгоритмы обработки которых основаны на фильтре Калмана (ФК) [6]. ФК реализован в слабосвязанной схеме комплексирования. В данном контексте рассматривается только линейный компонент модели погрешностей подсистем и сенсоров. В этом случае уравнения динамики системы и уравнения измерений во временной области могут быть представлены в виде соответствующих математических выражений:

$$(9) \quad \begin{cases} \dot{\bar{X}}(t) = F(t) \cdot \bar{X}(t) + B(t) \cdot \bar{U}(t) + G(t) \cdot \bar{W}(t), \\ \bar{Z}(t) = H(t) \cdot \bar{X}(t) + \bar{V}(t); \end{cases}$$

где $\bar{X}(t)$ – вектор состояния, определяемый принятой моделью ошибок системы; $F(t)$ – матрица, описывающая динамические свойства системы; $B(t)$ – матрица управления; $\bar{U}(t)$ – вектор управляющих сигналов; $G(t)$ – матрица, описывающая шумы системы; $\bar{W}(t)$ – вектор шумов системы; $\bar{Z}(t)$ – вектор измерений; $H(t)$ – матрица связи вектора состояния и вектора измерений; $\bar{V}(t)$ – вектор шумов измерений.

При этом на статистические характеристики шумов системы, шумов измерений и начальное значение вектора состояния накладываются следующие ограничения:

1. $\bar{W}(t), \bar{V}(t)$ – случайный процесс, распределенный по Гауссу и имеющий характеристики белого шума, не имеет смещения и имеет известные ковариационные матрицы.

2. Шумы системы, измерения и начальное состояние вектора состояния независимы друг от друга:

$$M[\bar{V}(t), \bar{W}(t)^T] = 0; M[\bar{X}(t_0), \bar{W}(t)^T] = 0; M[\bar{X}(t_0), \bar{V}(t)^T] = 0.$$

Вводится начальное значение $M[\bar{X}(t_0)] = \bar{m}_X$ и $M[(\bar{X}(t_0) - \bar{m}_X), (\bar{X}(t_0) - \bar{m}_X)^T] = P_0$.

При условии выполнения наложенных ограничений ФК строит оптимальную оценку вектора состояния на основе минимизации квадратичного критерия:

$$J = M \left[\left(\bar{X}(t) - \hat{X}(t) \right), \left(\bar{X}(t) - \hat{X}(t) \right)^T \right] = \\ = M \left[Tr \left\{ \left(\bar{e}(t) \right), \left(\bar{e}(t) \right)^T \right\} \right] = Tr(P(t)) = \sum_{i=1}^n \sigma_{i,i}^2,$$

где $n = \dim(\bar{X})$, $\sigma_{i,i}$ – СКО соответствующего элемента вектора ошибок оценок $\bar{e}(t)$.

Алгоритм оценки навигационных параметров формирует в оптимальном режиме несмещенную оценку:

$$M[\bar{X}(t)] = M[\hat{X}(t)] \text{ или } M[\bar{e}(t)] = 0$$

При переходе к дискретному виду линейный алгоритм оценки навигационных параметров представляется в виде

$$(10) \left\{ \begin{array}{l} \hat{X}_k = \Phi_{k/k-1} \hat{X}_{k-1} + B_{\frac{k}{k-1}} \bar{U}_{k-1} + K_k \left(\bar{Z}_k - H_k \Phi_{\frac{k}{k-1}} \hat{X}_{k-1} \right) \\ K_k = S_k H_k^T (H_k S_k H_k^T + R_{k-1})^{-1} \\ S_k = \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \Gamma_{k/k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k/k-1}^T \\ P_k = (E - K_k H_k) S_k \end{array} \right. ,$$

где \hat{X}_k – оценка вектора состояния системы на шаге k , размер $[n \times 1]$; \hat{X}_{k-1} – оценка вектора состояния на шаге $k - 1$; $\hat{X}_{k|k-1}$ – прогноз вектора состояния системы на шаге k по оценке состояния с учетом предыдущего шага $k - 1$; P_k – скорректированное значение апостериорной ковариационной матрицы на шаге k , размер $[n \times n]$; P_{k-1} – скорректированное значение апостериорной ковариационной матрицы на шаге $k - 1$; $P_{k|k-1}$ – прогнозное значение апостериорной ковариационной матрицы; $\Phi_{k,k-1}$ – матрица динамика системы, размер $[n \times n]$; G_{k-1} – матрица шумов системы, размер $[n \times l]$; Q_{k-1} – ковариационная матрица шумов системы, размер $[l \times l]$; K_k – матрица коэффициентов усиления Калмана, размер $[n \times r]$; H_k – матрица измерений, размер $[r \times n]$; R_k – ковариационная матрица измерений, размер $[r \times r]$; Y_k – вектор измерений, размер $[r \times 1]$; I – единичная матрица, размер $[n \times n]$; k – текущая итерация работы фильтра Калмана. Фильтр Калмана является одним из наиболее распространенных

методов оценки состояния динамической системы. Он используется для оценки состояния системы по имеющимся измерениям с учетом ошибок измерения и шума в системе. Фильтр Калмана работает в дискретном режиме, то есть данные собираются и обрабатываются через определенные интервалы времени.

При использовании фильтра Калмана для оценки параметров БНК необходимо учитывать, что функция оценки, функция прогноза и функция управления могут быть выполнены с разной частотой. Это связано с тем, что процесс оценки параметров может быть медленным и требовать более частого обновления, в то время как управление параметрами может требовать меньше обновлений.

Кроме того, при формировании дискретного оценивания фильтра Калмана следует учитывать наличие или отсутствие обратной связи по элементам оценки вектора состояния \hat{X}_{k-1} . Если обратная связь есть, то это может повлиять на матрицу управления $B^{EXTR}_{k/k-1}$, $B^{EST}_{k/k-1}$, $B^{CONTR}_{k/k-1}$ и вектор управления \bar{U}^{EXTR}_{k-1} , \bar{U}^{EST}_{k-1} , \bar{U}^{CONTR}_{k-1} , которые определяют, как данные используются для обновления оценки состояния.

В целом при использовании фильтра Калмана для оценки параметров БНК важно учитывать частоту обновления данных, наличие обратной связи и текущий режим работы фильтра. Это позволит повысить точность оценок и улучшить управление параметрами БНК.

3.3. ФОРМИРОВАНИЕ ПРИОРИТЕНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ АЛГОРИТМА ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ В РТС

Наличие информационной избыточности в БНК формирует различные режимы работы для проведения оценки текущего вектора состояния навигационной системы. Однако выбор режима работы бортового навигационного комплекса необходимо проводить в зависимости от внешних условий, что позволит системе более эффективно использовать доступные измерения и уменьшить влияние шумов и погрешностей от менее точных или нестабильных измерителей в конкретный момент времени при конкретных параметрах окружающей среды. Это в том числе позво-

лит системе ориентации и навигации адаптироваться к изменяющимся условиям и ограничениям, выбирая наиболее подходящие измерители и методы обработки информации в каждый конкретный момент времени.

Применение разных режимов работы с учетом разных измерителей и их характеристик является активно исследуемой областью в навигационных системах и автономном вождении. Так, в качестве корректирующих устройств могут выступать системы видеонаблюдения, радиомаяки и другие устройства, позволяющие осуществлять внедрение ТС в интеллектуальную транспортную среду.

Для решения задачи в общем виде представим множество возможных режимов работы бортового навигационного комплекса в виде $M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$, где каждый режим m_j соответствует определенной комбинации измерителей и/или параметров фильтра Калмана. Для выбора m_j в БНК имеется внешняя информация или измерения, которые позволяют определить, какой режим является наиболее подходящим в данной ситуации. Обозначим это как r , где r принимает значения из множества M , указывая выбранный режим работы.

Таким образом, необходимо выбрать режим работы, учитывая внешние условия и текущую цель движения системы. Это можно представить в виде задачи оптимизации с целью минимизации ошибок или максимизации точности оценок состояния:

$$(11) r_{opt} = \operatorname{argmin} J(r) = \operatorname{argmax} J(r),$$

где r_{opt} – оптимальный выбранный режим работы; $J(r)$ – целевая функция, которая оценивает качественные показатели вектора состояния для каждого режима работы.

Целевая функция $J(r)$ может быть определена на основе различных критериев, таких как среднеквадратичная ошибка оценки, степень доверия, или любые другие показатели, отражающие требования и внешние условия конкретной навигационной системы. Это может быть сформулировано как задача оптимизации для минимизации ошибок оценки состояния или максимизации точности оценок состояния.

В оптимизационной задаче также могут учитываться динамика переключения между режимами работы БНК и возможные изменения внешних возмущений.

Апостериорная оценка состояния примет вид

$$(12) x_{hat} = E(x|z, r),$$

где x_{hat} – апостериорная оценка состояния системы, учитывающая выбранный режим работы БНК и наблюдения (измерительная информация, полученная от внутренних и внешних датчиков и систем).

Сформулированная математическая постановка задачи позволяет рассматривать алгоритм навигации роботов в контексте интеллектуальной транспортной среды с учетом особенностей среды и обеспечивать высокую точность геопозиционирования и безопасную навигацию.

4. Подход к определению достоверности навигационной информации на основе теории статистических решений

4.1. ПОНЯТИЕ ДОСТОВЕРНОЙ НАВИГАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В метрологических регламентирующих документах часто встречается понятие «достоверность измерений», хотя понятие данного термина не приведено в нормативно-технических документах. Согласно Федеральному закону №102 «Об обеспечении единства измерений» [18], акцентируется достоверность измерений, чтобы защитить интересы граждан, общества и государства. Также подчеркивается, что обеспечение достоверности измерений требует соблюдения определенных стандартов, методик, и проверки средств измерений.

Для признания результатов измерений достоверными необходимы объективные данные, которые подтверждают корректность этих результатов [25]. Обеспечение достоверности измерений является ключевой задачей в метрологии, и для ее достижения необходимо тщательно придерживаться методологии и стандартов. Согласно этим выводам, достоверность измерений может иметь разные критерии, которые требуется определять и оцени-

вать через соответствующие методики. Так, в работе [25] авторами исследовано определение достоверности интеллектуальной навигационной системе и создана технология поиска метрического индекса достоверности. Для общего случая можно выделить следующие критерии достоверности результатов измерений [9]:

- доверительная вероятность,
- уровень значимости,
- доверительные коэффициенты.

Для определения навигационных параметров применяют разнообразные технические датчики и средства, которые характеризуются определенной точностью и вероятностными характеристиками своей работы. Качество функционирования любой системы измерения, контроля или управления зависит от достоверности данных, поступающих от измерительных систем на ее вход [9]. Таким образом, для эффективной работы системы управления и контроля важно обеспечить высокую достоверность входных данных, источником которых являются датчики измерения и управления.

Датчики часто предоставляют недостоверные данные, что требует применения дополнительных технических мер, увеличивающих сложность и стоимость системы. Однако даже такие меры не гарантируют высокую достоверность данных, ведь каждый датчик может иметь ограниченную точность и вероятностные характеристики, включая вероятность правильного обнаружения, вероятность ложного срабатывания и вероятность необнаружения. Повышение точности оценки этих вероятностей обеспечивается большим объемом статистических данных. При этом увеличения достоверности входных данных можно успешно достичь, применяя методы, основанные на теории статистических решений [5].

4.2. ОПИСАНИЕ ПОДХОДА ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ

В данной работе для определения достоверности навигационной информации предлагается наиболее простой и распространённый подход, основанный на статистическом методе предель-

ных значений установок. Согласно теории вероятности и статистики, результат измерения попадает в определенный интервал с вероятностью определяемой формулой [8, 10]

$$(13) P(\alpha \leq X \leq \beta) = F(\beta) - F(\alpha),$$

где α и β – нижняя и верхняя границы допустимых значений параметров измерительной системы при критических режимах работы.

Измеренная величина X варьируется вследствие статистического разброса относительно своего математического ожидания. Для многих процессов и измеренных величин эту вариабельность можно описать с использованием нормального распределения.

Обозначим условия для поиска границ достоверных значений величин навигационной информации

1) пусть значение погрешности результата измерения X находится в пределах $\mathcal{E}_i \leq \varepsilon_i^{max}$, $i = 1, \dots, m$, где ε_i^{max} – некоторое ограниченное положительное число, зависящее от точности измерительного устройства;

2) если $|\varepsilon'_i| < |\varepsilon''_i|$ случайной величины \mathcal{E}_i , тогда справедливо неравенство $p_i(|\varepsilon'_i|) > p_i(|\varepsilon''_i|)$, где $p_i(|\varepsilon_i|)$ – плотность распределения вероятности случайной величины \mathcal{E}_i , $i = 1, \dots, m$;

3) $M\{\varepsilon_i\} = \int_{-\varepsilon_i^{max}}^{\varepsilon_i^{max}} \varepsilon_i p_i(\varepsilon_i) d\varepsilon_i = 0$, где $M\{\varepsilon_i\}$ – математическое ожидание;

4) распределение погрешности $\int_{-\varepsilon_i^{max}}^{\varepsilon_i^{max}} p_i(\varepsilon_i) d\varepsilon_i = 1, 0$;

5) оценка величины X неизвестного значения χ (истинного значения): $x_m = \operatorname{argmin}\{D\{x_m\}\} = \operatorname{argmin}\{M\{(x_m - \chi)^2\}\}$. Данное условие свидетельствует о том, что измеренные значения наиболее тесно группируются около значения χ .

Вернемся к решению выражения (13) для нормального закона распределения при указанных выше условиях.

$$(14) P(\alpha \leq X \leq \beta) = F(\beta) - F(\alpha) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left\{ \int_{-\infty}^{\alpha/S_x} e^{-\frac{x^2}{2}} dx - \int_{-\infty}^{\alpha/S_x} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right\};$$

Продифференцируем и приравняем к нулю выражение (14):

$$\frac{d}{dS_x} [P(\alpha \leq X \leq \beta)] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left\{ e^{-\frac{\beta^2}{2S_x^2}} \left(-\frac{\beta}{S_x^2} \right) - e^{-\frac{\alpha^2}{2S_x^2}} \left(-\frac{\alpha}{S_x^2} \right) \right\} = 0$$

Отсюда получаем границы, в которые попадает величина X :

$$\beta e^{-\frac{\beta^2}{2S_x^2}} = \alpha e^{-\frac{\alpha^2}{2S_x^2}}$$

Однако для дальнейших расчетов стоит определить доверительную вероятность для контроля диапазона достоверных результатов измерений величин навигационной информации.

При оценке параметров вероятностных распределений или характеристик величин в информационно-измерительной системе можно основываться на теории квантильных оценок. Данная теория может помочь в более устойчивой и точной оценке величин при различных режимах эксплуатации (событиях) информационно-измерительной системе. Самый распространенный способ выбора квантиля – это «правило трёх сигм». Данный способ устанавливает, что достоверные измерения находятся в пределах диапазона $\pm 3\sigma$ с вероятностью 0,997.

Суть подхода в определении достоверности величин навигационной информации заключается в нахождении границ интервала (α, β) с учетом выбора квантиля распределения на основе априорных данных. Это позволяет задать значение среднеквадратичное отклонение с определенной доверительной вероятностью и затем определить границы доверительного интервала. Стоит отметить при таком простом подходе цена принятия ошибочных решений (цена пропуска грубой погрешности) не превышает 50%. Решением данной проблемы может быть контроль по критерию минимакса [1]

5. Заключение

Подход к решению задачи ориентации и навигации с использованием инфраструктуры ИТС демонстрируют потенциал и перспективы применения в сфере автономных робототехнических устройств. Обеспечение повышения показателей основных характеристик навигационной информации является критически важным аспектом для успешного функционирования систем

в разнообразных средах и ситуациях. Объединение высокотехнологических аспектов автономных систем с передовыми элементами транспортной инфраструктуры обеспечивает важный симбиоз, расширяющий границы эффективности и применимости в реальных условиях. Подход к формированию приоритетного режима работы БНК в условиях информационной избыточности, основанный на интеграции с инфраструктурой интеллектуальной транспортной среды, может стать прочным фундаментом для множества практических приложений, включая автономное вождение, беспилотные миссии летательных аппаратов и др. В контексте данной работы также представлен простой и оперативный подход к определению достоверности навигационной информации за счет установок предельных значений. На основе априорных данных величин навигационной информации при выборе квантильных оценок позволяет определить интервальные границы допустимых значений результатов измерений. Данный подход может быть улучшен путем внедрения критерия минимизации и максимизации.

Полученные результаты исследования могут служить основой для дальнейших научных и инженерных исследований в области автономных робототехнических систем, способствуя развитию передовых технологий в данной сфере и углублению понимания принципов функционирования подобных устройств. Настоящая работа отражает прогрессивные тенденции в области разработки и внедрения систем автономной навигации и ориентации в области интеллектуальной транспортной среды, что представляет собой значимый вклад в развитие современных технических средств и технологий и открывает перспективы для широкого спектра приложений, включая автономное вождение, беспилотные миссии, роботизированные производственные процессы и другие сферы применения автономных робототехнических устройств.

В дальнейшем авторами планируется тестирование разработанных методов на различных автономных робототехнических платформах для подтверждения их универсальности и способности быть примененными в различных контекстах и сценариях.

Литература

1. АНИЩЕНКО В.А., ПИСАРУК Т.В. *Эффективность контроля достоверности измерений в автоматизированных системах управления энергосистемами по предельным значениям* // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2017. – Т. 60, №5. – С. 407–416. – DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-407-416
2. ВАСИЛЮК Н.Н. *Слабое комплексирование инерциальных и спутниковых измерений с помощью расширенного фильтра Калмана с кватернионным представлением ориентации* // Проблемы управления. – 2019. – №4. – С. 72–84.
3. ВОДИЧЕВА Л.В., ПАРЫШЕВА Ю.В. *Оценка точностных параметров датчиков бесплатформенного инерциального измерительного блока с помощью относительно грубого поворотного стола* // Гирокопия и навигация. – 2019. – Т. 27, № 2(105).
4. ВОРОХОБИН И.И. *Проверка статистических гипотез распределения погрешностей измерения навигационных параметров* // Eastern European Scientific Journal. –2019. – №4-3. – С. 44
5. ДАНИЛЕВИЧ С.Б., ТРЕТЬЯК В.В. *Оценка достоверности контроля приборов, поверяемых в нескольких точках диапазона* // Системы анализа и обработки данных. – 2020. – №1(78).
6. ИБРАЕВ А. *Система навигации транспортного средства на основе интегрированной ИНС/СНС/Одометрии* // Технические науки – от теории к практике. –2017. – №5. – С. 31–43.
7. ПОЛЯКОВА Т.А., ХИМЧЕНКО А.И. *Формирование системы беспилотного транспорта: проблемы реализации государственной политики обеспечения информационной безопасности и правового регулирования* // Транспортное право и безопасность. – 2020. – №2(34). – С. 118–126.
8. СУРКОВ В.О. *Повышение достоверности навигационных измерений в навигационных системах подвижных наземных объектов* // Молодой ученый. – 2016. – №14(118). – С. 168–170.

9. ХРАПОВ Ф.И., Власов П.В. *Повышение достоверности результатов измерений в распределенных многоканальных информационноизмерительных системах* // Вестник метролога. – 2017. – №4. – С. 9–15.
10. ШОЛОХОВ А.В. *Метод оценки достоверности информации при периодической коррекции наземных навигационных систем* // Информационно-управляющие системы. – 2006. – №6. – С. 7–13.
11. AHANGAR M.N., AHMED Q.Z., KHAN F.A., HAFEEZ M. *A Survey of Autonomous Vehicles: Enabling Communication Technologies and Challenges* // Sensors. – 2021. – Vol. 21(3):706. – DOI: <https://doi.org/10.3390/s21030706>.
12. ALATISE M.B., HANCKE G.P. *A Review on Challenges of Autonomous Mobile Robot and Sensor Fusion Methods* // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8, – P. 39830–39846. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2975643.
13. AYYALASOMAYAJULA R., ARUN A., WU C., SHARMA S. et al. *Deep learning based wireless localization for indoor navigation.* // Proc. of the 26th Annual Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom '20). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, – 2020. – Article 17 – P. 1–14. – DOI: <https://doi.org/10.1145/3372224.3380894>.
14. BRODSKY S., PANFEROV A., NEBYLOV A., CHIKRIN D. *Integrated Navigation and Distributed Control Intelligent Transport System* // 27th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS–2020). – 2020. – P. 1–4.
15. GENTNER C., ULMSCHNEIDER M., KUEHNER I., DAMMANN A. *WiFi-RTT Indoor Positioning. 2020 IEEE ION Position* // Location and Navigation Symposium (PLANS). –2020. – P. 1029–1033
16. GUERRERO J., ZEADALLY S., CASTILLO J. *Sensor Technologies for Intelligent Transportation Systems* // Sensors. – 2018. – Vol. 18(4). – P. 1–22.
17. GUPTA A., SINGH B. *Recent trends in intelligent transportation systems: a review* // Journal of Transport Literature. –2015. – Vol. 9(2). – P. 30–34.
18. <http://www.kremlin.ru/acts/bank/27684/>.

19. JHARKO E., MAMCHENKO M., KHRIPUNOV S.P. *Robot/UAV Indoor Visual SLAM in Smart Cities Based on Remote Data Processing* // Int. Russian Smart Industry Conf. (SmartIndustryCon–2023). – 2023. – P. 504–508. – DOI: 10.1109/SmartIndustryCon57312.2023.10110777.
20. MENOVAR H., GUVENC I., AKKAYA K., ULUAGAC A.S. et al. *UAV-Enabled Intelligent Transportation Systems for the Smart City: Applications and Challenges* // IEEE Communications Magazine. –2017. – Vol. 55. – P. 22–28. – DOI: 10.1109/mcom.2017.1600238cm.
21. MIAO J., ZHANG P. *UAV Visual Navigation System based on Digital Twin* // 18th Int. Conf. on Mobility, Sensing and Networking (MSN–2022). –2022. – P. 865–870.
22. PANDEY D., NIWARIA K. *A Novel Single Front Camera Based Simpler Approach for Autonomous Taxi Navigation for Smart City Deployments* // 6th Int. Conf. on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN–2019). – 2019. – P. 448–451. – DOI: 10.1109/SPIN.2019.8711668.
23. SANTHIYA R., GEETHAPRIYA C., *Machine Learning Techniques for Intelligent Transportation Systems-An overview* // 12th Int. Conf. on Computing Communication and Networking Technologies. – 2021. – P. 1–7.
24. SHAN T., ENGLT B., MEYERS D., WANG W. et al. *LIO-SAM: Tightly-coupled Lidar Inertial Odometry via Smoothing and Mapping* // IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS–2020). – IEEE Press, 2020. – P. 5135–5142. – DOI: <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341176>.
25. SUN J., ZHANG X., ZHANG P., ZHANG Y.. *Research on Trustworthiness Evaluation Technology of Aircraft Intelligent Navigation System* // IEEE 7th Int. Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), Pisa, Italy. – 2020. – P. 233–237. – DOI: 10.1109/MetroAeroSpace48742.2020.9160164.
26. WANG A., CHEN T., CHEN H., JI X. et al. *NDNVIC: Named Data Networking for Vehicle Infrastructure Cooperation* // IEEE Access. –2019. – Vol. 7. – P. 62231–62239.
27. WU C.H., TU S.H., TU S.W, WANG L.H. et al. *Realization of Remote Monitoring and Navigation System for Multiple UAV Swarm Missions: Using 4G/WiFi-Mesh Communications and*

- RTK GPS Positioning Technology* // Int. Automatic Control Conference (CACs–2022). – 2022. – P. 1–6.
28. ZHANG Y, OUYANG J, KUANG Y. *Satellite Ground Link Planning for Data Transmission of Global Satellite Navigation System* // 6th Int. Conf. on Big Data and Information Analytics (BigDIA), Shenzhen, China, 2020. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/BigDIA51454.2020.00009.
29. ZHAO G., XUAN K., TANIAR D., RAHAYU W. et al. *Intelligent transport navigation system using LookAhead Continuous KNN* // IEEE Int. Conf. on Industrial Technology. – 2009. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/ICIT.2009.4939586.
30. ZHIMING C., WENJIE L., YANNIAN R., XUHONG G. *Application of improved genetic algorithm to search of optimum route for intelligent vehicle navigation system* // Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems. – 2003. – Vol.2. – P. 1187–1189.

FORMATION OF RELIABLE NAVIGATION INFORMATION IN THE TASKS OF ORIENTATION AND NAVIGATION OF AUTONOMOUS ROBOTIC DEVICES USING THE INFRASTRUCTURE OF INTELLIGENT TRANSPORT ENVIRONMENT

Peter Trefilov, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, (petertf@ipu.ru).

Maria Romanova, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, professor (rma-rda@ipu.ru).

Abstract: In the context of the development of intelligent transport environment, the accurate positioning of autonomous robotic devices plays an important role. In this article, the authors present a method of orientation and navigation of robotic systems with the possible use of intelligent transport environment infrastructure. The algorithm of robot orientation and navigation in the intelligent transport environment describes the process of data collection, processing, filtering, interpolation and extrapolation to determine the robot's location and route planning. The method of formation of the priority mode of on-board navigation complex operation under conditions of information redundancy of navigation parameters is proposed. The method represents the optimization problem of selecting the operating mode of the on-board navigation system, which at the moment of time has the most accurate estimation taking into

account the external conditions. The article also touches upon the concept of measurement results reliability. The criteria of measurement information reliability to ensure the effectiveness of decision-making in the management of measurement processes are highlighted. The approach to determining the reliability of navigation and measurement information on the basis of the method of statistical decision theory of marginal values of measurement results is described. This approach allows to analyze quickly enough the received measurement information by statistical indicators and to estimate the degree of reliability of the results.

Keywords: intelligent transport system, navigation and orientation, reliability, robotic systems.

УДК 65.011.56+ 656.1

ББК 39.1

DOI: 10.25728/ubs.2023.101.3

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии Н.А. Коргиным.*

Поступила в редакцию 16.10.2023.

Опубликована 30.11.2023.