

На правах рукописи



Чан Ван Туан

**АВТОНОМНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРИЕМНИКОВ СПУТНИКОВЫХ
НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ИНФОРМАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ДВИЖЕНИЕМ НАЗЕМНОГО РОБОТА**

Специальность: 05.13.05 – Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск - 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск

Научный руководитель: Киселев Сергей Константинович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Измерительно-вычислительные комплексы» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», г. Ульяновск

Официальные оппоненты: Иванов Александр Васильевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Радиотехника» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Приходько Виктор Владимирович, к. ф.-м. н., старший научный сотрудник Научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы, ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет»

Ведущая организация: Федеральный научно-производственный центр АО «НПО Марс», г. Ульяновск

Защита состоится «21» сентября 2022 г. в 12-00 на заседании диссертационного совета Д 212.277.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32 (ауд. 211, главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» и на сайте университета www.ulstu.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2022 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.277.04,
доктор технических наук, доцент



Наместников А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Современный уровень развития наземных мобильных роботов делает их востребованными при решении различных задач. Учитывая, что основной тенденцией на современном этапе развития мобильной робототехники является переход от телеуправляемых систем, которые требуют непосредственного участия человека для выполнения всех действий, к автономным системам, в которых оператор лишь указывает конечные и промежуточные цели, робот должен быть постоянно обеспечен достоверной и точной навигационной информацией о положении в пространстве и параметрах движения.

Для части роботов достаточно локальной навигации (определение текущего положения робота относительно некоторой точки, обычно стартовой, это актуально для роботов, выполняющих задания в пределах заранее известной области, например, здания). Для других групп роботов необходима глобальная навигация (определение положение робота в географической системе координат).

Основным источником навигационных параметров на борту мобильного робота является навигационный комплекс, который за счет алгоритмов обработки информации от измерителей, функционирующих на различных физических принципах, непрерывно формирует навигационное решение, обладающее высокими характеристиками надежности, точности и целостности.

Для глобальной навигации обычно используются:

- инерциальные навигационные системы;
- спутниковые навигационные системы (СНС) (аппаратура приема СНС);
- корреляционно-экстремальные навигационные системы.

Информация, поступающая в навигационный вычислитель от отдельных датчиков, как правило, сильно зашумлена, на точность определения параметров в той или иной степени влияют конструктивное и аппаратное исполнение конкретного датчика или системы, условия эксплуатации и окружающей среды непосредственно в момент измерения.

Повышение надежности и точности формирования навигационной информации обеспечивается совершенствованием конструкции датчиков, комплексированием измерений, получаемых от нескольких измерителей, алгоритмическими методами, построенными на основе теории оценивания, определения и компенсации погрешностей.

Контроль достоверности навигационных данных обычно осуществляется двумя способами:

- анализом результатов встроенного контроля датчика и служебных признаков контроля передачи информации, то есть по априорно доступным на входе селектора навигационного комплекса признакам;
- алгоритмическим способом, путем выявления аномалий в формируемом векторе навигационных решений.

Вопросы обеспечения информационной надежности и контроля навигационных систем рассматривались в работах Пешехонова В.Г., Дмитриева С.П., Колесова Н.В., Осипова А.В., Емельянцева Г.И., Степанова О.А. и др.

Для систем наземных мобильных роботов критически важными параметрами являются минимальные энергопотребление, стоимость и габариты. Поэтому приоритетно разрабатываются и используются аппаратурно безызбыточные системы, которые содержат один глобальный навигационный датчик, а надежность, точность и целостность данных обеспечивается алгоритмическими методами. Чаще всего для построения навигационной системы используется приемник СНС, который обеспечивает достаточно высокую точность определения координат (в режимах работы при малом количестве отрицательно влияющих на результаты измерения факторов), небольшое время готовности устройства, отсутствие накопления погрешностей, простоту использования и относительную дешевизну технического решения.

При этом у СНС есть существенный недостаток — их применение ограничено зонами доступности сигнала спутников, на местности со сложным рельефом, в городских условиях, вблизи вышек связи сигнал со спутника принимается неустойчиво и с помехами. Происходящее при этом нарушение целостности навигационных данных существенно влияет на точность управления роботом. Для таких систем разрабатываются специальные алгоритмы автономного контроля целостности данных в приемнике (RAIM - Receiver Autonomous Integrity Monitoring). Они рассматриваются в работах Иванова А.В., Комракова Д.В., Вараввы В.Г., Кирейченко В.А., Грошева А.В., Фроловой О.А., Brown R.G, Mc Burney P.W., Patrick Y.C., Parkinson B.W., Axelrad P., Sturza M.A., Young C. Lee и др.

Таким образом, задача повышения информационной надежности системы управления движением наземного робота при использовании приемника СНС является актуальной.

Целью работы является повышение информационной надежности системы управления движением наземного робота при возникновении информационных отказов приемника СНС.

В работе были поставлены и решены **следующие задачи**:

1. Анализ и оценка основных причин и характеристик информационных отказов приемников СНС в системах управления наземными роботами, приводящих к нарушению целостности навигационных данных, и основных технических решений, позволяющих повысить информационную надежность системы управления

2. Разработка модели наземного робота с системой управления на базе приемника СНС, позволяющей моделировать возникновение информационных отказов приемников СНС, разрабатывать и исследовать алгоритмы обнаружения нарушения целостности навигационных данных, способы повышения информационной надежности системы

3. Анализ и оценка применимости в системах управления наземными роботами известных алгоритмов автономного контроля приемников СНС

4. Разработка алгоритма автономного контроля приемника СНС в системе управления наземным роботом, учитывающего параметры его движения и позволяющего определять возникновение информационных отказов, приводящих к нарушению целостности навигационных данных. Исследование и оценка характеристик алгоритма автономного контроля приемника СНС

5. Разработка способа повышения информационной надежности системы управления движением наземного робота при возникновении информационных отказов приемника СНС, приводящих к нарушению целостности навигационных данных

6. Исследование и оценка характеристик способа повышения информационной надежности системы управления движением наземного робота при возникновении информационных отказов приемника СНС

Методы диссертационного исследования. В работе использованы методы математического моделирования, теории автоматического управления, методы статистической обработки экспериментальных данных и цифровой обработки сигналов. Обработка результатов и численное моделирование проведены с использованием Excel, GPX_Editor, Matlab/Simulink.

Достоверность научных положений, подтверждена корректностью применения апробированного в научной практике исследовательского и математического аппарата; непротиворечивостью применяемых моделей и методов, результатами модельных исследований предложенных технических решений

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модель наземного робота с системой управления на базе приемника СНС, позволяющая моделировать возникновение информационных отказов приемников СНС, разрабатывать и исследовать алгоритмы обнаружения нарушения целостности навигационных данных, способы повышения информационной надежности системы.

2. Алгоритм автономного контроля приемника СНС в системе управления наземным роботом, учитывающий параметры движения робота и позволяющий определять возникновение информационных отказов, приводящих к нарушению целостности навигационных данных.

3. Способ повышения информационной надежности системы управления, обеспечивающий снижение погрешности движения наземного робота при возникновении информационных отказов приемника СНС, приводящих к нарушению целостности навигационных данных.

4. Результаты модельных исследований и определения характеристик алгоритма автономного контроля приемника СНС и способа повышения информационной надежности системы управления движением наземного робота при возникновении информационных отказов приемника СНС, приводящих к нарушению целостности навигационных данных.

Научная новизна работы заключается:

1. В модели наземного робота с системой управления на базе приемника СНС отличающейся тем, что она ориентирована на исследование ее информационной надежности.

2. В алгоритме автономного контроля информационных отказов приемника СНС отличающемся тем, что для корректного обнаружения нарушения целостности навигационных данных в нем учитывается дополнительная информация о параметрах движения мобильного робота, что позволяет исключить формирование ложных сигналов о недостоверности навигационных данных.

3. В способе повышения информационной надежности системы управления, отличающемся тем, что в нем реализован выбор режима управления движением робота на основе контроля целостности навигационных данных, что повышает информационную надежность системы.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что модель системы управления движением наземного робота позволяет исследовать возникновение различных информационных отказов приемника СНС и возникающих при этом нарушений целостности навигационных данных; оценивать влияние информационных отказов приемника СНС на характеристики движения робота по заданным траекториям; разрабатывать и исследовать алгоритмы контроля целостности навигационных данных; реализовывать и исследовать различные алгоритмы управления наземным мобильным роботом, учитывающие нарушение целостности навигационных данных.

Алгоритм автономного контроля информационных отказов приемника СНС и способ повышения информационной надежности системы управления позволяют предложить новые методы контроля других видов отказов в навигационной системе и способы парирования последствий возникновения таких отказов для исключения аварийных ситуаций при эксплуатации автономных роботов.

Практическая значимость работы состоит в том, что определены характеристики алгоритма автономного контроля приемника СНС и способа повышения информационной надежности системы управления движением наземного робота и предложен комплекс технических решений, позволяющих реализовать их в аппаратурно-безызыточной системе управления наземным мобильным роботом, с минимальными энергопотреблением, стоимостью и габаритами.

Результаты диссертации использованы в Центре новых информационных технологий Ульяновского государственного технического университета при работе над проектом в сфере беспилотного транспорта и искусственного интеллекта для совершенствования беспилотного автомобиля «ГАЗель NEXt» при подготовке его для участия в соревнованиях «Робокросс-2021».

Основные результаты работы соответствуют п. 4 Разработка научных подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих надежность,

контроль и диагностику функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления паспорта специальности 05.13.05.

Апробация результатов работы

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

XVIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «молодежь и современные информационные технологии» (МСИТ-2021) (Россия, Томск, 22 -26 марта 2021 г.)

Научно-техническая конференция "Интегрированные системы управления", ФНПЦ АО «НПО Марс» (Россия, г. Ульяновск, 18 - 19 мая 2021 г.).

XII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Информатика, моделирование, автоматизация проектирования» (ИМАП - 2020) (Россия, г. Ульяновск, 25 - 26 ноября 2020 г.);

XI Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, студентов и молодых ученых «Информатика и вычислительная техника» (ИВТ-2019) (Россия, г. Ульяновск, 27 – 29 мая 2019 г.);

XII Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, студентов и молодых ученых «Информатика и вычислительная техника» (ИВТ-2020) (Россия, г. Ульяновск, 15 – 16 июня 2020 г.);

55-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава Ульяновского государственного технического университета «Вузовская наука в современных условиях» (Россия, г. Ульяновск, 25 – 30 января 2021 года);

54-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава Ульяновского государственного технического университета «Вузовская наука в современных условиях» (Россия, г. Ульяновск, 27 января – 1 февраля 2020 г.);

53-я Научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава Ульяновского государственного технического университета «Вузовская наука в современных условиях» (Россия, г. Ульяновск, 28 января – 2 февраля 2019 г.).

Публикации результатов работы.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 11 печатных работах, в том числе в 2 статьях в российских рецензируемых научных журналах из Перечня, рекомендованного ВАК РФ, в материалах 8 научно-технических конференций, получен патент на полезную модель.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 160 страницах машинописного текста, содержит 70 рисунков, 14 таблиц, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 134 наименований на 14 страницах и 4 приложений на 18 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена актуальность темы работы, степень ее научной разработанности, указаны цели и задачи работы, методы исследования, обоснована достоверность научных положений, выводов и рекомендаций.

В первой главе рассмотрены основные методы и средства определения положения наземного робота при управлении движением, показаны преимущества и недостатки использования для глобальной навигации СНС, определены основные причины возникновения информационных отказов навигационной системы, характерные для наземных роботов, предложена схема системы управления мобильным роботом с автономным контролем приемника СНС. Применительно к управлению движением робота рассмотрено понятие информационной надежности и проведен анализ ее показателей.

Анализ основных методов и средств определения положения наземного робота при управлении движением показал, что в настоящее время реализация ни одного из отдельно взятых принципов измерения навигационных параметров (координаты и положение в пространстве, линейная скорость и ускорение) не обеспечивает требуемую информационную надежность системы управления движением объекта. Для этого используется совмещение функций различных навигационных систем, приводящее к появлению многофункциональных интегрированных комплексов и объединение технических средств, измеряющих одни и те же (или функционально связанные) навигационные параметры, комплексная (совместная) обработка информации и взаимная информационная поддержка нескольких устройств или систем. Применение подобных комплексных решений существенно ограничено на мобильных наземных роботах, так как оно требует наращивания вычислительных мощностей, приводит к росту энергопотребления, сокращает время автономной работы, кроме того, ухудшаются стоимостные и габаритные характеристики, в целом возрастает сложность системы.

При этом спутниковая навигация технически является одним из наиболее совершенных принципов измерения навигационных параметров движущегося объекта. Полученные с помощью приемника СНС параметры достаточны для управления движением робота, не имеют тенденции к накоплению погрешностей, имеют достаточно высокую точность, но подвержены помехам и потере сигнала.

Часть ошибок и погрешностей СНС особенно часто возникает при нахождении мобильного робота на поверхности земли на местности со сложным рельефом или в городских условиях, когда значительная часть небосвода скрыта. Это приводит к повышению вероятности нарушения целостности навигационных данных, что существенно влияет на точность управления.

Для контроля целостности навигационных данных в наземных мобильных роботах больше подходят автономные методы. Один из которых - метод бортового мониторинга целостности (AAIM - Aircraft Autonomous Integrity Monitoring), основанный на получении избыточной информации от других датчиков и систем, имеющихся в составе мобильного робота, имеет те же

недостатки, что и комплексные системы навигации. Второй метод автономного контроля целостности навигационных данных в приемнике СНС (RAIM - Receiver Autonomous Integrity Monitoring) основан на специальной математической и логической обработке навигационных сигналов (методы оценок, методы максимального отличия решения, методы сравнения дальности и местонахождения, невязки по методу наименьших квадратов, методы фильтрации и др.) может быть реализован в системах управления мобильным роботом без существенных затрат.

Для контроля информационных отказов приемника СНС в системе управления наземного робота, приводящих к нарушению целостности навигационных данных, разработана общая схема автономного контроля, в которой предложено учитывать дополнительную информацию о параметрах движения мобильного робота используя известные методы обнаружения неисправностей на основе уравнений соответствия, устанавливающих логические и параметрические взаимосвязи между процессами, происходящими в различных элементах системы управления, рис. 1.



Рисунок 1 - Структурная схема системы управления мобильным роботом с автономным контролем приемника СНС

Наиболее полно особенности управления наземным роботом при возникновении информационных отказов приемника СНС характеризуются информационной надежностью системы. Информационная надежность определяется как способность алгоритма функционирования системы правильно выполнять свои функции при различных ошибках в исходных данных. Характеристикой информационной надежности является погрешность управления движением робота при возникновении информационных отказов при определении навигационных параметров. Таким образом, необходима разработка таких методов и средств контроля приемников СНС и алгоритмов управления, которые обеспечат максимальное парирование влияния информационных отказов на точность движения.

Во второй главе проводится разработка модели наземного робота с системой управления на базе приемника СНС и оценка ее соответствия целям разработки.

Модель наземного робота с системой управления на базе приемника СНС, разработанная в работе, реализует:

- логику работы системы управления, использующей приемник СНС с учетом особенностей кинематики робота и динамики его приводов;
- задание движения робота по требуемым для исследования траекториям (функционально заданным или произвольным);
- моделирование возникновения различных информационных отказов приемника СНС и возникающих при этом нарушений целостности навигационных данных;
- оценивание влияния информационных отказов приемника СНС на характеристики движения робота по заданным траекториям;
- разработку и исследование алгоритмов контроля целостности навигационных данных;
- реализацию и исследование различных алгоритмов управления наземным мобильным роботом, учитывающих ошибки в навигационных данных;
- проведение оценки информационной надежности системы управления движением наземного робота.

Модель учитывает особенности кинематики робота, динамику его приводов, формирование координат робота спутниковой навигационной системой с выделением той части алгоритма, которая реализуется в приемнике СНС.

Для моделирования выбрана кинематическая схема робота с двумя независимыми активными колесами, оси которых лежат на одной прямой. Управление роботом ведется по продольной и угловой скоростям. Динамическая модель робота учитывает быстродействие двигателей робота.

Общая модель СНС включает в себя несколько блоков, рис.2.



Рисунок 2 - Схема моделирования СНС

(1) Блок «Начальные координаты приемника» задает некоторые начальные координаты приемника, которые далее итерационно уточняются в процессе моделирования;

(2) Блок «Координаты видимых спутников» задает входные координаты спутников, используемых при моделировании для решения навигационной задачи;

(3) Блок «Алгоритм определения координат приемника СНС» содержит математическое решение навигационной задачи (определение положения приемника);

(4) Блок «Ошибки измерения» задает виды и параметры ошибок измерения, учитываемых в модели;

(5) Блок «Вычисленные координаты приемника» определяет текущие координаты приемника СНС с учетом ошибок измерения.

Предполагается, что движение робота происходит в определенном месте и в определенное время, поэтому для выбора спутников при моделировании используется информация о зонах видимости, которые приводятся в специальных альманахах. Далее для конкретных выбранных спутников на основе эфемерид получается более детальная информация для моделирования.

Полная модель реализована в среде Simulink пакета MatLab, рис.3.

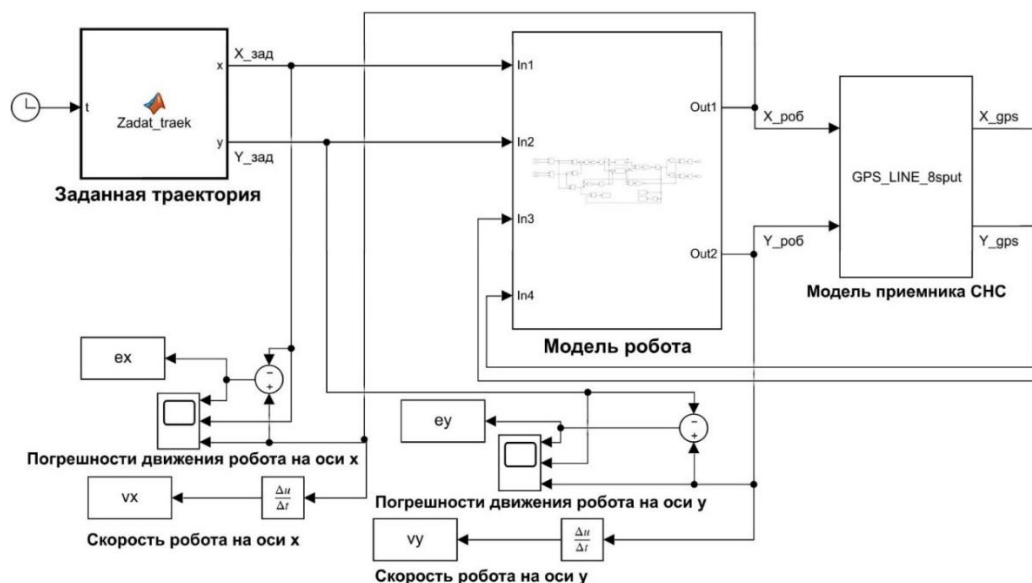


Рисунок 3 - Схема модели автономного мобильного робота с приёмником СНС

Методом детерминированного случая проведена проверка разработанной модели наземного робота с системой управления на базе приемника СНС. Детерминированным случаем для модели было выбрано движение робота, управляемого автоматической системой, по заранее определенным, функционально заданным траекториям (линейной, гармонической, круговой и др.), а также по произвольной траектории, полученной на реальных данных. Анализ результатов моделирования показал, что:

- изменение координат робота при движении по заданным детерминированным и произвольной траекториям соответствует его модели и логике работы системы управления;

- робот следует по заданным детерминированным и произвольной траекториям с ожидаемыми погрешностями, зависящими особенностей кинематики робота и динамики его приводов.

Результаты моделирования подтверждают, что использование приемника СНС в системе управления позволяет обеспечить движение робота по различным траекториям с контролируруемыми характеристиками погрешности и скорости перемещения.

В третьей главе проводится исследование и разработка алгоритмов контроля приемника СНС в системе управления наземного робота.

Основным видом информационных отказов при наземном движении, как было показано в главе 1, является то, что в какой-то случайный момент времени приемник перестает получать информацию от достаточного количества спутников, не может решить навигационную задачу и перестает обновлять на выходе данные о своем местоположении, они "замораживаются" на заранее неизвестный период времени. Затем, когда информационный отказ пропадает, приемник определяет свое новое, корректное местоположение и скачком изменяет данные на выходе. Скачкообразное изменение данных о местоположении при восстановлении работоспособности приемника обусловлено тем, что мобильный робот при неработоспособности приемника, как правило, продолжает двигаться.

Для изучения данных случаев модель автономного мобильного робота была дополнена блоком моделирования информационных отказов приемника СНС, рис.4.



Рисунок 4 - Схема моделирования информационного отказа приемника СНС

Возможность и эффективность определения случаев "замораживания" сигнала на выходе приемника СНС была изучена на примере реализации автономного алгоритма определения целостности навигационных данных с использованием фильтра Калмана (ФК). В алгоритме для определения информационных отказов используется известный подход на основе контроля обновляемой последовательности невязок фильтра, которые без нарушений целостности сигнала представляют собой белый шум с нормальным

распределением, а при нарушениях - нарастают. Известно, что данный алгоритм хорошо срабатывает в случае кратковременных сбоев, когда невязки резко возрастают и выходят из некоторого допускового канала. В тоже время случай, когда приемник СНС перестает обновлять данные на выходе, требует отдельного рассмотрения т.к. характер накопления невязок и формирование допуска будет отличаться от случая импульсных или скачкообразных помех.

Для исследования алгоритма на основе невязок фильтра Калмана на вход модели робота задавалась траектория движения по «треугольнику», рис. 5. Данная траектория было выбрана потому, что резкое изменение направления движения может вызывать при работе алгоритма сбой, когда изменение направления движения принимается за ошибку приемника СНС.

При движении робота по траектории «треугольник» моделировались случаи информационного отказа с параметрами, приведенными в таб. 1.

Отклонения траектории движения робота при возникновении информационных отказов видны на рис. 5.

Таблица 1

Моменты времени и длительность информационного отказа приемника СНС при моделировании

Интервал "замораживания" сигнала	550 - 600 сек.	1550 - 1630 сек.	2450 – 2500 сек.
Длительность	50 сек.	65 сек.	80 сек.

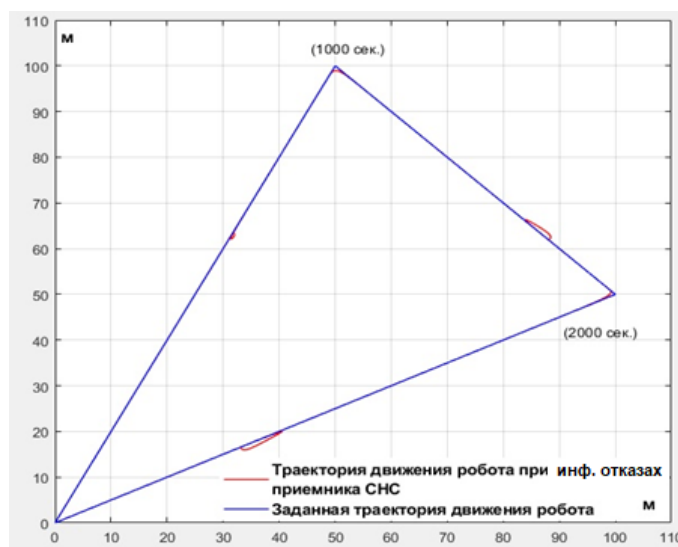


Рисунок 5 - Траектория движения робота при исследовании алгоритмов обнаружения информационных отказов приемника СНС

На рис. 6 приведен результат определения информационных отказов навигационных данных алгоритмом на основе вычисления невязок ФК.

Информационный отказ приемника СНС определяется от начала момента "замораживания" сигнала t_1 до момента t_2 , рис. 6, при котором нормированная

сумма невязок превышает значение некоторого заданного порога (в данном случае 10, для того чтобы накопленные невязки ФК, возникающие при резком изменении движения робота, не принимались за ошибки). Быстродействие алгоритма обнаружения информационных отказов СНС определяется разностью $\Delta t = t_1 - t_2$ и показывает время на определении отказа.

Результаты моделирования показали, что для устойчивого определения информационного отказа с учетом изменений невязок ФК, возникающих при резком изменении траектории движения робота, требуется около $\Delta t = 20$ секунд.

Кроме резкого изменения направления движения наземный робот в процессе выполнения функций может неоднократно останавливаться на неопределенное время в разных, заранее неизвестных, точках траектории и затем продолжать движение. Такие остановки так же могут привести к тому, что при использовании автономных алгоритмических методов оценки навигационных данных может быть сформирован ложный сигнал об их недостоверности.

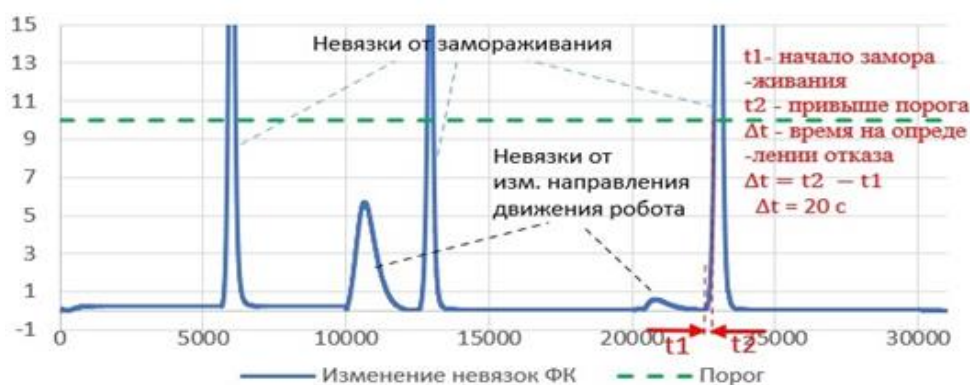


Рисунок 6 - График изменения невязок ФК

Для корректного обнаружения информационного отказа приемника СНС предложено учитывать дополнительную информацию о параметрах движения мобильного робота и использовать методы обнаружения неисправностей на основе уравнений соответствия.

Если, например, робот приводится в движение двумя независимыми ведущими колесами, каждое из которых вращается собственным электродвигателем, то величина продольной скорости движения робота $V_{пр}$ определяется как средняя скорость линейного перемещения каждого из колес:

$$V_{пр} = \frac{(\omega_{п} + \omega_{л})}{2} r_k$$

где: $\omega_{п}, \omega_{л}$ - угловые скорости вращения правого и левого ведущих колес, соответственно; r_k - радиус колеса.

Тогда, за некоторое время $\Delta t = t_2 - t_1$ робот проедет расстояние приблизительно равное $S_1 = V_{пр} \Delta t$.

Когда СНС работает без потери сигнала, то на выходе приемника в момент t_1 будут координаты X_1, Y_1 , а в момент t_2 , соответственно, X_2, Y_2 , и расстояние, на которое переместится робот за Δt будет равно S_2 :

$$S_2 = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2}$$

Необходимо в процессе движения робота постоянно отслеживать отношение $S = S_2/S_1$, которое при правильной работе СНС будет приблизительно равной величиной ($S = \text{const}$). При информационном отказе приемника СНС координаты на его выходе не изменятся и S_2 , а, соответственно, и S , будут близки к нулю.

Для вычисления S необходимо знать угловые скорости вращения правого и левого ведущих колес ω_p, ω_l .

Алгоритм не изменится, если вместо угловых скоростей вращения колес использовать управляющие напряжения на двигатели U_p и U_l , соответственно, т.к. угловые скорости вращения колес в статике пропорциональны управляющим напряжениям. Оценка достоверности данных СНС в этом случае ведется по сигналу, где

$$S'_1 = \frac{(U_p + U_l)}{2} \Delta t$$

Такой вариант алгоритма может быть реализован, когда система управления робота является аппаратно-безызбыточной и не содержит дополнительных датчиков определения перемещения робота.

Вычисление сигнала информационного отказа S в модели наземного робота приведено на рис. 7.

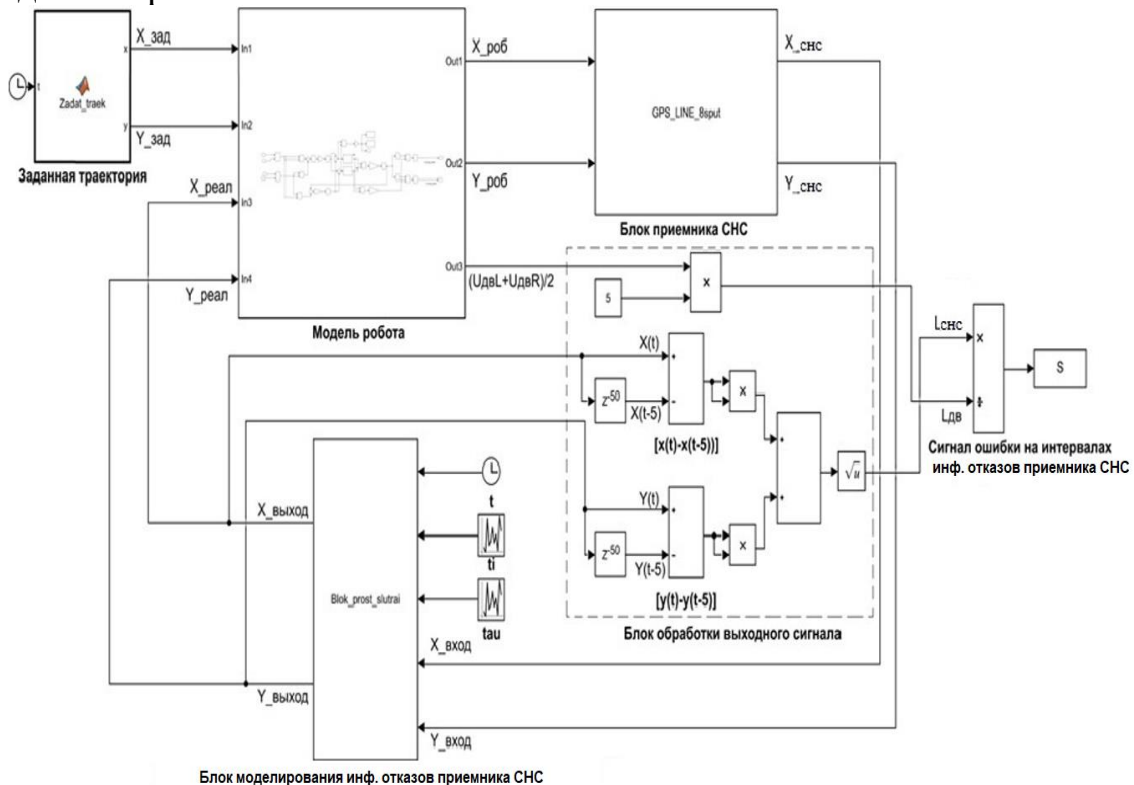


Рисунок 7 - Формирование сигнала информационного отказа S навигационных данных в модели наземного робота

Результаты определения ошибок приемника СНС предложенным алгоритмом приведены на рис. 8.

В те моменты, когда возникали информационные отказы приемника СНС величина $S' \approx 0$. В конце каждого интервала отказа приемник СНС восстанавливает работоспособность и измеряет положение робота, в которое он успел переместиться за время отказа, что вызывает импульсное изменение S' .

При моделировании интервал Δt , за которой определялось возникновение отказа, был взят равным 5 секундам, т.е. он определялся приблизительно в 4 раза быстрее, чем у алгоритма с невязками фильтра Калмана.

По результатам моделирования движения наземного мобильного робота сделан вывод, что предложенный алгоритм позволяет контролировать работу приемника СНС.



Рисунок 8 - Результаты определения интервалов информационных отказов приемника СНС

Определение информационных отказов приемника СНС позволяет учесть это при управления наземным роботом и изменить его для минимизации погрешности следования по заданной траектории.

В четвертой главе предложен способ управления мобильным роботом на основе автономного контроля приемника СНС обеспечивающий повышение информационной надежности системы управления, разработана структурная схема системы управления мобильным роботом, предназначенная для реализации предложенных в работе алгоритмических решений.

Предложенный способ управления мобильным роботом обеспечивает исключение больших отклонений робота от заданной траектории при возникновении информационных отказов приемника СНС. Для исключения отклонений от заданной траектории в способе предлагается переходить при нарушении целостности навигационных данных на управление по модели робота. Система в этом случае будет иметь вид, представленный на рис. 9.

При движении робота блок определения целостности навигационных данных постоянно контролирует их изменение и при корректных данных с

приемника СНС выставляет признак их целостности - «1», либо ошибочности — значение «0». Блок выбора режима управления переключается данным признаком. При целостности данных (значение «1») в обратную связь системы управления подаются координаты робота с приемника СНС. При возникновении информационного отказа приемника СНС (значение «0») в обратную связь поступают координаты робота, вычисленные по его модели. Таким образом, в системе происходит выбор режима управления — управление по измеренным данным положения робота или по координатам, вычисленным по его модели.



Рисунок 9 - Структурная схема системы управления мобильным роботом с выбором режима управления

Результаты моделирования движения робота по траектории при реализации описанного способа управления приведены на рис. 10.

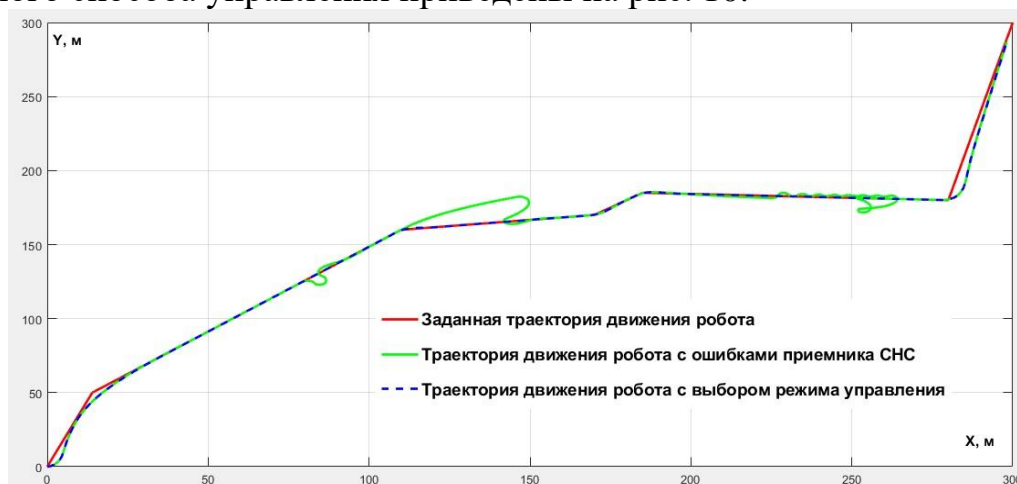


Рисунок 10 - Траектории движения робота при возникновении ошибок приемника СНС без изменения способа управления и с выбором режима управления

Для оценки эффективности способа определялись отклонения Δ_x , Δ_y , Δ_L , по координатам X и Y, возникающие при движении робота, а также по расстоянию L от точки на заданной траектории до точки, в которой находится робот на реальной траектории движения, а также СКО этих величин: σ_x , σ_y , σ_L .

Сравнительные результаты при управлении без учета информационных отказов и с переключением на управление по модели робота приведены в таб. 2, 3.

Таблица 2

Максимальные погрешности траектории движения робота

$\Delta_X^{\text{без_управ.}}$, м	$\Delta_Y^{\text{без_управ.}}$, м	$\Delta_L^{\text{без_управ.}}$, м
32,99	18,80	32,99
$\Delta_X^{\text{с_перекл.}}$, м	$\Delta_Y^{\text{с_перекл.}}$, м	$\Delta_L^{\text{с_перекл.}}$, м
3,11	5,20	7,29

Таблица 3

Оценка СКО

$\sigma_X^{\text{без_управ.}}$	$\sigma_Y^{\text{без_управ.}}$	$\sigma_L^{\text{без_управ.}}$
8,47	4,50	9,60
$\sigma_X^{\text{с_перекл.}}$	$\sigma_Y^{\text{с_перекл.}}$	$\sigma_L^{\text{с_перекл.}}$
2,04	2,38	3,13

Таким образом, по результатам в таб. 2, 3 видно, что при использовании предложенного способа с выбором режима управления по модели робота при возникновении информационных отказов приемника СНС погрешности в среднем в 2-10 раз меньше, чем без изменения управления, как по абсолютным отклонениям от заданной траектории, так и по СКО. Это подтверждает высокую эффективность способа для обеспечения точности движения робота при нарушении целостности данных спутникового позиционирования.

В системе управления мобильным роботом, предназначенной для реализации предложенных в работе алгоритмических решений, рис. 11, выбора режима управления реализуется программно-аппаратным блоком, состоящим из блока моделирования, блока оценки достоверности навигационных данных и ключевого устройства. Приемник СНС параллельно подключен ко входу блока оценки достоверности навигационных данных и ключевому устройству, которое переключается блоком оценки достоверности навигационных данных.

При достаточных технических характеристиках основного микроконтроллера системы управления (вычислительная мощность и оперативная память) аппаратная часть блока выбора режима управления может быть реализована на нем, что еще больше упрощает систему.

Кроме того, система управления мобильным роботом может содержать ультразвуковой датчик расстояния, инфракрасный датчик расстояния, видеокамеру.

Если при движении робота с инфракрасного датчика расстояния и/или ультразвукового датчика расстояния и/или по данным анализа кадров видеоизображения с видеокамеры получена информация о наличии препятствия, мешающего роботу двигаться по требуемой траектории движения, то

координаты требуемой траектории движения изменяются таким образом, чтобы избежать столкновения робота с препятствием.

При этом в системе для определения положения робота в пространстве и управления движением не используются дополнительные датчики (электронный компас, одомер, гироскоп, датчики ускорений, угловых скоростей и др.), что делает систему аппаратурно-безызыточной, с минимальными энергопотреблением, стоимостью, габаритами, без снижения точности, помехозащищенности и информационной надежности управления движением наземного робота.

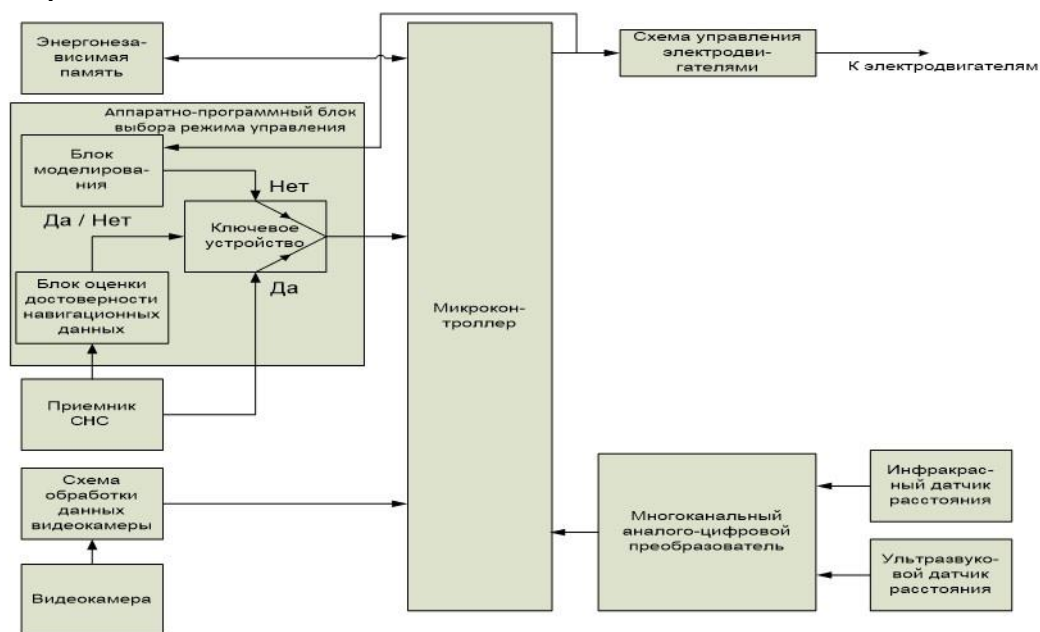


Рисунок 11 - Структурная схема системы управления

стоимостью, габаритами, без снижения точности, помехозащищенности и информационной надежности управления движением наземного робота.

Основные результаты и выводы

1. Спутниковая навигация в настоящее время является технически одним из наиболее совершенных принципов измерения навигационных параметров движущегося объекта. Полученные с помощью приемника СНС параметры достаточны для управления движением объекта, не имеют тенденции к накоплению погрешностей, обеспечивают достаточно высокую точность, но подвержены помехам и потере сигнала.

Часть ошибок и погрешностей спутниковых навигационных систем особенно часто возникает при нахождении мобильного робота с приемником СНС на поверхности земли на местности со сложным рельефом или в городских условиях, когда значительная часть небосвода скрыта. Это приводит к нарушению целостности навигационных данных, которое снижает точность управления. Для исключения снижения точности управления и, как следствие, нарушения функционирования наземного робота? необходимо повышать информационную надежность системы.

2. Предложена общая схема реализации автономного контроля приемника СНС в системе управления наземным роботом в которой для формирования оценки целостности навигационных данных предложено учитывать дополнительную информацию о параметрах движения робота и реализовывать известные методы обнаружения неисправностей на основе уравнений соответствия, устанавливающих логические и параметрические взаимосвязи между процессами, происходящими в различных элементах системы управления.

3. Для исследования влияния информационных отказов приемников СНС на работу системы управления мобильным роботом, разработки и оценки алгоритмов обнаружения нарушения целостности навигационных данных, способов повышения информационной надежности системы разработана модель наземного робота с системой управления с приемником СНС. В модели реализован блок моделирования информационных отказов приемника СНС, который позволяет задавать отказы приемника СНС различного вида с различными параметрами. Проведена проверка модели методом детерминированного случая, результаты которой подтвердили корректность модели и ее соответствие целям разработки.

4. Разработан алгоритм автономного контроля приемника СНС в системе управления наземным роботом, реализующий методы обнаружения неисправностей на основе уравнений соответствия и учитывающий дополнительную информацию о параметрах движения мобильного робота.

5. С использованием разработанной модели проведено сравнительное исследование известного автономного алгоритма обнаружения информационных отказов приемника СНС на основе контроля нарастания в скользящем окне суммы невязок фильтра Калмана, обрабатывающего выходной сигнал приемника СНС и разработанного алгоритма, реализующего методы обнаружения неисправностей на основе уравнений соответствия.

Результаты моделирования показали, что разработанный алгоритм автономного контроля приемника СНС, что при одинаковых параметрах возникающих информационных отказов, позволяет обнаружить ошибку за меньшее (в 3-4 раза) время, чем алгоритм на основе фильтра Калмана.

Кроме того, достоинством разработанного алгоритма является то, что время контроля может быть задано, как параметр алгоритма. Это позволяет настраивать его для реализации в системах управления различного быстродействия.

6. Предложен способ управления мобильным роботом на основе автономного контроля приемника СНС. Способ реализует выбор режима управления и основан на том, что при целостности навигационных данных, определяемых при автономном контроле приемника СНС, в обратную связь системы управления подаются координаты робота с приемника СНС, а при нарушении целостности навигационных данных, в обратную связь поступают координаты робота, вычисленные по его динамической модели, в которой входными сигналами являются значения управляющих напряжений на

двигатели, а выходными – вычисленные координаты робота. Способ обеспечивает повышение информационной надежности системы управления мобильным роботом.

Результаты моделирования предложенного способа с выбором режима управления мобильным роботом на основе автономного контроля приемника СНС показали, что его использование позволяет снизить как максимальные значения отклонений траектории движения робота от заданной, так и СКО в 2-10 раз, что повышает информационную надежность системы управления мобильным роботом.

7. Разработана структурная схема системы управления мобильным роботом с автономным контролем приемника СНС предназначенная для реализации разработанного способа управления с выбором режима управления по модели робота при возникновении информационных отказов приемника СНС. Система обеспечивает аппаратную безызбыточность системы, минимальные энергопотребление, стоимость и габариты, без снижения ее точности, помехозащищенности и информационной надежности.

8. Перспективным является развитие результатов, полученных в работе, для контроля в навигационных системах таких аппаратных отказов, как обрывы в цепи каналов измерения или в цепи исполнения управляющих команд; отказов, в результате которых появляются ложные сигналы в тех же каналах; отказов в объекте управления, вызывающих скачкообразные изменения его состояния в момент отказа; внезапных отказов или сбоев в работе канала формирования управления, приводящих к невыполнению или ошибочному выполнению части алгоритма управления. Парирование последствий таких отказов обеспечит дополнительное повышение надежности системы управления мобильным роботом и поможет исключить возникновение аварийных ситуаций при его эксплуатации.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Чан, В.Т. Оценка достоверности данных спутниковой навигационной системы при управлении движением наземных мобильных роботов / С.К. Киселев, В.Т. Чан // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2021. – Т. 10. – № 2 (54). – С. 12-15.

2. Чан, В.Т. Управление движением наземного мобильного робота при нарушении целостности навигационных данных спутниковой навигационной системы / С.К. Киселев, В.Т. Чан // Автоматизация процессов управления. – 2021. – № 2 (64). – С. 4-12.

Объект интеллектуальных прав

3. Устройство управления мобильным роботом / С.К. Киселев, В.Т. Чан. // Патент на полезную модель 209590 U1. Заявка № 2021122819 от 29.07.2021. – Опубликовано 17.03.2022. – Бюл. №8.

Публикации в других изданиях

4. Чан, В.Т. Обнаружение неисправностей Глонасс/GPS трекеров при эксплуатации / С.К. Киселев, В.Т. Чан // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2019. – № 3 (87). – С. 46-51.

5. Чан, В.Т. Моделирование спутниковой системы навигации / В.Т. Чан, С.К. Киселев // Информатика и вычислительная техника. XI Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, студентов и молодых ученых ИВТ-2019 (Россия, г. Ульяновск. 27 – 29 мая 2019 г.) : сборник научных трудов / под общей ред. В.Н. Негоды. – Ульяновск : УлГТУ, 2019. – С. 157-166.

6. Чан, В.Т. Формирование траектории для исследования движения мобильных роботов / В.Т. Чан, С.К. Киселев // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 54-й научно-технической конф. В 3 ч. Ч.2. – Ульяновск : УлГТУ, 2020. – С. 133-136.

7. Чан, В.Т. Контроль целостности навигационных данных, используемых для управления мобильным роботом / В.Т. Чан, С.К. Киселев // Информатика и вычислительная техника. XII Всероссийская научно-техническая конференция аспирантов, студентов и молодых ученых ИВТ-2020 (Россия, г. Ульяновск. 15-16 июня 2020 г.) : сборник научных трудов / под общей ред. В.Н. Негоды. – Ульяновск : УлГТУ, 2020. – С. 260 – 270.

8. Чан, В.Т. Моделирование системы управления мобильным роботом с контролем ошибок спутниковой навигационной системы / В.Т. Чан, С.К. Киселев // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования ИМАП-2020. XII Международная научно практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых (Россия, г. Ульяновск, 25–26 ноября 2020 г.) : сборник научных трудов / под ред. Н. Н. Войта. – Ульяновск : УлГТУ, 2021. – С. 196-201.

9. Чан, В.Т. Оценка способа автономного контроля ошибок спутниковой навигационной системы / В.Т. Чан, С.К. Киселев // Вузовская наука в современных условиях: сборник материалов 55-й научно-технической конф. В 3 ч. Ч.2. – Ульяновск : УлГТУ, 2021. – С. 118-121.

10. Чан, В.Т. Алгоритм оценки достоверности данных спутниковой навигационной системы при управлении траекторным движением наземных мобильных роботов / В.Т. Чан, С.К. Киселев // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Томск, 22–26 Марта 2021 г.) / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – С. 407-408.

11. Чан, В.Т. Управление движением наземного мобильного робота при нарушении целостности навигационных данных спутниковой навигационной системы / В.Т. Чан, С.К. Киселев // Научно-техническая конференция "Интегрированные системы управления"(Россия, г. Ульяновск, 18 - 19 мая 2021 г.): Сб. науч. тр. – Ульяновск: ФНПЦ АО «НПО «Марс», 2021. – С. 64-72.

Чан Ван Туан

Автономный контроль приемников спутниковых навигационных систем
для повышения информационной надежности системы управления движением наземного
робота

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 23.6.2022. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ ____.

ИПК «Венец», 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32.