

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Киселев Сергей Константинович

Ульяновск – 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ НАЗЕМНОГО РОБОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИЕМНИКА СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ	11
1.1 Основные методы и средства определения положения наземного робота при управлении движением.....	11
1.1.1 Методы и средства определения локального положения наземного робота.....	12
1.1.2 Методы и средства определения глобального положения наземного робота.....	13
1.1.3 Комплексование навигационной информации.....	16
1.2 Анализ характеристик спутниковых навигационных систем и особенностей использования приемников СНС, как элемента системы управления наземным роботом.....	19
1.3 Методы контроля целостности навигационных данных СНС.....	13
1.4 Общая схема контроля приемника СНС в системе управления наземного робота и оценка информационной надежности ее работы.....	36
1.5 Результаты и выводы.....	42
ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЗЕМНОГО РОБОТА С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ ПРИЕМНИКА СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ	45
2.1 Разработка модели наземного робота.....	45
2.1.1 Кинематическая модель мобильного робота.....	46
2.1.2 Динамическая модель наземного робота.....	49
2.2 Модель приемника спутниковой навигационной системы.....	52
2.2.1 Расчет координат видимых спутников приемником СНС.....	52
2.2.2 Модель приемника спутниковой навигационной системы.....	56

2.3	Общая модель наземного робота с системой управления на базе приемника СНС.....	63
2.4	Моделирование движения робота по заданным траекториям.....	65
2.4.1	Моделирование движения робота по функционально заданным траекториям.....	66
2.4.2	Моделирование движения робота по произвольной траектории.....	73
2.5	Результаты и выводы.....	80

**ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ
ОБНАРУЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОТКАЗОВ ПРИЕМНИКА
СНС В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ НАЗЕМНОГО
РОБОТА.....**

3.1	Моделирование и исследование информационных отказов приемника СНС.....	82
3.2	Исследование алгоритма обнаружения информационных отказов приемника СНС на основе невязок фильтра Калмана.....	97
3.3	Алгоритм обнаружения информационных отказов приемника СНС определением "замораживания" сигнала.....	110
3.4	Комбинированный алгоритм обнаружения информационных отказов приемника СНС.....	112
3.5	Исследование быстродействия алгоритмов обнаружения информационных отказов приемника СНС.....	117
3.6	Результаты и выводы.....	121

**ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ
СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ НА ОСНОВЕ
АВТОНОМНОГО КОНТРОЛЯ ПРИЕМНИКА СНС.....**

4.1	Способ управления мобильным роботом на основе автономного контроля приемника СНС.....	123
4.2	Моделирование способа управления мобильным роботом на основе автономного контроля приемника СНС.....	126

4.3	Структура системы управления мобильным роботом со средствами автономного контроля информационных отказов приемника СНС.....	132
4.4	Результаты и выводы.....	139
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	141
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	144
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	146
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. Модель алгоритма определения координат приемника СНС приемником в среде Simulink на Matlab.....	161
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Дополнительные результаты моделирование движения робота по различных функционально заданным траекториям.....	165
	ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акт использования результатов диссертационной работы.....	177
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Патент на полезную модель по теме диссертационной работы.....	178

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы

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. 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 формирования ложных сигналов о недостоверности навигационных данных.

3. 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.

ГЛАВА 1

НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ НАЗЕМНОГО РОБОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИЕМНИКА СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

1.1. Основные методы и средства определения положения наземного робота при управлении движением

Робототехника в настоящее время является одной из перспективных отраслей науки. Основной тенденцией современной мобильной робототехники является переход от телеуправляемых систем, которые требуют непосредственного участия человека для выполнения всех действий робота, к автономным системам, в которых оператор лишь указывает конечные и промежуточные цели [86].

Одной из проблем мобильной робототехники является определение навигационных параметров - местоположения, скорости и ориентации движущегося робота с характеристиками, необходимыми для автоматического управления им [26].

В существующих классификациях роботов есть несколько групп устройств, для которых наиболее важной задачей является навигация. При этом для части роботов важной является локальная навигация (определение текущего положения робота относительно некоторой точки, обычно стартовой, это актуально для роботов, выполняющих задания в пределах заранее известной области, например, здания). Это такие группы роботов, как промышленные транспортные роботы, осуществляющие внутрицеховые и межцеховые перемещения грузов; сервисные роботы для логистических систем; сервисные роботы для профессиональной уборки; сервисные роботы для обследования и технического обслуживания [120].

Для других групп роботов более важной является глобальная навигация (определение абсолютных координат робота). Это такие группы, как сервисные роботы для выполнения технологических операций вне помещений, сервисные роботы для строительства и сноса, роботы для работы в экстремальных условиях, роботы военного и специального назначения.

В соответствии с этим существующие различные методы определения навигационных параметров можно разделить на локальные и глобальные [29, 133].

1.1.1. Методы и средства определения локального положения наземного робота

К локальным методам определения навигационных данных относятся те, которые позволяют определить текущее местоположение и другие параметры на сравнительно небольшом пространстве с требуемой точностью. К ним относятся [121]:

– Одометрия [24, 92, 93]. Основа одометрии - измерение скорости вращения колес робота. Метод обеспечивает хорошую точность на коротких дистанциях при условии отсутствия препятствий и сцеплении колес с землей без проскальзывания. В то же время одометрия требует регулярной проверки текущего положения с помощью дополнительного источника данных, так как погрешности определения расстояния быстро накапливаются.

– Данные сигнала WiFi [19]. В больших зданиях используется множество сигнальных маршрутизаторов, чтобы покрыть всю площадь сетью Wi-Fi. Каждый маршрутизатор имеет свой уникальный адрес. При наличии у автономного робота приемника сигнала WLAN можно получить данные о том, какие точки доступа в данный момент находятся в зоне действия робота, и вычислить его координаты [99, 119].

– Использование лидара [32]. Лидар - лазерный дальномер - измеряет расстояние до окружающих объектов с высокой точностью. Использовании лидара автономно и устанавливать в помещении дополнительные маяки нет необходимости.

– Магнитометрия [23, 84]. Магнитометр измеряет направление или изменение магнитного поля в определенном месте, т.е. для робота он позволяет получить данные о направлении движения. При этом на точность определения направления будут влиять собственные магниты на роботе, например, в двигателях или динамиках (если они используются на устройстве). Также при использовании

требуется предварительная калибровка пространства,

Использование какого-то одного из перечисленных методов не позволяет полностью решить проблему локации робота. Для решения задачи локальной навигации с требуемой точностью необходимо сочетание нескольких методов, что приводит к аппаратурно-избыточной системе управления.

В управлении движением также можно использовать следующие устройства:

– Датчик давления [53]. Данные о давлении могут быть получены от предварительно откалиброванного датчика для расчета высоты робота, например, с указанием, на каком этаже здания находится робот.

– Видеокамеру. Обработанные данные с видеокамеры позволяют определять текущее местоположение робота [27]. Например, с помощью машинного зрения можно распознавать специальные маркеры — QR-коды — содержащие информацию о том, какое помещение находится перед роботом, и получить информацию о его местонахождении и направлении движения, что способствует его более точной и быстрой локализации.

Помимо непосредственно движения робот должен уметь автоматически реагировать на препятствия как статические (стены, столы, колонны), так и динамические (люди, открывающиеся и закрывающиеся двери, другие роботы) [42, 49, 77]. Информацию о препятствиях можно получить с видеокамеры или, например, с лидара.

1.1.2. Методы и средства определения глобального положения наземного робота

Методы определения глобального местоположения — это те, которые позволяют получать навигационные данные на большой территории [108, 121]. К ним относятся следующие системы.

Спутниковые навигационные системы (СНС) [114]. СНС состоит из трех сегментов: космического, наземного и пользовательского. Космический сегмент - это серия искусственных спутников Земли, расположенных на орбите. Наземный - сеть станций слежения, которые отслеживают и корректируют спутники на

орбите. Пользовательский сегмент включает в себя все приемники, которые используются для определения навигационных данных объектов, на которых они расположены. Основными в настоящее время являются несколько СНС:

- ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) [45], российская спутниковая система;
- GALILEO (Галилео) [46], европейская спутниковая система;
- GPS (Global Position System, Глобальная система позиционирования) [44], система, реализованная и эксплуатируемая США;
- Beidou (Бейдоу) [47], спутниковая навигационная система, развиваемая Республикой Китай.

Приемник СНС используется в системе управления робота в качестве источника навигационных данных о местоположении объекта, рис. 1.1.

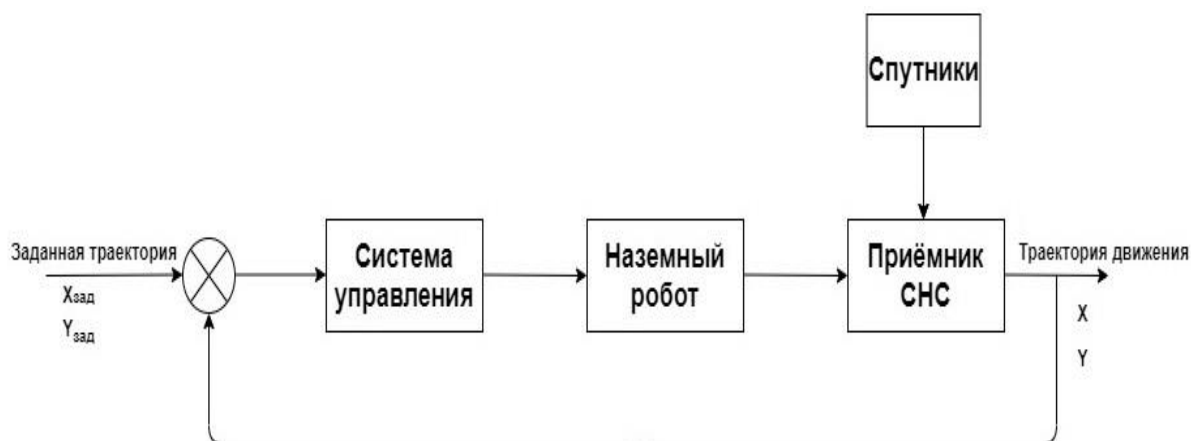


Рисунок 1.1. - Схема управления наземным роботом с СНС

Задача приёмника СНС [36] в системе – принять сигналы со спутников, определить их текущие положения, определить расстояния до спутников, вычислить своё местоположение, скорость, направление движения и отправить эти данные на управляющее устройство робота. Функционирование и характеристики спутниковых навигационных систем и особенности их использования для определения навигационных параметров движущихся наземных роботов требуют отдельного рассмотрения и анализа, что будет сделано далее.

- Инерциальные навигационные системы (ИНС) [62, 83]. Принцип действия ИНС основан на непрерывном измерении параметров движения — ускорения и

угловых скоростей — относительно установленной системы отсчета.

При определении параметров движения для измерения линейного ускорения используются акселерометры [25], гироскопы используются для вычисления угловых скоростей [48]. Поступившие с акселерометров и гироскопов них данные обрабатываются вычислительной системой.

В ИНС в качестве чувствительных элементов применяются прецизионные дорогостоящие гироскопы и акселерометры, которые сильно усложняют и удорожают систему. Навигационные версии гироскопов должны устанавливаться на стабилизированной платформе. Коммерческая инерциальная навигационная система авиационного применения средней точности стоимостью около 50 тыс. долл. Накапливает за час работы погрешность измерения порядка 2000 м. Погрешность более дорогих версий (стоимостью до 200 тыс. Долл.) составляет около 0,1% от пройденного пути [30].

Для использования в мобильных наземных роботах, часто отличающихся небольшими размерами, платформенные ИНС не подходят, так как из-за конструктивных особенностей являются достаточно большими по габаритам, имеют высокую стоимость и при функционировании требуют больших затрат энергии.

На мобильных роботах используются бесплатформенные ИНС (БИНС) измерительный модуль жестко связан с корпусом прибора [85]. БИНС строятся на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) - МЭМС акселерометров и МЭМС гироскопов [82]. Обладая приемлемыми для установки на робот массогабаритными характеристиками, они отличаются невысокой точностью и накапливают ошибки, что быстро увеличивает погрешности определения навигационных параметров и влияет на точность управления движением автономного робота.

Инерциальные навигационные системы так же малоэффективны в случаях, когда скорость объекта часто и резко меняется. Эти особенности ограничивают их применение в наземных мобильных роботах, движущихся по сложным траекториям.

1.1.3 Комплексирование навигационной информации

Совместное использование результатов измерений несколькими навигационными приборами повышает точность и надежность методов позиционирования. Наилучшее решение - объединить доступные навигационные измерения для последующей многомерной оптимальной фильтрации. Однако нелинейная взаимосвязь параметров и разная скорость их поступления усложняют проектирование требуемого нелинейного фильтра [22].

Квазиоптимальный подход к решению задачи интегрирования заключается в отдельной фильтрации данных от каждого датчика и последующем их комплексировании с весами, зависящими от точности полученных оценок.

В работе [112] дан обзор основных принципов, направлений, методов и способов комплексирования навигационных измерений. Проведенный анализ показал, что при этом:

- объединяются средства измерения одинаковых или функционально связанных навигационных параметров, комплексной (совместной) обработки информации и взаимного информационного обеспечения нескольких устройств или систем.

- объединяются функции различных навигационных систем, что приводит к реализации многофункциональных интегрированных комплексов.

Максимальный эффект от комплексирования навигационных измерительных приборов получается при определении единой оптимальной структуры и характеристик интеграционной системы.

Высокая сложность этой задачи приводит к тому, что на практике осуществляют отдельную обработку первичной и вторичной информации.

Первичная обработка информации включает поиск, получение, отбор, преобразование и обработку (в режиме слежения) сигналов навигационных и специальных измерительных приборов для получения навигационных параметров. Например, псевдодальностей или приращения псевдодальностей, псевдоскоростей в случае использования СНС.

Вторичная обработка информации заключается в вычислительной обработке выходных данных самих измерительных устройств, по результатам которой определяются и уточняются координаты и скорость движения, угол ориентации мобильного робота и источники погрешностей.

Существует несколько схем комплексирования навигационных систем [35]:

- Раздельная схема. Обе навигационные системы работают независимо друг от друга, но производится периодическая корректировка одной системы по параметрам другой.

- Слабо связанная схема. Системы работают независимо, но появляется связующий блок (как правило интегральный фильтр Калмана), который по данным одного измерителя (приемника СНС) формирует оценку вектора состояния, по которому производится корректировка данных другого измерителя (БИНС).

- Жестко связанная схема. По этой схеме один из измерителей (БИНС) лишь измеряет первичные параметры поступательного движения, которые дополняют состав результатов измерений второго датчика (приемник СНС), а общее навигационное решение определяется единым фильтром Калмана, что позволяет, во-первых, не синхронизировать измерения датчиков, во-вторых, обнаруживать и отбраковывать сбои в результатах измерений и в-третьих, третьих избежать взаимной корреляции шумов измерений.

- Глубоко интегрированная схема. Функционирование по этой схеме основано на том, что оценки навигационных параметров по результатам измерения одного измерителя (БИНС) служат для предсказания параметров работы другого (значения псевдодальности и псевдоскорости у приемника СНС) и служат для более точной коррекции его работы – контуров слежения за кодом и доплеровской частотой сдвига несущей для улучшения характеристик захвата сигнала.

Общая сравнительная характеристика комплексных систем приведена в таблице 1.1 [35].

Сравнительные характеристики комплексных систем разной архитектуры

Тип системы	Основные качества
Раздельная	Избыточность, ограниченность ошибок оценок местоположения и скорости, наличие информации об ориентации и угловой скорости, высокая скорость выдачи информации, минимальные изменения в бортовой аппаратуре
Слабосвязанная	Все перечисленные качества раздельных систем, плюс более быстрое восстановление слежение за кодом и фазой сигналов СНС, выставка и калибровка БИНС в полете, как следствие повышенная точность в отсутствие СНС-сигнала.
Жестко связанная	Дальнейшее улучшение точности и калибровки, повышенная устойчивость сложения за СНС-сигналами при динамических маневрах, повышенная помехозащищенность.
Глубоко интегрированная	<p>Достоинства: единый фильтр устраняет проблему «каскадного» включения фильтров, компактность, пониженные требования по энергообеспечению.</p> <p>Недостаток: вектор состояния содержит до 40 компонент и фильтр трудно реализуем: необходимость разработки специальных датчиков.</p>

Сложность комплексных систем навигации является существенным ограничением для их использования в мобильных наземных роботах, так как вычислительные мощности их ограничены, а их существенное наращивание приводит к росту энергопотребления сокращая время автономной работы.

1.2. Анализ характеристик спутниковых навигационных систем и особенностей использования приемников СНС, как элемента системы управления наземным роботом

Рассмотренные выше основные методы и средства определения навигационных параметров показали, что с учетом присущих мобильному роботу технических ограничений по энергопотреблению, стоимости, габаритам, сложности получаемого технического решения наиболее подходящим для управления движением является использование СНС, приемник которой включается в систему управления.

Преимуществом навигации с использованием СНС является достаточно высокая надежность определения данных за счет большого количества используемых спутников, простота и удобство использования приемников СНС в составе системы управления наземного мобильного робота [10].

Однако у СНС-навигации есть и определенные недостатки, которые связаны со спецификой принципа работы системы, то есть с передачей сигналов между спутниками и приемником и методами их обработки [129].

В СНС реализован позиционный метод определения местоположения приемника на основе пассивных измерений расстояния до нескольких орбитальных навигационных спутников с известными координатами.

Определение навигационных параметров осуществляется непосредственно в аппаратуре потребителя, т.е. приемнике СНС [37, 113, 123], рис. 1.2.

Для получения информации о местоположении приемник СНС принимает сигналы со всех доступных спутников. Спутниковые сигналы содержат стандартизированные и точные коды и данные навигационных сообщений. Сначала они обрабатываются в радиочастотной части - РЧ ИС. Основной задачей этой части является усиление (МШУ) входного сигнала, фильтрация (Ф), выполнение преобразования частоты и аналого-цифровое преобразование частотного сигнала (АЦП). Кроме того, радиочастотная часть приемника задает тактовую частоту цифровой части приемника.

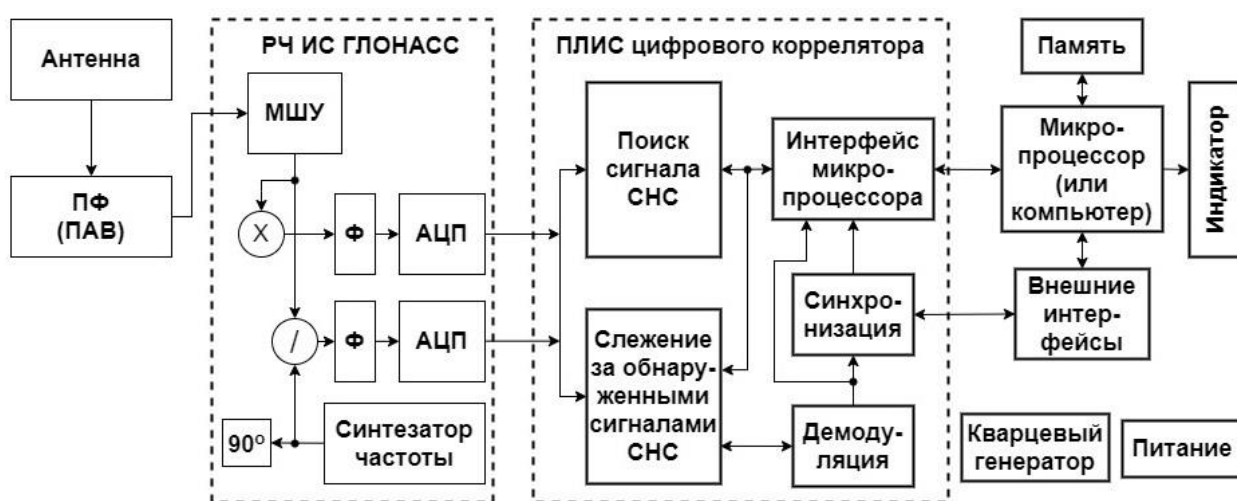


Рисунок 1.2. - Обобщенная структурная схема приемника СНС (на примере ГЛОНАСС)

ПЛИС — программируемая логическая интегральная схема; ПАВ — фильтр на поверхностных акустических волнах; МШУ — малошумящий усилитель; РЧ ИС — радиочастотная интегральная схема; АЦП - аналого-цифровой преобразователь

Радиочастотная часть может работать в двух режимах: поиск сигнала и слежение. В режиме поиска сигнала проводится приближенная оценка параметров сигнала (временной задержки и доплеровской частоты), которые передаются в систему слежения. Если система слежения успешно захватывает сигнал по задержке и доплеровской частоте, от навигационного процессора поступает команда на прекращение поиска, в противном случае процесс поиска продолжается. В режиме слежения информационные параметры сигнала - частота, фаза и времени измеряются.

Оцифрованный сигнал поступает на цифровой коррелятор (ПЛИС цифрового коррелятора). Задачей коррелятора является вычисление корреляционного интеграла. С целью упрощения приемного устройства задача получения координат потребителей и оценок вектора скорости разбита на два этапа обработки, первичный и вторичный: на первичном этапе обработки решается задача измерения навигационных параметров сигнала; на этапе вторичной обработки вычисляются координаты потребителя и вектор скорости. Большинство основных алгоритмов

обработки осуществляется в блоке цифровой обработки сигналов навигационного приемника - в корреляторе.

Навигационный вычислитель (процессор) находит синфазную и квадратурную составляющие сигнала для определения его задержки по времени и частоте, а также для слежения за фазой и задержкой сигнала (алгоритмы первичной обработки). Также в вычислителе проводятся демодуляция навигационного сообщения и, непосредственно, решение навигационной задачи, для формирования данных пользователя.

Так как координаты и компоненты вектора скорости изменяются очень быстро, то сообщения о параметрах движения спутников содержат не эту информацию, а параметры модели, описывающей траекторию движения спутника в течение достаточно длительного интервала времени (около 30 минут). Параметры модели изменяются медленнее и могут считаться постоянными на интервале аппроксимации [130].

Для различных СНС модели, аппроксимирующие движение спутников различны.

Так, например, в GPS используется модель гравитационной кеплеровой орбиты. Траектория навигационного спутника при этом разбивается на аппроксимированные участки продолжительностью один час. В середине каждого участка устанавливается момент время, значение которого передается на приемник СНС. Кроме того, в приемник передаются параметры модели для данного момента времени.

В приемнике СНС определяется интервал между временем, когда необходимо определить положение спутника, и средним временем для текущего участка. Затем с помощью известной функции аппроксимации орбиты и параметров для конкретного участка, полученных в навигационном сообщении, рассчитываются координаты и компоненты вектора скорости спутника.

В системе Глонасс для определения точного положения спутник дифференциальные модели движения [114]. В этих моделях координаты и компоненты вектора скорости спутника определяются путем численного

интегрирования дифференциальных уравнений движения спутника, учитывающих конечное число действующих на него сил. Начальные условия интегрирования задаются для времени, соответствующего середине интервала аппроксимации.

Таким образом процедура обработки информации в приемнике СНС достаточна сложна и ее результативность зависит от многих факторов.

Рассмотрим факторы, которые влияют на результативность определения навигационных параметров СНС и, главное, на вызываемые ими погрешности, что наиболее важно при применении в системе управления наземным мобильным роботом.

На работоспособность СНС влияют атмосферные условия (эффекты ионосферы и тропосферы), геометрическое положение спутников по отношению к приемнику, изменение орбит спутников, ошибки часов спутников, отражения сигналов от объектов на поверхности земли, погрешности вычисления и другие факторы.

Основная тенденция развития технологий спутниковой навигации (в том числе программно-аппаратных средств) связана с поиском методов и средств снижения погрешностей навигационных решений [21, 97].

В первую очередь это достигается проведением избыточных измерений (принятием информации от возможно большего числа навигационных спутников, совместной обработкой навигационных измерений и т.д.). Результат определения навигационных параметров зависит от условий проведения измерений и приборных погрешностей аппаратуры. Результирующая погрешность определяется совместным влиянием погрешностей, имеющих различную физическую природу.

Принято считать, что основными факторами, влияющими на точность определения местоположения СНС, являются следующие, рис. 1.3 [37]:

- ионосферные и тропосферные задержки прохождения сигнала;
- ошибка часов приемника;
- многолучевой прием;
- геометрия видимых спутников, определяемая взаимным расположением

спутников в каждый момент времени;

- эфемеридные ошибки, т.е. погрешности знания положений и скоростей движения навигационных спутников (погрешности в среднем составляют 1—2 м для GPS, 5—7 м для ГЛОНАСС);

- собственные шумы навигационных приемников (до 1—2 м);

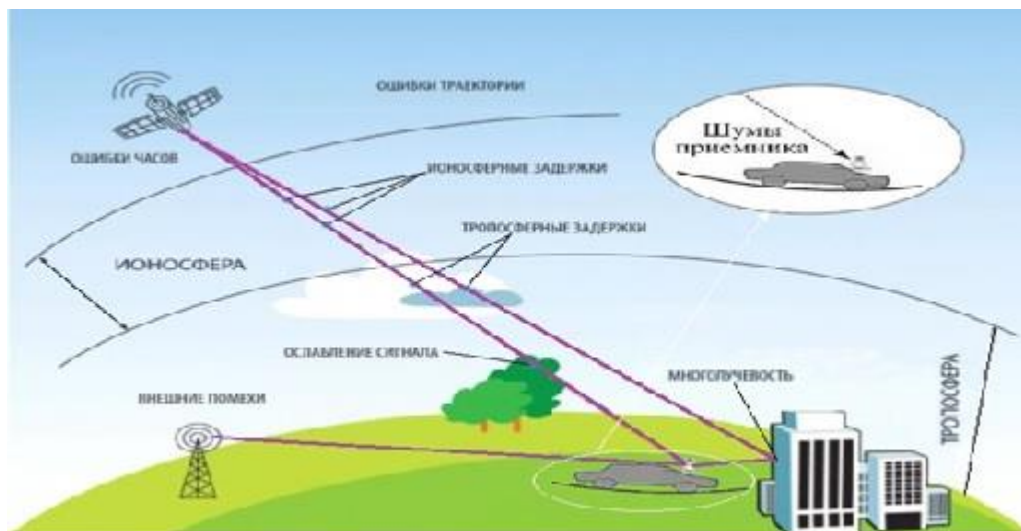


Рисунок 1.3. - Источники ошибок определения местоположения [37]

Рассмотрим основные из указанных факторов более детально.

Ионосферные и тропосферные задержки. Источниками погрешностей являются задержки радиосигнала в ионосфере (слое заряженных частиц на высоте 120—200 км) и тропосфере (8—18 км) Земли, рис. 1.3. Условия в ионосфере влияют на скорость прохождения радиосигнала. Возникающая из-за этого задержка не постоянна и зависит от солнечной активности и погодных условий.

Так в ночное время, когда ионосфера находится в состоянии покоя, погрешность измерения, связанная с задержкой передачи сигнала, составляет около 1 м, а днем, когда активность плазмы высока, — более 10 м.

Существуют два метода, минимизации погрешностей, связанных с влиянием атмосферы. Во-первых, вводится поправка на величину среднего изменения скорости прохождения сигнала через атмосферу.

Второй способ состоит в сравнении скоростей распространения двух сигналов, имеющих разные частоты несущих колебаний. Когда радиоволна

проходит через ионосферу задержка сигнала обратно пропорциональна квадрату частоты излучения. Следовательно, чем ниже несущая частота сигнала, тем больше он замедляется. Таким образом, погрешности определения псевдодальности ΔD обратно пропорциональны квадрату несущей частоты:

$$\Delta D = \frac{k}{f^2}, \quad (1.1)$$

где, ΔD - погрешность определения псевдодальности за счет влияния ионосферы, м; k — коэффициент пропорциональности, не зависящий от частоты; f — частота, Гц.

Более точно погрешность определения псевдодальности с помощью измерений на двух частотах определяется по формуле

$$\Delta L_{\text{ion}} = \frac{f_2^2(L_2 - L_1)}{f_1^2 - f_2^2}, \quad (1.2)$$

где ΔL_{ion} - погрешность определения псевдодальности; f_1, f_2 - частоты сигналов; L_1, L_2 - псевдодальности, измеренные на частотах f_1, f_2 .

Этот метод корректировки довольно сложен и используется только в наиболее совершенных, «двухчастотных» навигационных приемниках. В них большая часть погрешности от ионосферной задержки может быть устранена.

Для минимизации погрешностей от изменения скорости радиосигнала в ионосфере также используется дифференциальный метод определения местоположения (D-GPS) [111]. В этом случае используют два приемника: один мобильный, а второй находящийся в точке с известными координатами. Данные, поступающие с этих приемников СНС, сравниваются и обрабатываются, после чего происходит корректировка показаний мобильного приемника. Чем ближе друг к другу находятся мобильный и стационарный приемники, тем точнее определяются координаты мобильного приемника.

Ошибки от изменения скорости распространения радиоволн зависят также от высоты спутника над горизонтом: чем ниже спутник, тем больший путь проходит его сигнал через атмосферу и тем больше задержка. Большинство приемников исключают использование сигналов от спутников с возвышением над горизонтом

менее 7,5 град.

После прохождения ионосферы сигнал попадает в тропосферу, в которой происходят различные погодные явления. Возникновение погрешностей здесь обуславливается изменением плотности молекул газа и влажности воздуха. Плотность уменьшается с увеличением высоты. Увеличение плотности или влажности также замедляет скорость распространения сигналов спутника.

Погрешности тропосферы по величине схожи с погрешностями, вызываемыми ионосферой, но их почти невозможно скорректировать. Для частичной коррекции используется простая модель на основе стандартной атмосферы: связи давления и температуры.

Суммарный вклад погрешностей определения местоположения от влияния эффектом ионосферы и тропосферы может достигать от нескольких до 40 метров.

Ошибка часов приемника. Причиной дополнительной погрешности при навигационных вычислениях является несовпадение шкал времени и нестабильность бортовых генераторов на спутниках и приемниках. И атомные часы на спутниках и таймеры потребительских устройств имеют свои погрешности. Погрешности часов устраняются синхронизацией шкал времени и частот генераторов в навигационных спутниках через наземный сегмент СНС и введением поправки - дополнительной переменной, получаемой при поиске навигационного решения. Для этого используются результаты измерений псевдодальности до четырех спутников, не до трех.

Многолучевая ошибка (влияние отраженных сигналов). Ошибки, связанные с многолучевым распространением радиоволн, создаются отражением их от близлежащих объектов. При наличии поблизости от аппаратуры приема отражающих поверхностей, таких как высокие здания или скалы, сигнал может многократно отражаться от них и достигать приемника не от спутника, а от объекта, от которого он отразился, рис. 1.4. Из-за этого эффекта время распространения отраженного сигнала превышает время распространения «прямого» сигнала. Это будет происходить, если уровень отраженного сигнала выше уровня «прямого» сигнала.

Увеличение времени распространения отраженного сигнала приведет к ошибке. Эти ошибки значительно меньше 100 м, так как только близко расположенные объекты могут дать достаточно сильное отражение сигнала. Искажение сигнала также может происходить из-за интерференции прямого и отраженного сигналов.

Таким образом, ошибки многолучевости могут быть отнесены одновременно к категории ошибок, связанных с распространением навигационного сигнала, и к ошибкам приемника.

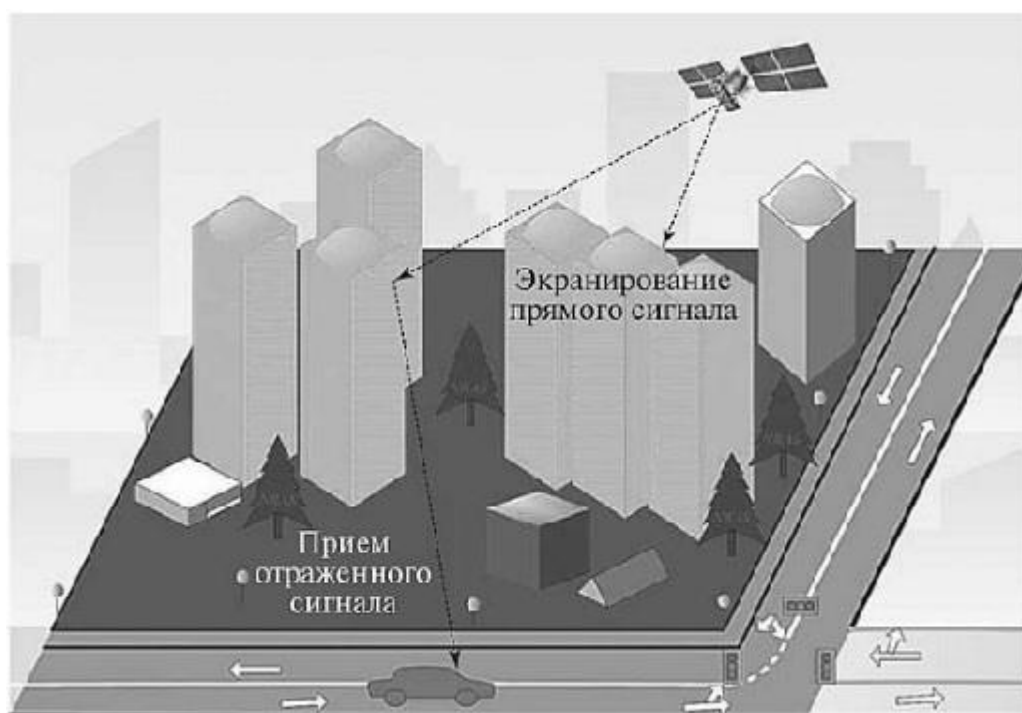


Рисунок 1.4. - Прием отраженного сигнала от навигационного спутника [37]

В современных приемниках применяется усовершенствованная техника обработки сигналов и специальные антенны для сведения к минимуму "захвата" отраженного сигнала. Следует учесть, что погрешности от источников, которые пор обсуждались выше, суммируются.

Геометрия расположения спутников. Погрешность определения координат приемника СНС зависит от взаимного геометрического взаимного расположения приемника и спутников, используемых при расчете определения местоположения.

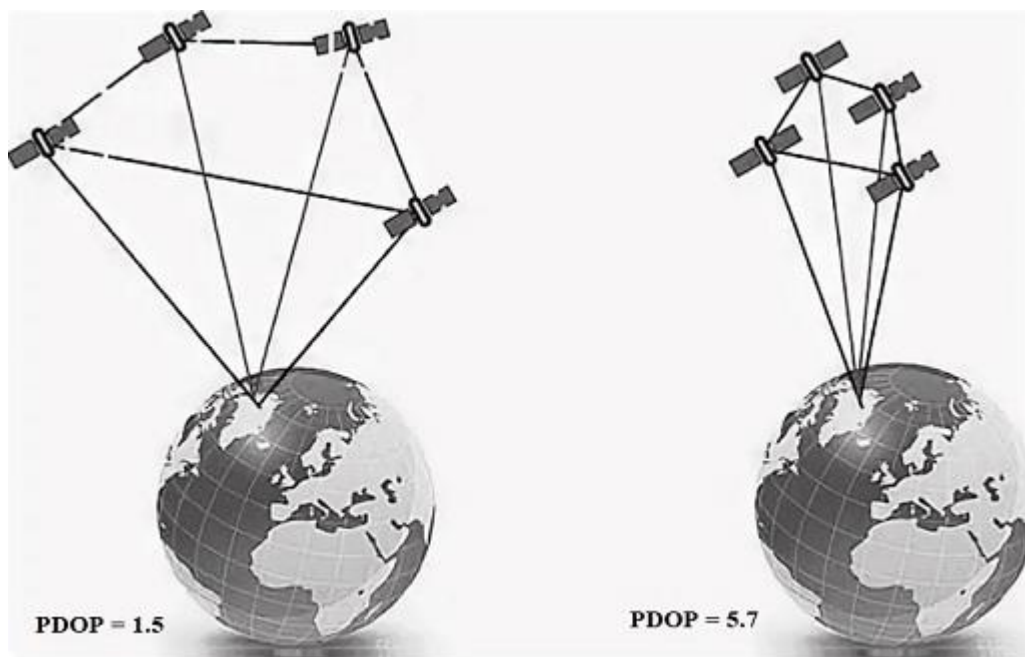


Рисунок 1.5. - Геометрия спутниковой группировки и PDOP [37]

Оптимальным для проведения измерений является такое расположение спутников, когда углы между направлениями на них велики, рис. 1.5.

Для определения спутников, измерение псевдорасстояния до которых даст наименьшую ошибку определения местоположения, приемник СНС реализует алгоритм анализа взаимного положения всех доступных для наблюдения спутников и выбирает четыре из них в наилучшем положении. В том случае, когда спутники расположены так, что направления на них близки, определение координат может быть невозможно. Существуют следующие варианты геометрического фактора понижения точности DOP (Dilution of Precision) [110]:

- HDOP (Horizontal Dilution of Precision) - горизонтальный DOP (положение на плоскости) определяет влияние геометрии созвездия на определение ошибки в горизонтальной плоскости.

- VDOP (Vertical Dilution of Precision) - вертикальный DOP (по высоте), определяет влияние геометрии созвездия на определение погрешности по высоте;

- PDOP (Position Dilution of Precision) - позиционный DOP (позиция в 3D пространстве), определяет влияние геометрии спутниковой группировки на определение пространственной ошибки;

- TDOP (Time Dilution of Precision) - фактор влияния отклонения времени в

навигационном решении на определение положения в 3D пространстве - определяет влияние геометрии созвездия на определение погрешности коррекции в бортовой шкале времени.

Наилучшее положение спутника соответствует PDOP < 1; большие значения PDOP говорят о плохой геометрии спутников. PDOP используется как множитель для других ошибок.

Приемники СНС представляют информацию об оценке точности определения положения с использованием PDOP по-разному. В частности, может использоваться качественная оценка в баллах. Другие приемники отображают EPE (Estimated Position Error — ожидаемую ошибку позиции) непосредственно в единицах измерения расстояния. EPE учитывает взаимное расположение спутников и прогноз ошибок сигналов для каждого спутника в зависимости от состояния атмосферы, ошибок спутниковых часов, передаваемых в составе эфемеридной информации. Зависимость качества навигационного решения от величины DOP представлена в таблице 1.2.

Таблица 1.2.

Зависимость качества навигационного решения от значения DOP [21, 97]

Значение PDOP	Точность	Описание
<1	Идеальная	Рекомендуется к использованию в навигационных системах, требующих максимально возможной точности во время их работы
2-3	Отличная	Достаточная точность для использования результатов измерений в чувствительной аппаратуре и программах
4-6	Хорошая	Рекомендуемый минимум для принятия решений по полученным результатам. Результаты могут быть использованы для достаточно точных навигационных указаний
7-8	Средняя	Результаты можно использовать в

		вычислениях, однако рекомендуется повысить точности, например, изменением положения приемника
9-20	Ниже среднего	Результаты могут использоваться только для грубого приближения местоположения
21-50	Плохая	Очень низкая точность. Обычно такие результаты должны быть отброшены

Типичная точность определения координат навигационными приемниками СНС в горизонтальной плоскости составляет примерно 1—2 м (при условии достаточного количества спутников). Точность определения высоты над уровнем моря обычно в 2—5 раз ниже, чем точность определения координат в тех же условиях (т.е. в условиях близких к идеальным 2—10 м).

Основным фактором, влияющим на снижение точности позиционирования, является неполная видимость спутников. Особенно это заметно при расположении приемника в городских районах с высотной застройкой, когда значительная часть неба закрыта близлежащими зданиями или другими препятствиями, рис. 1.4. При этом точность определения координат может упасть до 20-30 м, а иногда и больше. Препятствия не пропускают сигналы от части спутников, которые в принципе доступны в данной геометрической точке. Это приводит к тому, что расчеты выполняются на меньшем количестве сигналов от спутников, находящихся в основном в одном секторе неба. Погрешность решения при этом обычно лежит в плоскости, перпендикулярной препятствию.

Накопленные статистические данные эксплуатации СНС показывают следующие результаты:

- точность определения координат при нахождении приемника СНС на открытой местности составляет 1—2 м;
- при перемещении приемника по узким улицам, особенно когда вдоль них имеются близко расположенные дома, погрешность составит 4—10 м;
- при нахождении приемника в «дворовых колодцах», близко к

высотным домам и т.п., погрешность увеличивается до 20—30 м.

Аппартурные погрешности приемника СНС зависят от характеристик антенно-фидерного тракта, приемника, корреляторов и других составляющих. В высококачественной аппаратуре потребителя порядок этих величин определяется единицами метров.

Таким образом, эффективность использования СНС для управления наземным мобильным роботом определяется большим числом влияющих факторов. В основном они определяются доступностью спутников для проведения точных измерений псевдодальности. Любые изменения доступности спутников – малое число доступных для измерения спутников, плохая геометрия их расположения, «захват» при измерениях отраженных сигналов вместо сигналов со спутников, делают решение навигационной задачи либо невозможным, либо снижают точность решения настолько, что оно не может быть использовано для управления роботом.

Указанные факторы влияют на показатели целостности и доступности данных СНС.

Целостность – мера доверия, которая может быть отнесена к правильности информации, выдаваемой системой СНС в целом. С практической точки зрения целостность включает в себя способность системы обеспечить пользователя своевременными и обоснованными предупреждениями, когда она не в состоянии удовлетворить требованиям к заданной точности [94].

Доступность навигационной системы это способность системы обеспечивать требуемые функции и характеристики при проведении намеченной операции. Доступность является функцией физических характеристик окружающей среды и технических возможностей приемника СНС.

Хотя средства системы управления космическим сегментом сами по себе предусматривают обеспечение целостности задач навигации, они являются недостаточными, поскольку различные критические сочетания влияющих на погрешности факторов могут быть не выявлены в течение достаточно длительного периода.

Учитывая важность обеспечения целостности и доступности навигационных данных, особенно при использовании для управления мобильными объектами, разрабатываются и применяются различные методы контроля за целостностью навигационных данных СНС

1.3. Методы контроля целостности навигационных данных СНС

Таким образом, задача глобальной навигации с требуемой точностью является достаточно сложной, но она может быть решена при помощи СНС. Как было указано основными преимуществами использования СНС являются достаточно высокая точность определения координат (в режимах работы при малом количестве отрицательно влияющих на результаты измерения факторов), небольшое время готовности устройства, отсутствие накопления погрешностей, простота использования и относительная дешевизна бортового приемника СНС [10, 117].

Но 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. В этих случаях происходит нарушение целостности навигационных данных, что может существенно влиять на точность управления.

Для контроля целостности навигационных данных необходимо решить задачу обнаружения информационного отказа приемника СНС. Информационным отказом приемника СНС, как устройства, определяющего навигационные параметры для системы управления мобильным роботом, является то, что один из параметров определяется с погрешностью, превышающей допустимую, определяемую эксплуатационными требованиями, или параметр вообще не определяется [51]. Факторы, вызывающие возникновение информационных отказов у СНС разнообразны и рассмотрены выше. Важным свойством информационного отказа является то, что после него система либо самовосстанавливается, либо для ее восстановления достаточно корректировки внутренней информации и не требуется замена элементов.

Целью контроля приемника СНС является определение информационного отказа, заключающегося в нарушении целостности навигационных данных (возрастание погрешности решения выше допустимой по условиям применения, либо в невозможность нахождения решения навигационной задачи).

Все методы контроля целостности навигационных данных СНС делятся на два больших класса – внешние и внутренние (автономные) [118].

В наиболее ответственных применениях, например, в авиации, для контроля целостности навигационных данных реализуют так называемые функциональные дополнения СНС – внешние методы контроля, когда контроль проводится либо на главной станции управления СНС, либо на специализированной контрольно-корректирующей станции. Процедура внешнего контроля достаточно сложна и реализуется использованием дополнительной космической или наземной сети станций [87]. Однако, такое решение задачи целостности позволяет получить более полную информацию о системе, которой принципиально не может располагать отдельный потребитель при автономной работе.

Внутренние (автономные) методы предполагают использование избыточной информации навигационных приемников СНС [57], которую они получают, принимая сигналы от большего, чем минимально необходимо, числа спутников либо от дополнительных навигационных устройств. С помощью специальных алгоритмов обнаруживается и/или идентифицируется источник неправильной информации. При обнаружении неправильной информации производится полная или частичная отбраковка полученных решений навигационных задач.

Для оценки применимости указанных методов контроля целостности навигационных данных СНС в системах управления мобильными роботами проанализируем их реализацию и особенности применения.

Внешние методы контроля строятся с использованием дополнительных наземных или космических систем.

При реализации наземного функционального дополнения СНС на земле размещаются специальные контрольно-корректирующие станции (GBAS, Ground Based Augmentation System) с которых пользователь получает дополнительную

информацию, повышающую навигационную надежность данных СНС [91, 109]. На контрольно-корректирующих станциях рассчитываются корректирующие поправки для повышения точности навигации, а также контроля целостности и повышения достоверности навигационных определений.

Аналогичную функцию могут выполнять специальные спутники связи на геостационарных орбитах (SBAS, Space Based Augmentation Systems) [115].

С точки зрения использования SBAS и GBAS различаются не только методами получения и доставки корректирующей информации, но и размерами зон покрытия систем. GBAS — локальная система, работающая преимущественно в диапазоне до 50...100 км от точки размещения станции. Поэтому наземные GBAS располагают в районе аэропортов для обеспечения возможности отслеживания и контроля движущиеся объекты [9].

Зона покрытия космической SBAS несколько тысяч километров.

Внутренние (автономные) методы контроля целостности навигационных данных СНС подразделяются на две группы.

- Методы автономного контроля целостности в приемнике (RAIM - Receiver Autonomous Integrity Monitoring) [4, 13, 16, 17]. Они используют методы оценки [33], методы максимальной разности решений [3], сравнения диапазонов [20], невязки по методу наименьших квадратов [13], методы фильтрации [1, 5] и используют избыточность информации СНС при наблюдении пяти и более спутников.

– Методы бортового автономного мониторинга целостности (AAIM - Aircraft Autonomous Integrity Monitoring) [71]. Эти методы основаны на получении избыточной информации от других датчиков и систем, находящихся на объекте в составе навигационной системы (барометрического высотомера [2, 55, 56, 118], инерциальной навигационной системы; радиосистем ближней навигации, радиосистем дальней навигации и т.п.).

Алгоритмы RAIM решают две задачи: обнаружение ошибок FD (Failure Detection) и устранение аномальных измерений FI (Failure Identification) из навигационного решения.

Основные функции RAIM следующие [72]:

- вычислять текущую погрешность определения координат и сравнивать вычисленное значение с максимально допустимым для объекта и предупреждать о выходе вычисленной ошибки за допустимые пределы;
- оперативно обнаруживать нестабильно доступный спутник и исключать его из обработки для навигационных вычислений;
- определять геометрию спутников в заданной точке в заданное время и предупреждать о том, что требуемая точность и надежность навигации по СНС не обеспечены или выдавать сообщение о выходе из строя СНС в целом и невозможности использования ее для навигации.

Реализация этой функции достигается обработкой сигналов хотя бы одного дополнительного спутника. Для целей RAIM проводится несколько независимых измерений и их результаты сравниваются. По результатам расчетов определяются четыре стабильно работающих спутника и по данным этих спутников определяются навигационные параметры. Если доступны менее пяти спутников, то функция RAIM не реализуема.

Недостатками использования методов, основанных на внешней по отношению к приемнику информации, для контроля целостности СНС являются:

- отсутствие автономности использования и несвоевременность оповещения потребителя о недоступности одного или нескольких спутников;
- дополнительные затраты на организацию канала оповещения;
- ограниченная работа систем дифференциальной коррекции и необходимость создания дополнительного специализированного канала связи контрольной станции с потребителями;
- отсутствие возможности контроля работоспособности приемника СНС.

Алгоритм AAIM контролирует целостность информации, полученной от СНС, путем сравнения ее с навигационной информацией, полученной от других навигационных систем (обычно БИНС). Этот метод имеет только одно преимущество по сравнению с RAIM – нет необходимости обрабатывать сигналы от дополнительного спутника, что позволяет продолжать навигационные

определения с гарантией их достоверности, когда доступны только четыре спутника.

Методы контроля целостности, основанные на получении избыточной информации от других датчиков и систем, входящих в состав навигационной системы на объекте, также имеют недостатки, связанные со спецификой работы навигационных устройств (зависимость их показаний от погодных условий, ограниченность области применения) и с использованием методов дополнительной обработки информации при синтезе алгоритмов управления. Алгоритмы управления, основанные на методах вторичной обработки, не позволяют определить причину отсутствия данных на входе приемника СНС и факт отказа спутника, но способны определить факт отказа приемника СНС.

Разработанные в настоящее время для повышения точности, надежности и целостности навигационного обеспечения алгоритмы оптимальной комплексной первичной обработки навигационных сигналов, которые позволяют одновременно решать задачу различения сигналов на входе приемных устройств и оценивания параметров этих сигналов по сути очень близки к методам комплексирования навигационной информации и имеют аналогичные недостатки.

Как показал проведенный выше анализ, при движении мобильного наземного робота в городской местности характерна ситуация, когда большинство измерений искажены многолучевым распространением сигнала, а дополнительные спутники не доступны. Поэтому дополнительной навигационной информации для обнаружения искаженных измерений чаще всего нет.

Анализ функциональных дополнений СНС, а также основных методов определения достоверности навигационных данных показывает, что для мобильных роботов наиболее приемлемым является использование методов, которые позволяют автономно контролировать целостность навигационных данных – методов контроля целостности RAIM.

Движение наземного робота при выполнении функциональной задачи является, как правило, недетерминированным процессом. В структуре системы управления роботом обычно присутствуют устройства, которые обеспечивают

оценку складывающейся ситуации и изменение параметров и траектории движения.

Задача управления плоским движением наземного робота имеет ту особенность, что в процессе выполнения функций робот может неоднократно останавливаться на неопределенное время в разных, заранее неизвестных точках траектории, и затем продолжать движение. Такие остановки могут привести к тому, что при использовании известных автономных алгоритмических методов оценки навигационных данных может быть сформирован ложный сигнал об их недостоверности. При разработке алгоритмов оценки целостности навигационных данных необходимо учитывать указанные особенности движения наземных роботов. Кроме того, необходимо рассмотреть возможные варианты управления движением робота при обнаружении недостоверности данных СНС.

1.4. Общая схема контроля приемника СНС в системе управления наземного робота и оценка информационной надежности ее работы

Для контроля информационных отказов приемника СНС требуется, во-первых, установить сам факт отказа, во-вторых, изменить алгоритм работы системы управления так, чтобы отказ наименьшим образом влияла на результат функционирования робота.

Для корректного обнаружения недостоверности навигационных данных СНС необходимо учитывать дополнительную информацию о параметрах движения мобильного робота. Для решения задачи оценки достоверности навигационных данных, получаемых приемником СНС в системе управления наземным мобильным роботом, предлагается использовать методы обнаружения неисправностей на основе уравнений соответствия [7, 59].

Так же для решения данной задачи могут быть использованы методы прогнозирования состояния технически сложных объектов, например, те, которые используются для прогнозирования литеральных (потенциально аварийных) ситуаций [105, 106]. Основаны такие методы, в основном, на выявлении нестабильностей коротких временных рядов. В данном применении таким рядом

могут быть либо координаты робота, получаемые приемником СНС, либо значения его других параметров (скорости движения, характеристик траектории и т.п.).

Как методы обнаружения ошибок на основе уравнений соответствия, так и методы на основе выявления нестабильностей коротких временных рядов относятся к решениям, использующим модель объекта управления, в данном случае модель мобильного робота.

На рис. 1.6 предложена базовая схема реализации автономного контроля информационных отказов приемника СНС в системе управления наземного робота.

Наиболее сложной частью при реализации данных методов является определение признаков информационных отказов S , рис.1.6, и обнаружения по ним факта отказа.

Так же необходимо определить как оценивать качество функционирования наземного мобильного робота при возникновении информационных отказов приемника СНС.

Качество функционирования наземного мобильного робота зависит от большого ряда факторов, таких как точность и быстродействие системы управления, соотношение полезных сигналов и помех (помехоустойчивость), внешние условия и воздействия, схемотехническая надежность, параметры окружающей среды, продолжительность работы, масса, габариты, потребляемая мощность, простота или сложность конструкции, условия обслуживания и т.д.

Для удобства использования различные факторы разбиваются на группы, отражающие эффективность и надежность функционирования. При этом выделяются и группируются показатели эффективности, посредством которых оценивается информационная, конструктивная и эксплуатационная эффективность.

Аналогично группируются показатели надежности, которыми оценивается информационная, конструктивная и эксплуатационная надежность.

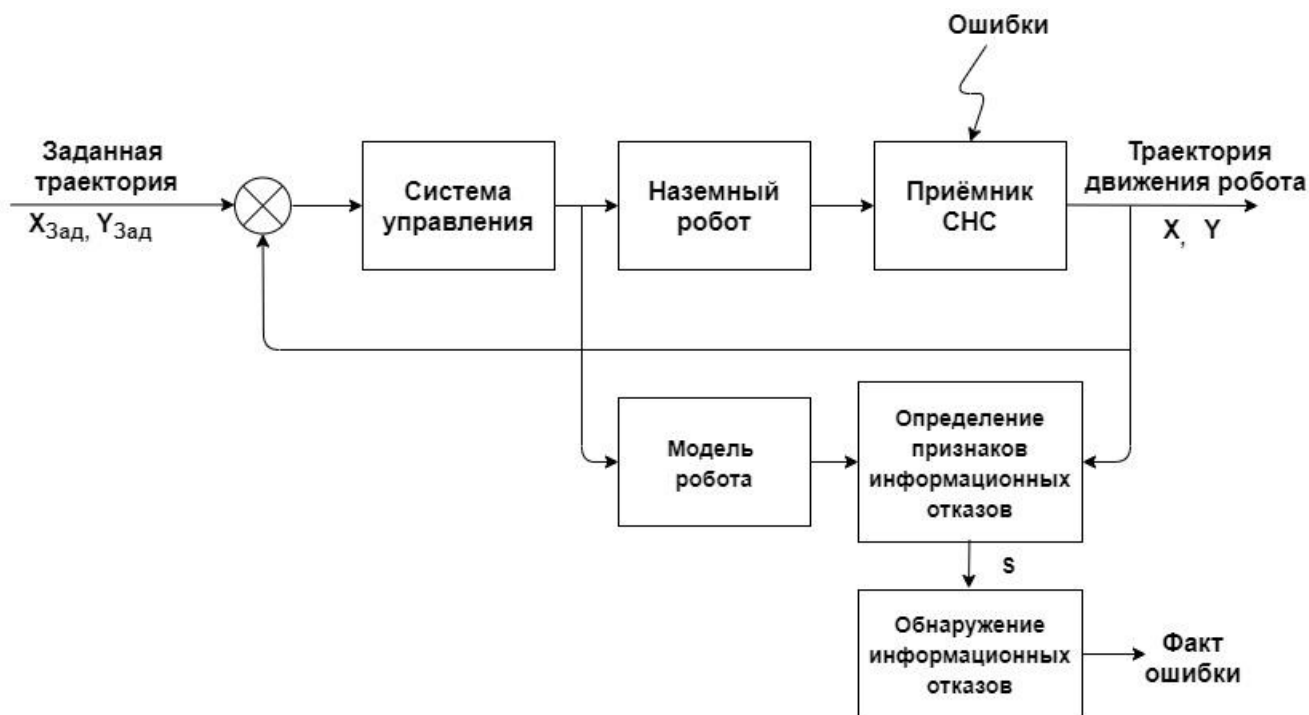


Рисунок 1.6. - Общая схема автономного контроля информационных отказов приемника СНС в системе управления наземного робота

Конструктивная (схемотехническая) надежность определяется безотказной работой элементов робота (в том числе и приемника СНС) в заданном интервале времени при заданных внешних условиях при условии отсутствия помех и ошибок. Учитывая приведенные выше особенности работы приемника СНС, характеризующиеся как раз наличием помех и ошибок, для оценки надежности работы системы управления мобильным роботом, в состав которой входит приемник СНС, больше подходит информационная надежность. Информационная надежность определяется как способность алгоритма функционирования системы правильно выполнять свои функции при различных ошибках в исходных данных [39, 107].

При этом информационная надежность связана с другими показателями эффективности и надежности следующим образом [132]:

- повышение информационной надежности за счет многократных измерений и их вычислительной обработки приводит к снижению информационной эффективности вследствие дополнительных затрат времени;

- повышение информационной надежности за счет дополнительных технических средств для обнаружения и устранения ошибок элементов системы приводит к снижению конструктивной надежности вследствие усложнения аппаратуры

- повышение информационной надежности за счет дополнительных технических средств для обнаружения и устранения ошибок элементов системы приводит к снижению конструктивной эффективности вследствие усложнения аппаратуры.

Информационная надежность в общем случае представляет собой многомерный вектор $W_{ин}$, зависящий от входного потока данных X и от параметров системы Q :

$$W_{ин} = F(\alpha(X, Q)), \quad (1.3)$$

где α – частный параметрический показатель, F – некоторый функционал, объединяющий частные показатели.

В качестве частных показателей информационной надежности могут быть использованы следующие [132]:

- потенциальная помехоустойчивость, определяемая соотношением пороговых значений полезных сигналов и помех;

- информационный показатель, вычисляемый через соотношение энтропии входного сигнала и условной энтропии, характеризующей интенсивность помех, действующих в процессе работы на систему;

- вероятностный показатель погрешности – вероятность того, что погрешность в ходе функционирования системы не превысит заданной.

Вероятностный показатель погрешности равен:

$$\beta(\delta) = 1 - \Phi\left(\frac{\delta_{тз} - \delta_{ср}}{\delta_{ср.кв.}}\right), \quad (1.4)$$

где Φ – функция, выражаемая через интеграл вероятности, $\delta_{тз}$ – погрешность системы по техническому заданию, $\delta_{ср}$ и $\delta_{ср.кв.}$ – средняя и среднеквадратическая погрешность.

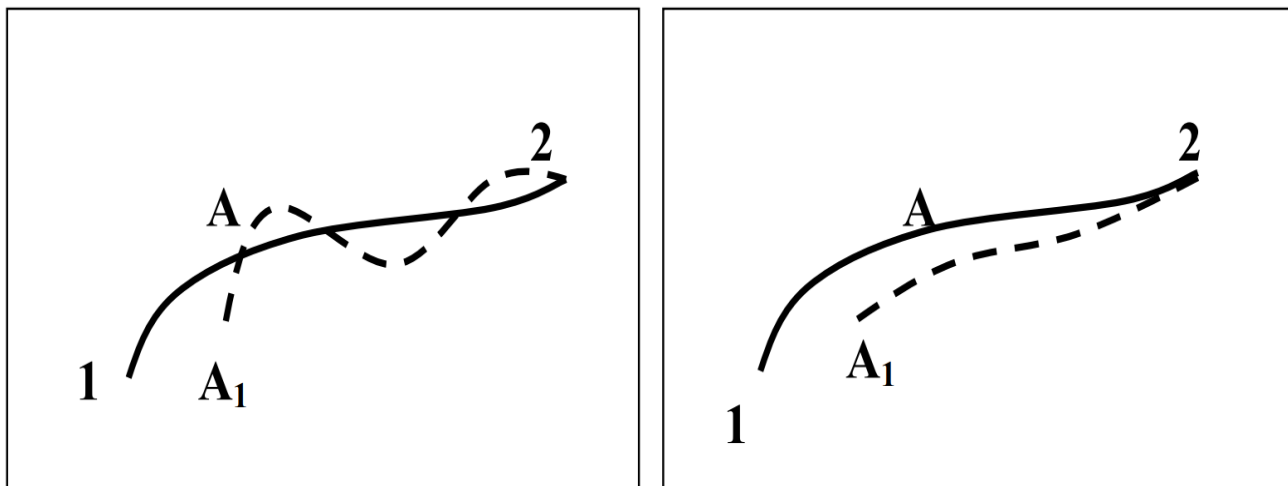
В работе [51], посвященной рассмотрению вопросов информационной надежности, контроля и диагностики навигационных систем показано, что показателем информационной надежности (надежности по информационным отказам, ошибкам и сбоям) является точность системы, с учетом того, что она включает в свой состав средства для парирования информационных отказов, основанные на структурной, информационной и алгоритмической избыточности, а также средства контроля и диагностики информационных отказов и ошибок.

При возникновении информационного отказа навигационной системы практический интерес представляет задача парирования (или сведения к минимуму) влияния его последствий на функционирование мобильного подвижного робота, а в рассматриваемом случае на управление роботом (минимизация погрешностей следования роботом по заданной траектории). Как показано в работе [78] в случае возникновения в системе управления динамическим объектом различных отказов эффективными являются стратегии управления, основанные на использовании методов терминального решения.

При постановке задачи терминального управления могут быть учтены отказы четырех типов: обрывы в цепи каналов измерения или в цепи исполнения управляющих команд, вызывающие исчезновение соответствующих сигналов; отказы, в результате которых появляются ложные сигналы в тех же каналах; отказы в объекте управления, вызывающие скачкообразные изменения его состояния в момент отказа; внезапные отказы или сбои в работе канала формирования управления, например, БЦВМ, приводящие к невыполнению или ошибочному выполнению части алгоритма управления [78].

Очевидно, что информационный отказ приемника СНС вызывает в системе управления мобильным роботом последствия схожие с указанными отказами. Использование терминального управления для минимизации последствий такого отказа предполагает, что жесткие требования по точности управления предъявляются только к конечной (терминальной) точке, а для формирования оставшейся части траектории допускается определенная вариативность. Поэтому в ситуации, когда происходит отклонение объекта от заданной траектории, не

стабилизируют объект управления на ней, а в каждой текущей точке строят новую программу управления, которая в итоге должна удовлетворить терминальные условия [76]. Возможные при этом траектории движения схематично показаны на рис. 1.7.



а) движение при стабилизации робота на всей заданной траектории

б) движение робота при терминальном управлении (при снятии ограничений на стабилизацию на всей заданной траектории)

Рисунок 1.7. - Возможные варианты движения робота по заданной траектории

Такой подход оказывается достаточно эффективным, когда по условиям эксплуатации нет жестких ограничений на отклонение от заданной траектории движения управляемого объекта каждой ее точке. Это справедливо только для некоторых классов объектов управления, например, в авиационной и ракетно-космической технике, при управлении химическими реакторами циклического действия, при синхронизации опорожнения баков и т.п. [78, 90, 98, 124].

При движении наземного мобильного робота, как правило, ограничения на порешность движения по заданной траектории снять нельзя. Тем более при эксплуатации в условиях плотной городской застройки и на местности со сложным рельефом. Поэтому, при возникновении информационных отказов закон управления должен обеспечивать точное выполнение терминальных условий и

максимально возможную в сложившихся условиях близость траектории движения к исходной заданной. В этом случае при реализации терминального управления оптимальным является сохранение управление с обратной связью [76], а отсутствующая по причине отказа в канале информация замещается значениями вычисленными либо по полному уравнению динамики объекта, либо по дискретно-разностному уравнению, описывающему динамику объекта [78].

Таким образом, об информационной надежности системы управления мобильным роботом с приемником СНС (как в прочем и с любой другой навигационной системой) можно судить, например, по величине погрешностей следования роботом по заданной траектории при возникновении информационного отказа при определении навигационных данных. Чем меньше данные погрешности при одних и тех же параметрах информационного отказа приемника СНС, тем более информационно надежной является система управления. При этом, как уже отмечалось выше, информационной надежности системы управления роботом следует добиваться с учетом таких технических ограничений, как энергопотребление, стоимость, габариты, сложность получаемого технического решения.

1.5. Результаты и выводы

1. В настоящее время реализация ни одного из отдельно взятых принципов измерения навигационных параметров движущегося объекта (координаты и положение в пространстве, линейная скорость и ускорение) не способна обеспечить высокую информационную надежность системы управления движением объекта. Для повышения информационной надежности системы управления используются совмещение функций различных навигационных систем, приводящее к появлению многофункциональных интегрированных комплексов и объединению технических средств, измеряющих одни и те же или функционально связанные навигационные параметры, комплексная (совместная) обработка информации и взаимная информационная поддержка нескольких устройств или систем.

2. Сложность комплексных систем навигации является существенным ограничением для их реализации и использования в системах управления мобильными наземными роботами, так как вычислительные мощности их ограничены, а их существенное наращивание приводит к росту энергопотребления сокращая время автономной работы, кроме того ухудшаются ее стоимостные и габаритные характеристики, в целом возрастает сложность системы.

3. Спутниковая навигация технически является 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, имеют достаточно высокую точность, но подвержены помехам и потере сигнала.

При этом 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 существенно влияет на точность управления.

4. Для контроля целостности навигационных данных в наземных мобильных роботах наиболее подходят автономные методы. Один из которых – метод бортового мониторинга целостности (ААІМ - Aircraft Autonomous Integrity Monitoring) основанный на получении избыточной информации от других датчиков и систем, имеющихся на объекте в составе навигационной системы, при реализации на мобильном роботе 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.

5. Предложена общая схема автономного контроля информационного отказа приемника СНС в системе управления наземного робота, приводящего к нарушению целостности навигационных данных. В схеме для формирования оценки целостности навигационных данных 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.

6. Рассмотрено свойство информационной надежности системы управления, которое определяется как способность алгоритма функционирования системы правильно выполнять свои функции при различных ошибках в исходных данных. Установлено, что характеристикой информационной надежности является погрешность системы функционирования системы при возникновении в исходных данных различных ошибок.

ГЛАВА 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАЗЕМНОГО РОБОТА С СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ ПРИЕМНИКА СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

2.1. Разработка модели наземного робота

В качестве инструмента для проведения исследований и разработки алгоритмов обнаружения информационных отказов приемника СНС предлагается использовать модель наземного мобильного робота с системой управления. Такая модель позволит:

- реализовать логику работы системы управления, использующей приемник СНС, с учетом особенностей кинематики робота и динамики его приводов;
- задавать движение робота по требуемым для исследования траекториям (функционально заданным или произвольным);
- моделировать 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;
- оценивать информационную надежность системы управления движением наземного робота.

Для решения поставленных задач полная модель наземного мобильного робота должна учитывать особенности кинематики самого робота, динамику его приводов, формирование координат робота спутниковой навигационной системой с выделением той части алгоритма, которая реализуется в приемнике СНС. Модель

системы управления должна обеспечивать корректную обработку движения робота по траекториям различного вида. Для обеспечения возможности внесения изменений и дополнений при исследовании алгоритмов повышения информационной надежности модель должна быть модульной.

2.1.1 Кинематическая модель мобильного робота

Объектом управления в рассматриваемой системе является наземный робот. Наиболее простой является схема робота с двумя независимыми активными колесами, оси которых лежат на одной прямой [28, 50, 64, 80]. Колеса представляют собой два абсолютно твердых диска, находящихся на осях, лежащих на одной прямой. Колеса управляются независимыми электродвигателями. Оси колес жестко прикреплены к корпусу - абсолютно твердому телу, которое может двигаться плоскопараллельно. Эта "тележка" движется по шероховатой плоскости, колеса в точках касания с плоскостью не проскальзывают. Модель рассматриваемого робота приведена на рис. 2.1 [80].

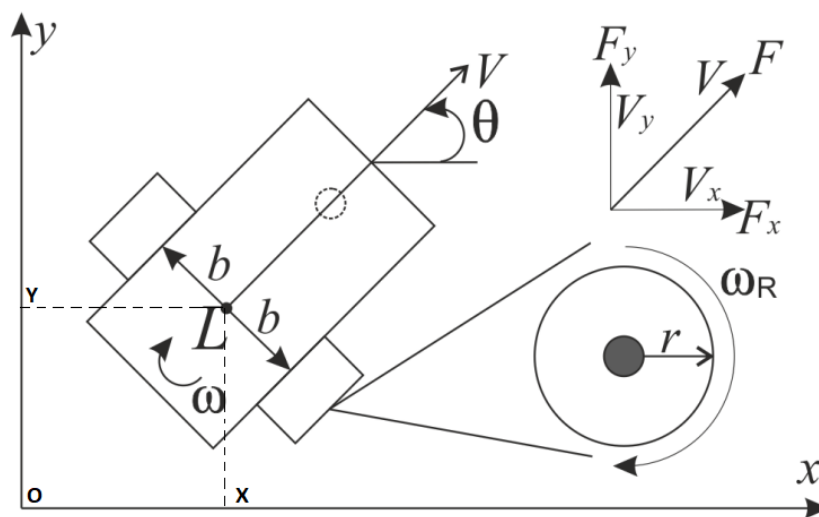


Рисунок 2.1. - Кинематическая схема робота с двумя колесами [75]

На рисунке 2.1 координаты X и Y - положение центра оси робота по отношению к глобальной системе координат OXY , θ - направление движения мобильного робота относительно оси OX . Переменная r - радиус колес робота, а $2b$

(L) расстояние между колесами. V и ω - линейная и угловая скорости, соответственно, а ω_L - скорость вращения левого колеса, ω_R - скорость вращения правого колеса. И, наконец, F - линейная сила, перемещающая робот, F_x , F_y - проекции силы перемещения робота на оси OX и OY, соответственно.

Из рис. 2.1 видно, что этот тип робота имеет три позиционных степени свободы - X , Y , θ . Тем не менее, мобильный робот может перемещаться только в двух направлениях из-за неголономного ограничения. Это ограничение существует в связи с тем, что робот не может иметь скорость перпендикулярную направлению оси его движения. Таким образом, робот способен двигаться со скоростью V вдоль направления движения колес и вращаться с угловой скоростью ω , но не может иметь скорость перпендикулярную скорости движения V . Без учета проскальзывания можно получить следующую математическую модель для неголономного робота [75, 81]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= V \cos(\theta) \\ \dot{y} &= V \sin(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

где \dot{X} , \dot{Y} - соответствующие скорости робота по осям системы координат OXY

Следовательно,

$$\left. \begin{aligned} \frac{\dot{x}}{\cos(\theta)} &= \frac{\dot{y}}{\sin(\theta)} \\ \dot{x} \sin(\theta) &= \dot{y} \cos(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Из сказанного, кинематическая модель робота будет следующей:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V \\ \omega \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Используя такую модель в дальнейшем, можно тестировать движение по различным траекториям. Схематично разрабатываемую модель робота, как неголономного объекта управления, можно представить в следующем виде, рис. 2.2 [71].

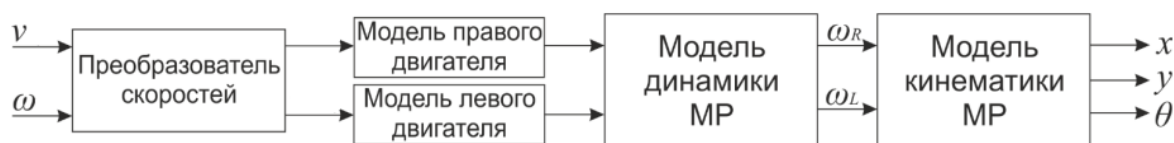


Рисунок 2.2. - Структура модели мобильного робота (МР)

Модель на основе формул (2.3), реализованная в среде Simulink пакета MatLab будет иметь вид, представленный на рис. 2.3 [122].

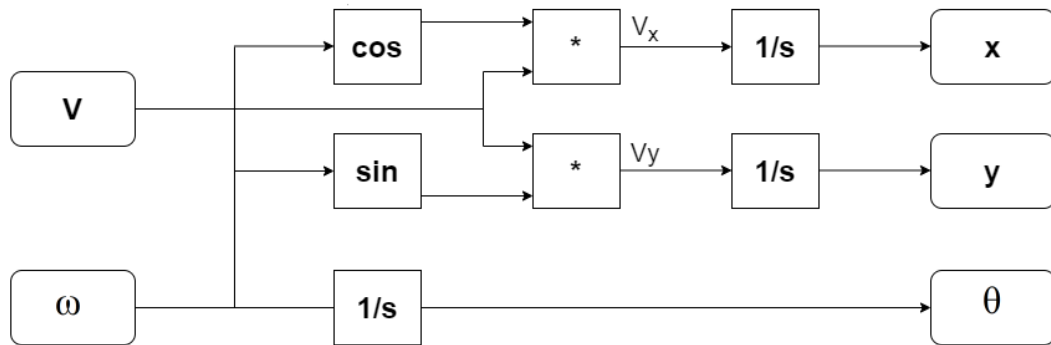


Рисунок 2.3. - Кинематическая модель мобильного робота с управлением по продольной и угловой скоростям

Продольная V и угловая ω скорости робота не всегда доступны для измерения. На практике проще измерить скорости вращения каждого из колес (ω_L и ω_R) с использованием различных датчиков, устанавливаемых непосредственно на колесе, а взаимосвязь между линейной и угловой скоростью и скоростями каждого из колес можно выразить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} V &= \frac{(\omega_L + \omega_R)r}{2} \\ \omega &= \frac{(\omega_L - \omega_R)r}{L} \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Путем преобразований, также получим зависимость угловых скоростей вращения колес от продольной и угловой скорости мобильного робота:

$$\left. \begin{aligned} \omega_R &= \frac{1}{r} \left(V + \frac{\omega L}{2} \right) \\ \omega_L &= \frac{1}{r} \left(V - \frac{\omega L}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Подставив уравнения с линейной и угловой скоростями (2.8) в выражение (2.3) получим следующую математическую модель робота:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{r}{2} \cos(\theta) & \frac{r}{2} r \cos(\theta) \\ \frac{r}{2} r \sin(\theta) & \frac{r}{2} r \sin(\theta) \\ -\frac{r}{L} & -\frac{r}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_L \\ \omega_R \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Опираясь на полученную кинематическую модель, можно сделать вывод, что положение и направление движения двухколесного робота зависят только от скорости вращения левого и правого колес. Следующим шагом необходимо реализовать данную модель в среде Simulink пакета MatLab [122].

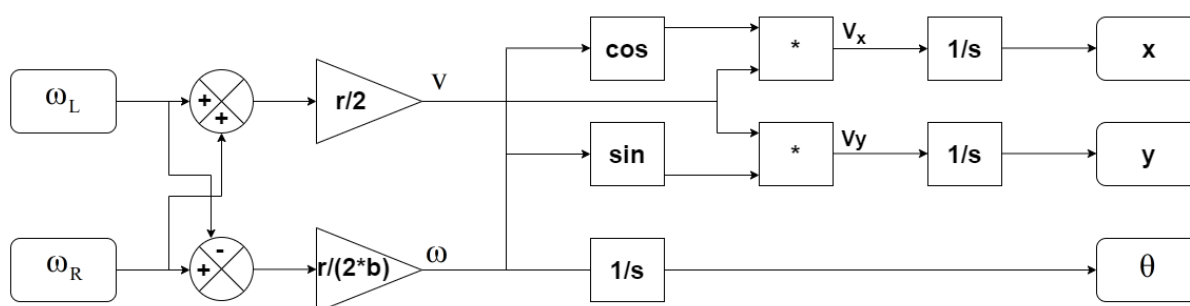


Рисунок 2.4.- Кинематическая модель с управлением угловыми скоростями колес робота

2.1.2. Динамическая модель наземного робота

Входные и выходные параметры кинематической модели не учитывают параметры динамики системы [95, 110]. Для дальнейшего исследования необходимо получить динамическую модель робота.

Существует два метода построения динамической модели:

- Использование уравнений Лагранжа, описывающих систему с точки зрения работ и энергии. Данный метод имеет наиболее систематический характер и автоматически устраняет неиспользуемые силы.

- Использование уравнений Ньютона-Эйлера, описывающих систему с точки зрения всех сил и моментов, действующих на систему. Данный метод является прямой интерпретацией второго закона Ньютона [75].

Пусть J - момент инерции вокруг центральной вертикальной оси, а m - масса мобильного робота с дифференциальными приводами. На основе уравнений

Лагранжа его математическая модель будет иметь вид:

$$\begin{pmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & J \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -mV_y\omega \\ mV_x\omega \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ M_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F \\ M_\theta \end{pmatrix}, \quad (2.7)$$

где \ddot{x}, \ddot{y} - соответствующие ускорения робота по осям глобальной системы координат OXY; F и M_θ - линейная сила перемещения и угловой момент вращения подвижного робота, соответственно. Робот находится в инерциальной системе отсчета, кроме того, учитывается сила Кориолиса и центростремительное ускорение $mV_x\omega, mV_y\omega$, которые влияют на робота, при его поворотах [12]. Данную математическую модель можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} - mV_y\omega &= F_x \\ m\ddot{y} + mV_x\omega &= F_y \\ J \frac{d\omega}{dt} &= M_\theta \end{aligned} \right\}, \quad (2.8)$$

где, $F_x = F\cos\theta, F_y = F\sin\theta; V_x = V\cos\theta, V_y = V\sin\theta; V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}, M_\theta = L(F_R - F_L)$.

Отношения между линейной скоростью, угловой скоростью и обобщенной скоростью представлены ниже:

$$\left. \begin{aligned} v &= \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \\ \omega &= \dot{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Полученную выше модель можно приставить в более привычном виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= v\cos\theta; \dot{y} = v\sin\theta \\ \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{v} &= \frac{1}{m} F - F_c \\ \dot{\omega} &= \frac{1}{J} (M_0 - M_c) \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Так как в данной модели учитывается сила Кориолиса, действующая на робот при поворотах, то представим полученное выше уравнение в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{1}{m} (F_x + mV_y \omega) \\ \ddot{y} &= \frac{1}{m} (F_y - mV_x \omega) \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

По аналогии с кинематической моделью, выразим угловой крутящий момент M_θ и продольную силу F , которые связаны с крутящим моментом каждого колеса, следующими уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} F &= \frac{1}{r} (M_R + M_L) \\ M_\theta &= L(F_R - F_L) = \frac{L}{r} (M_R - M_L) \end{aligned} \right\}, \quad (2.12)$$

где $M_R = F_R r$ и $M_L = F_L r$, обозначают соответственно правый и левый крутящие моменты; F_R и F_L - соответственно правая и левая продольная силы F .

При управлении роботом требуемые крутящие моменты и скорости колес задаются их двигателями. Двигатели также имеют собственную внутреннюю динамику и не могут мгновенно реализовать команду управления (скачком изменить скорость вращения колеса). Модель вычисления угловых скоростей колес будет иметь вид, представленный на рис. 2.5.

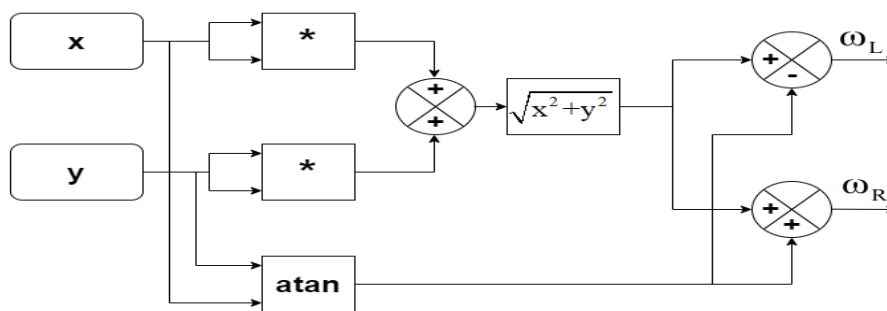


Рисунок 2.5. - Модель вычисления угловых скоростей

Полученная модель робота [81] реализована в среде Simulink пакета MatLab.

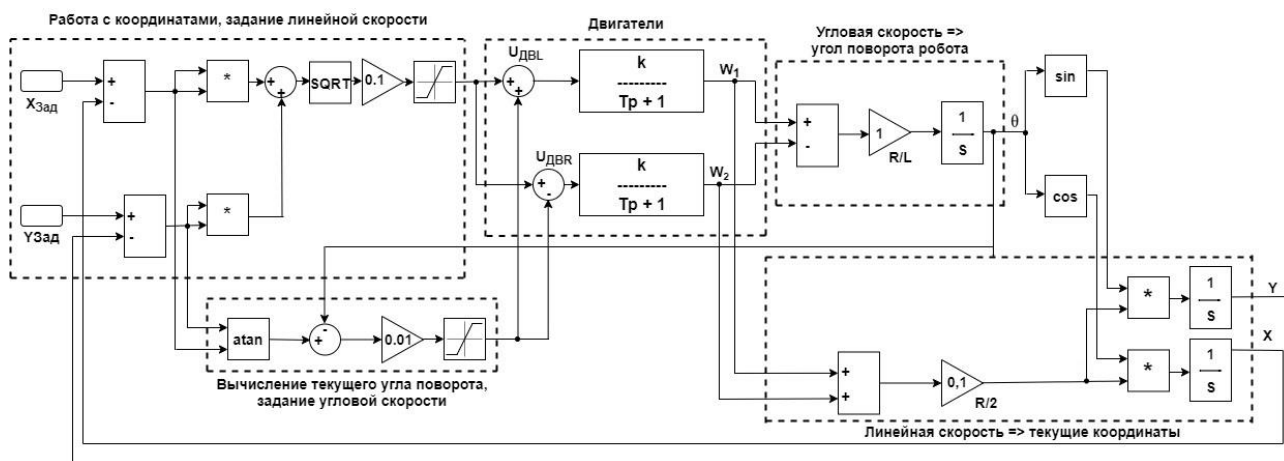


Рисунок 2.6. - Динамическая модель мобильного наземного робота [52].

2.2. Модель приемника спутниковой навигационной системы

Так как в данной работе в качестве навигационного устройства используется приемник СНС, то для построения общей модели наземного мобильного робота необходима модель СНС, включенная в модель системы управления в качестве источника навигационной информации о положении робота. Требуемая модель будет состоять из нескольких блоков и алгоритмов.

2.2.1. Расчет координат видимых спутников приемником СНС

Общий принцип определения координат навигационным приемником состоит в следующем. Навигационные спутники передают на землю радиосигналы. Сигналы закодированы специальным кодом, и в них методами модуляции, заложена определенная информация [114].

В навигационном приемнике осуществляется поиск сигналов всех доступных спутников, обнаружение сигналов и непрерывное сопровождение обнаруженных сигналов. Для осуществления более быстрого поиска и обнаружения сигналов спутников используются данные альманаха. Альманах - это данные, передаваемые любым спутником и содержащие информацию о параметрах орбит всех спутников навигационной системы. С его помощью можно приблизительно вычислить их местоположение. По данным альманаха приемник определяет «видимые» спутники - их коды и приближенные значения

доплеровской частоты. По этим данным каналы приемника автоматически настраиваются на соответствующие спутники и осуществляется переход в режим сопровождения. После перехода в режим сопровождения выполняется процедура считывания, декодирования и записи в память приемника данных сигнала. Выявляются и в дальнейшем используются только данные работоспособных спутников. Для определения координат необходимо иметь данные об эфемеридах, текущем времени и времени актуальности данных. Эфемериды - это точные координаты искусственных спутников Земли, используемых для навигации, так как реальные орбиты спутников могут отличаться от расчетных. По этим данным в приемнике формируется измерительная информация [73].

Приемник в текущий момент времени измеряет время прохождения сигналов от каждого спутника до фазового центра антенны приемника, доплеровскую частоту. К моменту измерения с помощью коэффициентов, корректирующих время, приводится время каждого спутника и рассчитываются временные, ионосферные и тропосферные поправки. По данным об эфемеридах определяются координаты спутников на текущий момент времени и учитываются изменения положений спутников за время прохождения сигнала от спутника до приемника.

Для расчета координат навигационных спутников по данным оперативной информации, передаваемой со спутников, интерфейсный контрольный документ по GPS предлагает следующий алгоритм расчета.

Координаты спутников в геоцентрической фиксированной системе координат (ECEF) рассчитываются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} x_k &= x'_k \cos(\Omega_k) - y'_k \cos(i_k) \sin(\Omega_k) \\ y_k &= x'_k \sin(\Omega_k) + y'_k \cos(i_k) \cos(\Omega_k) \\ z_k &= y'_k \sin(i_k) \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

где: x_k, y_k, z_k - координаты навигационных спутников, которые требуется определить по осям X, Y, Z абсолютной геоцентрической системы координат; x'_k, y'_k - координаты навигационного спутника в орбитальной плоскости; Ω_k - скорректированная долгота; i_k - скорректированное наклонение орбиты спутника.

1) Координаты навигационного спутника в орбитальной плоскости:

$$\left. \begin{aligned} x'_k &= r_k \cos(u_k) \\ y'_k &= r_k \sin(u_k) \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

где: r_k - скорректированный радиус орбиты спутника; u_k - скорректированный аргумент широты.

- Скорректированный радиус орбиты спутника, который определяется по формуле:

$$r_k = A(1 - e \cos(E_k)) + \delta r_k \quad (2.15)$$

где: δr_k - поправка для коррекции радиуса, которую определяют по формуле:

$\delta r_k = C_{rc} \cos(2\Phi_k) + C_{rs} \sin(2\Phi_k)$; E_k - эксцентрическая аномалия, которую

определяют по формуле: $E_k = M_k + e \sin(E_k)$, M_k - средняя аномалия и

определяются по формуле: $M_k = M_0 + n t_k$, n - скорректированное среднее

движение и определяются по формуле: $n = n_0 + \Delta n$, n_0 - среднее движение

спутника и определяются по формуле: $n_0 = \sqrt{\frac{\mu}{A^3}}$; A - большая полуось

эллиптической орбиты навигационного спутника.

- Скорректированный аргумент широты, который определяется по формуле:

$$u_k = \Phi_k + \delta u_k, \quad (2.16)$$

где: δu_k - поправка для коррекции аргумента широты, которую определяют по

формуле: $\delta u_k = C_{us} \sin(2\Phi_k) + C_{uc} \cos(2\Phi_k)$; Φ_k - аргумент широты, который

определяется по формуле: $\Phi_k = v_k + \omega$; v_k - истинная аномалия и определяются по

формуле: $v_k = \arctg \left[\frac{\sqrt{1 - e^2} \sin(E_k)}{\cos(E_k) - e} \right]$.

2) Скорректированное наклонение орбиты спутника:

$$i_k = i_0 + \delta i_k + (IDOT)t_k \quad (2.17)$$

где IDOT - скорость изменения угла наклонения орбиты спутника; t_k - время,

отсчитываемое от опорной эпохи эфемерид (t_{0e}) и определяются по формуле:
 $t_k = t - t_{0e}$, где, t - системное время СНС на момент передачи сообщения (время, скорректированное на величину задержки прохождения сигнала от спутника до потребителя, равную отношению дальности к скорости света); δi_k - поправка для коррекции угла наклона, которую определяют по формуле:
 $\delta i_k = C_{ic} \cos(2\Phi_k) + C_{is} \sin(2\Phi_k)$.

3) Скорректированная долгота (Ω_k) определяется из соотношения:

$$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e)t_k - \dot{\Omega}_e t_{0e} \quad (2.18)$$

В выражениях (2.17 - 2.22) параметры: C_{rs} , Δn , M_0 , C_{uc} , e , C_{us} , \sqrt{A} , t_{0e} , C_{ic} , Ω_0 , C_{is} , i_0 , C_{rc} , ω , $\dot{\Omega}$, IDOT представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Параметры данных спутников [73]

Символьное обозначение	Содержание информации
C_{rs}	Амплитуда синусной гармонической поправки к радиусу орбиты спутника
Δn	Отличие среднего движения от расчетного значения
M_0	Средняя аномалия на время привязки
C_{uc}	Амплитуда косинусной гармонической поправки к аргументу широты
e	Эксцентриситет
C_{us}	Амплитуда синусной гармонической поправки к аргументу широты
\sqrt{A}	Корень квадратный из большой полуоси орбиты спутника
t_{0e}	Опорное время привязки передаваемых эфемерид
C_{ic}	Амплитуда косинусной гармонической поправки к углу наклона

Ω_0 (OMEGA) ₀	Долгота восходящего узла орбитальной плоскости на недельную эпоху
C _{is}	Амплитуда синусной гармонической поправки к углу наклона
i ₀	Угол наклона орбиты спутника, наклонение орбиты спутника
C _{tc}	Амплитуда косинусной гармонической поправки к радиусу орбиты спутника
ω	Аргумент перигея
$\dot{\Omega}$ OMEGADOT	Скорость изменения прямого восхождения
IDOT	Скорость изменения угла наклона

Значения $\mu = 3,986005 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$ - геоцентрическая гравитационная постоянная Земли и $\dot{\Omega}_e = 7.292115 \cdot 10^{-5} \text{ рад/сек}$ - скорость вращения Земли задаются всемирной системой геодезических параметров Земли WGS-84.

Получены результаты, используются при решении навигационной задачи.

2.2.2. Модель приемника спутниковой навигационной системы

2.2.2.1. Математическое описание навигационной задачи

Навигационной задачей в спутниковых системах навигации является - определение пространственно-временных координат приемника и составляющих вектора его скорости. При решении навигационной задачи в общем случае необходимо найти координаты приемника (x, y, z), поправку h_τ к шкале времени приемника относительно шкалы времени космического сегмента СНС и составляющие вектора скорости [104, 134].

В приемнике измеряется задержка сигнала и доплеровский сдвиг частоты. Задержке сигнала τ соответствует дальность $r = c\tau$, где c – скорость света, равная 299792458 м/с. В открытом пространстве геометрическое место точек с одинаковым значением r образует поверхность положения в виде сферы с радиусом

r и центром, совпадающим с фазовым центром передающей антенны спутника. Местоположение конкретной точки определяется по пересечению трех поверхностей положения, однако в ряде случаев может возникнуть неоднозначность местоположения. Эта проблема решается путем введения дополнительных поверхностей положения или дополнительной информации о местоположении [31]. На рис. 2.8 схематически представлено решение задачи местоопределения.

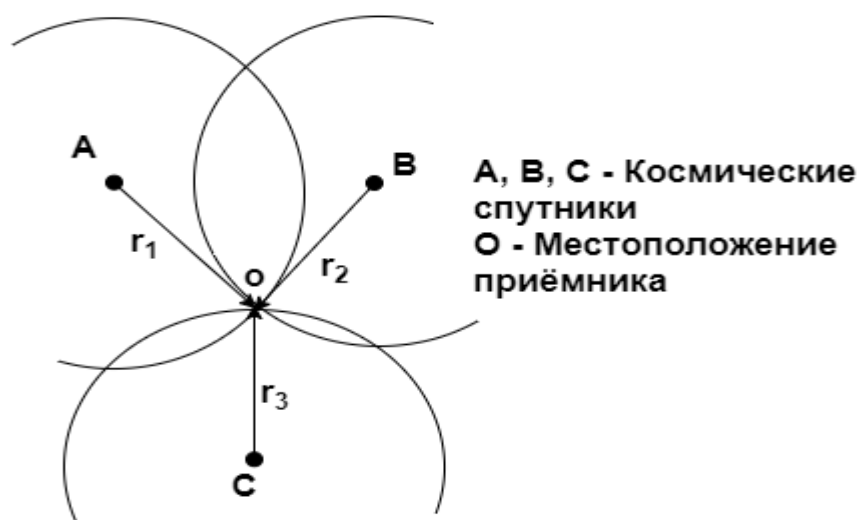


Рисунок 2.7. - Определение координат пользователя по трем дальностям

Расстояние между навигационным спутником и приемником называется псевдодальностью. Оно вычисляется как произведение скорости распространения сигнала и времени, в течении которого сигнал спутника достигает приемника. Это время измеряется в аппаратуре приемника.

Используем обозначения: $PR_i^{\text{изм.}}$ - измеренная псевдодальность до i -го навигационного спутника; Δt_i - время прохождения сигнала с i -го спутника до приемника на момент проведения навигационных измерений; c - скорость распространения электромагнитных волн в пространстве.

Уравнение псевдодальности от приемника до i -го спутника имеет вид:

$$PR_i^{\text{изм.}} = c\Delta t_i \quad (2.19)$$

Значение псевдодальности можно также записать через координаты i -го

спутника (x_i, y_i, z_i) и координаты приемника (x, y, z) :

$$PR_i^{\text{изм.}} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}, \quad (2.20)$$

где x, y, z - неизвестные, которые требуется определить.

Очевидно, что для решения уравнения (2.20) нужно иметь минимум три уравнения, т.е. рассчитать и определить псевдодальности до трех спутников. Поскольку шкалы времени навигационных спутников и шкала времени приемника несинхронизированы, то при определении псевдодальностей по уравнениям (2.20) появляется погрешность из-за их расхождения. С учетом одномоментности измерения псевдодальностей, а также синхронизации шкал времени навигационных спутников между собой, расхождение шкалы времени спутников и потребителя в момент определения псевдодальностей можно считать величиной постоянной, но неизвестной.

Обозначив эту неизвестную величину через h_τ , запишем систему уравнений (2.20) в виде:

$$PR_i^{\text{изм.}} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} + h_\tau, \quad (2.21)$$

где h_τ - погрешность измерения псевдодальности из-за расхождения шкал времени навигационного спутника и аппаратуры приемника.

Для одномоментных измерений погрешность h_τ одинакова для всех спутников.

В системе (2.21) четыре неизвестных x, y, z, h_τ и для ее решения уже необходимо четыре уравнения, т.е. требуется определение псевдодальностей до 4-х навигационных спутников.

Результатом решения системы (2.21) являются координаты приемника x, y, z и расхождение шкал времени сети навигационных спутников и аппаратуры приемника h_τ . Как указывалось выше, расхождение шкал времени сети навигационных спутников и часов аппаратуры потребителя не является единственным источником ошибок при определении псевдодальностей.

В общем виде система уравнений (2.21) может быть записана так:

$$PR_i^{\text{изм.}} = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} + h_\tau + \Delta_i, \quad (2.22)$$

где: Δ_i - погрешности определения псевдодалности до i -го спутника из-за других влияющих факторов (ионосферные и тропосферные задержки, многолучевой прием и др.).

2.2.2.2. Общая модель приемника СНС

Общая модель приемника СНС включает в себя несколько блоков, рис.2.8 [103, 126].



Рисунок 2.8. - 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.

Модель приемника СНС реализована по схеме на рисунке 2.8 в среде Simulink пакета Matlab, рис. 2.9. Листинг программы реализации алгоритма вычисления координат в среде Simulink пакета Matlab приведен в приложении А.

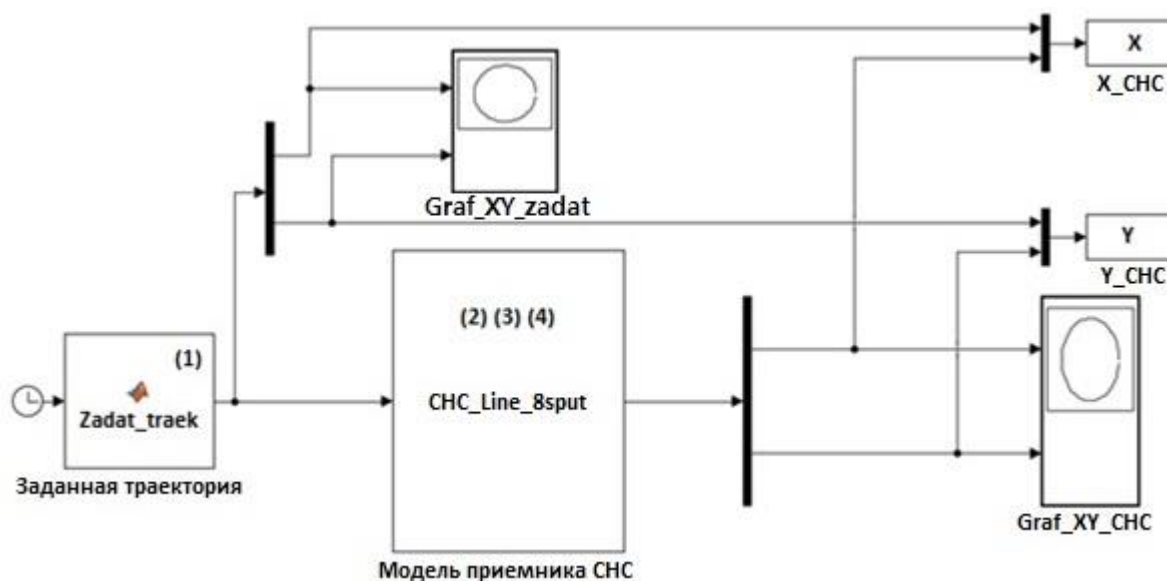


Рисунок 2.9. - Модель приемника СНС в среде Simulink пакета Matlab

Блок 1 Zadat_traek определяет траекторию по которой перемещается приемник СНС, блоки 2, 3, 4 CHC_Line_8sput реализует основную программу вычислений, блоки Graf_XY_Zadat и Graf_XY_CHC служат для отображения заданной траектории перемещения приемника СНС и результатов определения его координат по модели СНС.

Так как моделирование проводится в определенном месте и в определенное время, то для выбора спутников, используется информация о зонах видимости [103], которые приводятся на соответствующих ресурсах рис. 2.10 [60].



Рисунок 2.10.- Зоны видимости навигационных спутников "Глонасс" [60]

Для определения видимых спутников можно также воспользоваться специальным программным обеспечением, которое предназначено для отслеживания состояния спутниковой навигационной системы. Например, такие программы часто устанавливаются на смартфонах. Если, например, моделируется система GPS, то это может быть приложение "GPS-Status Data" [102], рис. 2.11, которое позволяет определить видимые в данной конкретной географической точке и в текущий момент времени спутники и использовать их в модели для определения координат пользователя.

В приложении отображается количество видимых спутников, их номера и состояние. На основе наблюдаемых спутников, используя эфемериды по данным альманаха GPS [61], рис. 2.12, можно определить параметры каждого спутника, по которым уже вычислить координаты нужных спутников.

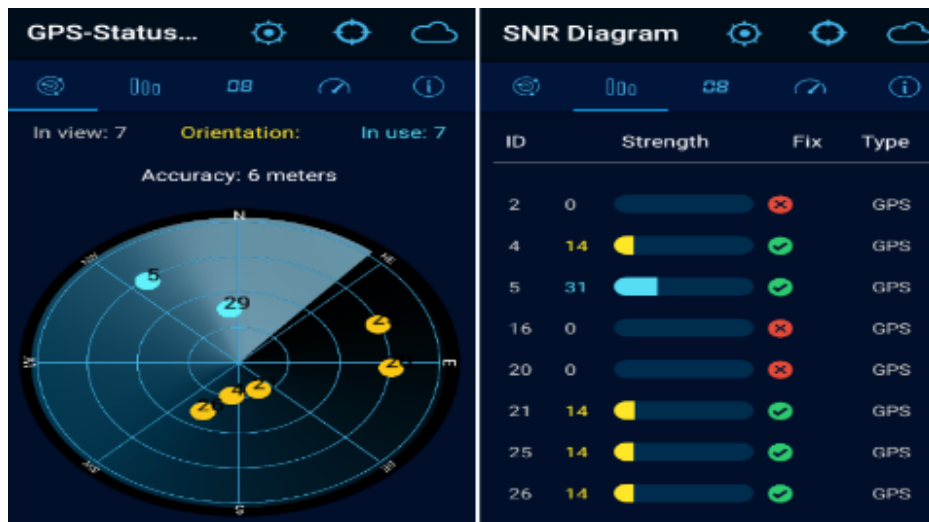


Рисунок 2.11. - Пример ПО GPS-Status Data для определения видимых спутников [102]

ЭФЕМЕРИДЫ ПО ДАННЫМ АЛЬМАНАХА GPS

PRN	Date	t	e	i	dΩ/dt	A	LΩ	ω	m	af0	af1
01	26.05.19	61440	0,00886	55,91574	-4,52492E-7	26559,63926	-170,61716	40,46200	-21,74913	-2,57492E-5	-1,09139E-11
02	26.05.19	61440	0,01889	54,71892	-4,63624E-7	26560,22810	-174,55316	-99,67913	-5,63875	-2,22206E-4	-7,27596E-12
03	26.05.19	61440	0,00217	55,15425	-4,48563E-7	26560,96291	-110,90891	33,68891	-75,44399	1,86920E-4	0,00000E0
04											
05	26.05.19	61440	0,00564	54,40341	-4,57076E-7	26560,01672	-112,44698	40,65394	148,23838	9,53674E-7	0,00000E0
06	26.05.19	61440	0,00154	55,89549	-4,52492E-7	26558,96487	-171,09146	-61,81829	-10,88305	1,95503E-4	-1,09139E-11
07	26.05.19	61440	0,01274	54,76699	-4,58385E-7	26560,55524	9,88152	-141,24693	-55,72847	-3,14713E-5	-7,27596E-12
08	26.05.19	61440	0,00440	55,59268	-4,49218E-7	26560,61060	128,27529	-12,83016	112,68269	-1,44958E-4	0,00000E0
09	26.05.19	61440	0,00122	54,56683	-4,50527E-7	26559,78018	-51,75058	101,05214	120,27982	4,04358E-4	-7,27596E-12
10	26.05.19	61440	0,00457	55,15528	-4,49218E-7	26559,73489	-111,09405	-154,30613	-140,64538	3,52859E-5	-1,09139E-11
11	26.05.19	61440	0,01663	52,12615	-4,87198E-7	26560,02679	163,56606	108,18368	-62,75955	-5,97954E-4	7,27596E-12
12	26.05.19	61440	0,00764	56,30164	-4,40050E-7	26559,55370	72,90838	62,20884	-100,42470	2,39372E-4	-3,63798E-12
13	26.05.19	61440	0,00353	55,45775	-4,41360E-7	26559,74495	-43,88948	74,12126	44,91790	-6,19888E-5	0,00000E0
14	26.05.19	61440	0,01066	55,02997	-4,44634E-7	26560,14255	-46,43290	-111,13742	88,65591	-7,91550E-5	0,00000E0
15	26.05.19	61440	0,01132	53,16092	-4,63624E-7	26559,93620	-56,33454	44,46388	52,67614	-3,10898E-4	3,63798E-12
16	26.05.19	61440	0,01080	56,32121	-4,40705E-7	26558,92461	73,99221	33,14861	153,30985	-4,29153E-5	-3,63798E-12
17	26.05.19	61440	0,01283	56,38747	-4,42014E-7	26560,67100	132,14401	-98,10139	97,96444	6,10352E-5	7,27596E-12
18	26.05.19	61440	0,01536	54,68562	-4,65589E-7	26560,06202	-173,77309	79,70457	-36,53965	5,62668E-5	3,63798E-12
19	26.05.19	61440	0,00962	56,26456	-4,41360E-7	26559,52854	134,79422	80,64675	-100,73281	-3,13759E-4	3,63798E-12
20	26.05.19	61440	0,00442	53,31199	-4,68863E-7	26559,91607	-117,88440	135,57335	-43,34366	5,24521E-4	0,00000E0
21	26.05.19	61440	0,02459	54,36084	-4,62969E-7	26560,40929	-174,29696	-82,55063	-127,09304	-1,85013E-4	7,27596E-12
22	26.05.19	61440	0,00724	53,12247	-4,70172E-7	26561,01324	-115,09501	-76,98781	55,84374	-7,07626E-4	-7,27596E-12

PRN - номер псевдопоследовательности аппарата GPS
Date - базовая дата (UTC)
t - время от базовой даты (сек.)
e - эксцентриситет
i - наклонение (град.)
dΩ/dt - скорость изменения восходящего узла орбиты Ω(град./сек.)
A - большая полуось (км.)
LΩ - долгота восходящего узла (град.) на 00ч.00мин.00сек. базовой даты
ω - аргумент перигея (град.)
m - средняя аномалия (град.)
af0 - поправка к бортовым часам (сек.)
af1 - скорость изменения af0 (сек./сек.)

Рисунок 2.12. - Параметры спутников по данным альманаха GPS [61]

Таким образом, задавая географические координаты места и время, в привязке к которым будем проводиться моделирование, по указанной методике можно определить номера спутников, которые должны быть использованы при моделировании.

2.3. Общая модель наземного робота с системой управления на базе приемника СНС

Общая схема модели наземного мобильного робота с системой управления на базе приёмника СНС [101], реализованная в на MatLab, приведена на рис. 2.13.

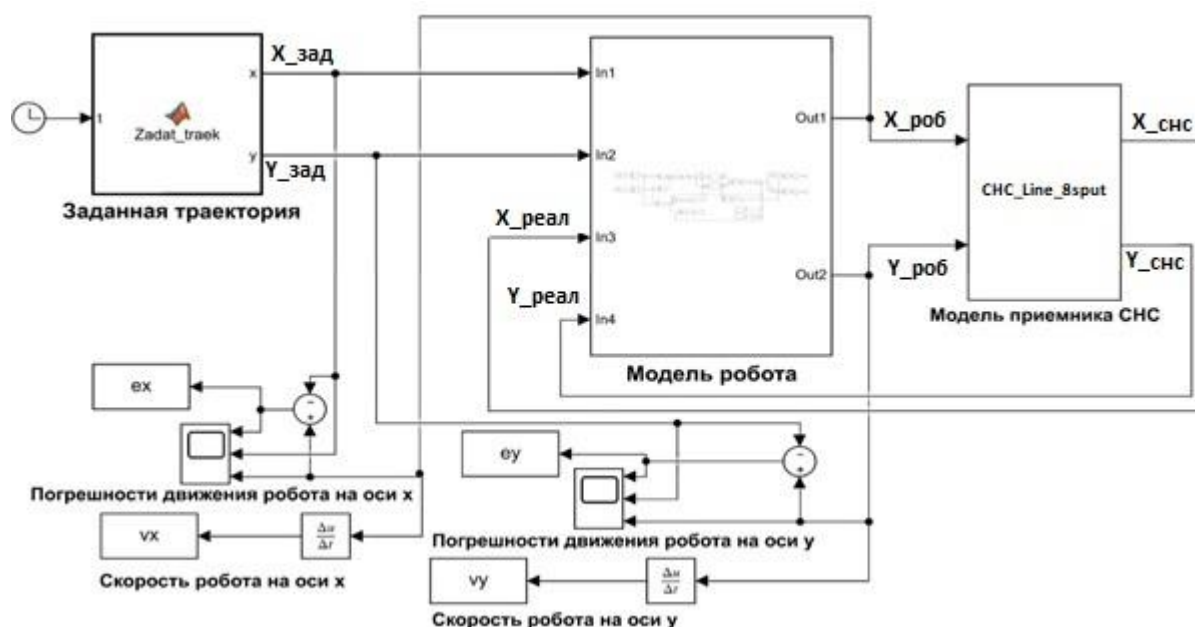


Рисунок 2.13. - Схема модели наземного робота системой управления на базе приемника СНС

Моделировалось движение трехколесного робота с двумя независимыми ведущими колесами (блок "Модель робота") [77, 88, 105, 120], рис. 2.14., подробно описанного выше в разделе 2.1.

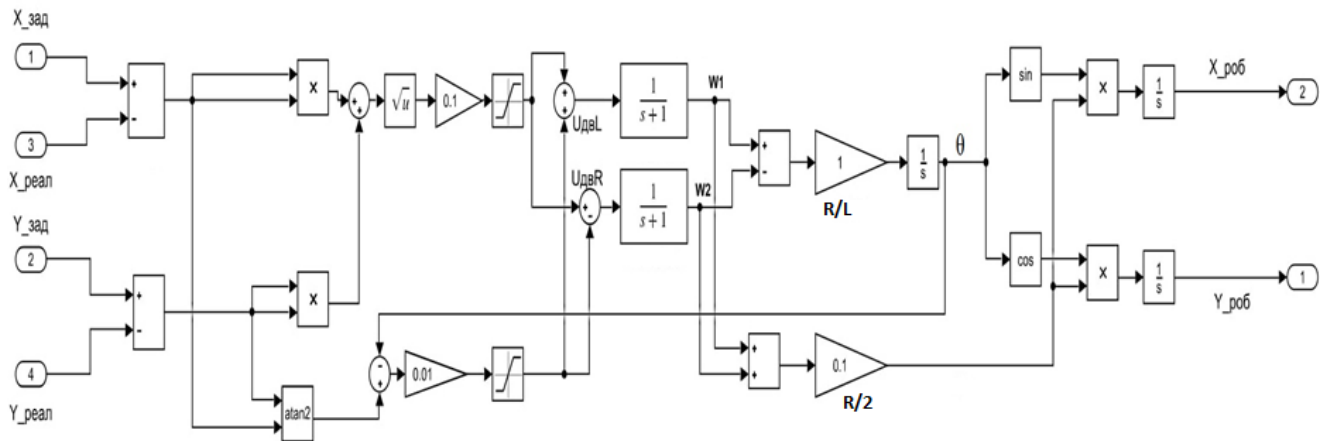


Рисунок 2.14. - Модель робота в MatLab

Модель робота дополнена моделью приемника СНС (блок "Модель приемника СНС") [10], рис. 2.15. Содержание модели подробно описано в разделе 2.2.

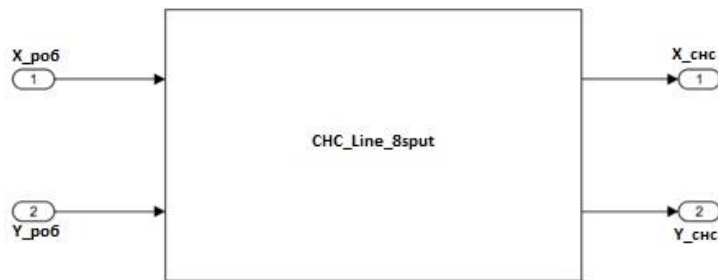


Рисунок 2.15. – Блок модели приемника СНС

Моделировалось движение робота по произвольной траектории (блок "Заданная траектория"), рис. 2.16.

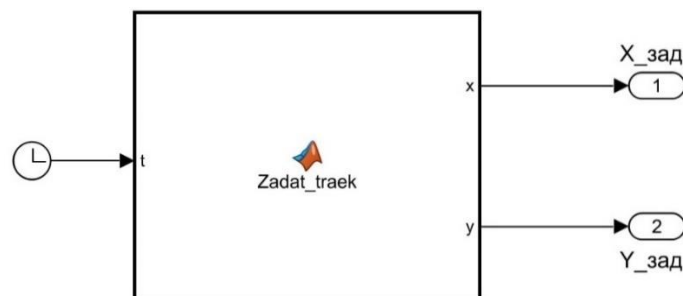


Рисунок 2.16. – Блок заданная траектории

При нормальном без информационных отказов сигнале приемника СНС

робот должен следовать по заданной траектории с допустимыми погрешностями, определяемыми, во-первых, собственной динамикой робота, и, во-вторых, погрешностями определения положения, заданными в модели приемника СНС.

2.4. Моделирование движения робота по заданным траекториям

Перед использованием разработанной модели наземного робота с приёмником СНС для исследования алгоритмов контроля целостности навигационных данных и разработки алгоритмов управления, учитывающих информационные отказы приемника с целью повышения информационной надежности системы необходимо убедиться в ее пригодности для этого. В случаях, когда математическое моделирование заменяет исследование существующей технической системы из-за сложности или невозможности наблюдения ее в реальных условиях или, когда математическая модель используется для приобретения необходимых навыков в эксплуатации реальной технической системы, т.е. модель должна быть максимально приближена к объекту во всех деталях, осуществляется проверка ее адекватности. В других случаях, когда математическая модель служит средством исследования и создания объекта, когда необходимо изучить отдельные характеристики сложной системы в нестандартных условиях (длительный период исследования; необходимость ускорения или замедления изучаемых явлений и т.п.), проводят верификацию модели. Верификация математической модели состоит в проверке правильности развития алгоритма моделирования объекта исследований в ходе имитации его функций [79]. При разработке любой модели могут быть допущены ошибки. Под ошибками моделирования понимают ошибки в построении и реализации модели, которые приводят к неверной интерпретации результатов моделирования, т.е. к неверным выводам и рекомендациям, сделанным по его результатам [79, 100].

При построении модели такими ошибками могут быть, например:

- принятая структура модели неточно или недостаточно полно и правильно отражает структуру объекта моделирования;
- алгоритмы функционирования частей модели, или лежащие в их основе

соотношения, составлены неправильно;

- способы взаимодействия частей модели описаны ошибочно и т.п.

При программной реализации модели ошибки могут возникать вследствие:

- ошибочной реализации алгоритмических компонент модели на языке программирования;

- ошибочной реализации информационного взаимодействия частей модели;

- неверных приближений и упрощении в вычислениях и т.п.

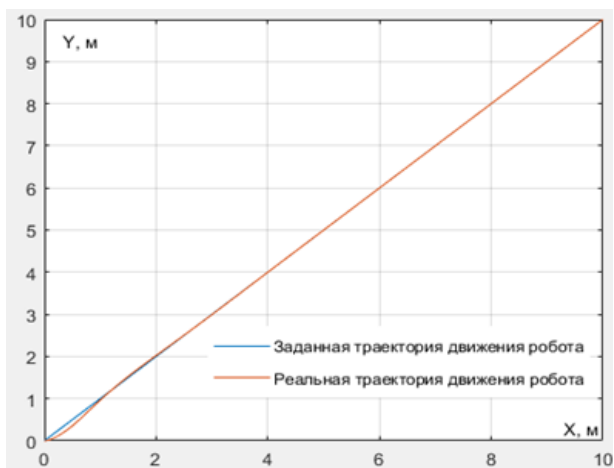
Проверку модели обычно проводят методом детерминированного случая (задачи, параметров) [34, 70]. Он заключается в том, что заданными условиями моделирования реализуют некоторый, возможный в объекте, детерминированный случай (часто достаточно простой и имеющий аналитическое решение) и, если интерпретация результатов моделирования общепринятыми методами позволяет сделать выводы, сходные с начальными положениями, то и при использовании модели для проведения исследований можно ожидать (с определенной доверительной вероятностью) верных результатов. Там как результаты единичного опыта, как правило, не совпадают с ожидаемыми результатами, то сопоставление проводят на основе вероятностного подхода [70]. Детерминированным случаем, на основе которого достаточно просто сделать заключение об исправности модели является моделирование движения робота по заранее определенной, функционально заданной траектории

2.4.1. Моделирование движения робота по функционально заданным траекториям

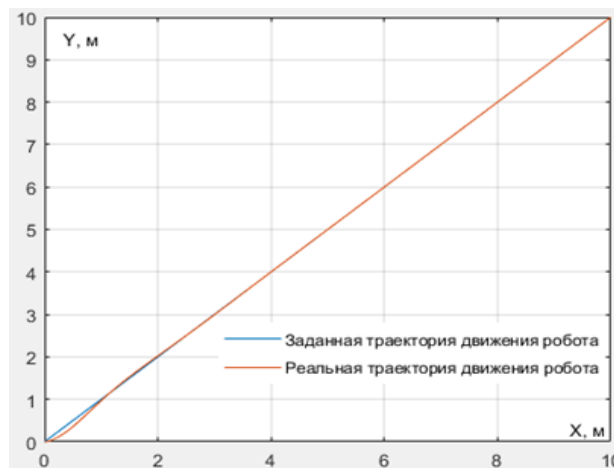
Результаты моделирование движения робота по различным функционально заданным траекториям и выводы по ним представлены ниже.

1. Линейная траектория

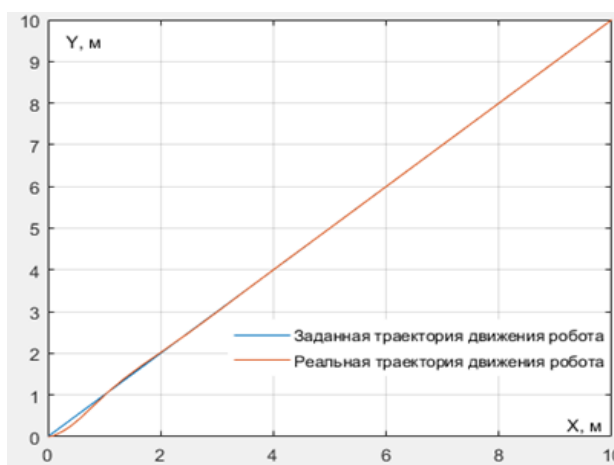
Результаты моделирования движения робота по линейной траектории при трех разных постоянных времени двигателя робота приведены на рис. 2.17 - 2.19.



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$

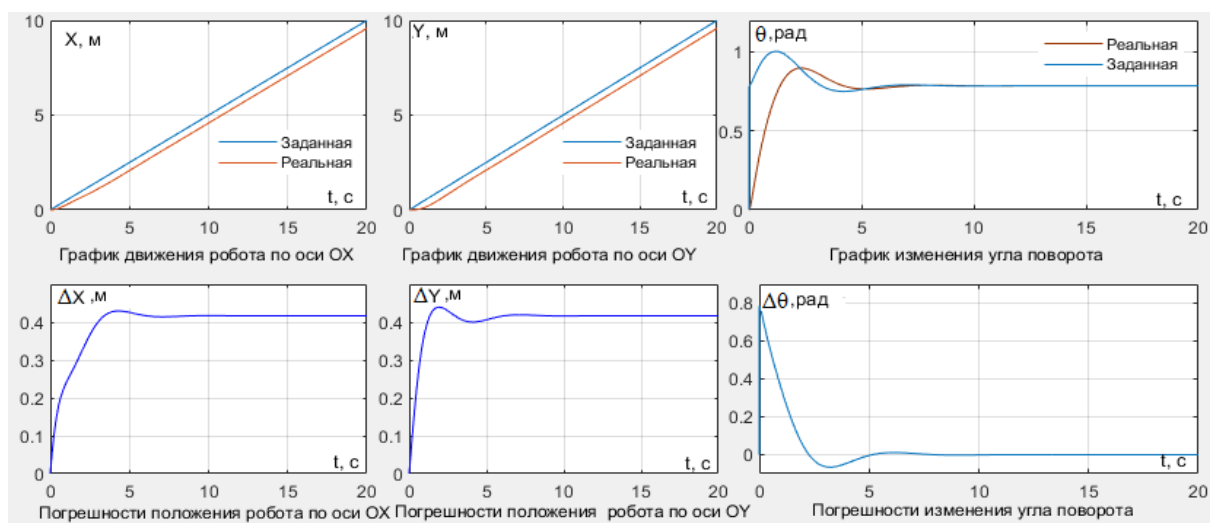


б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$

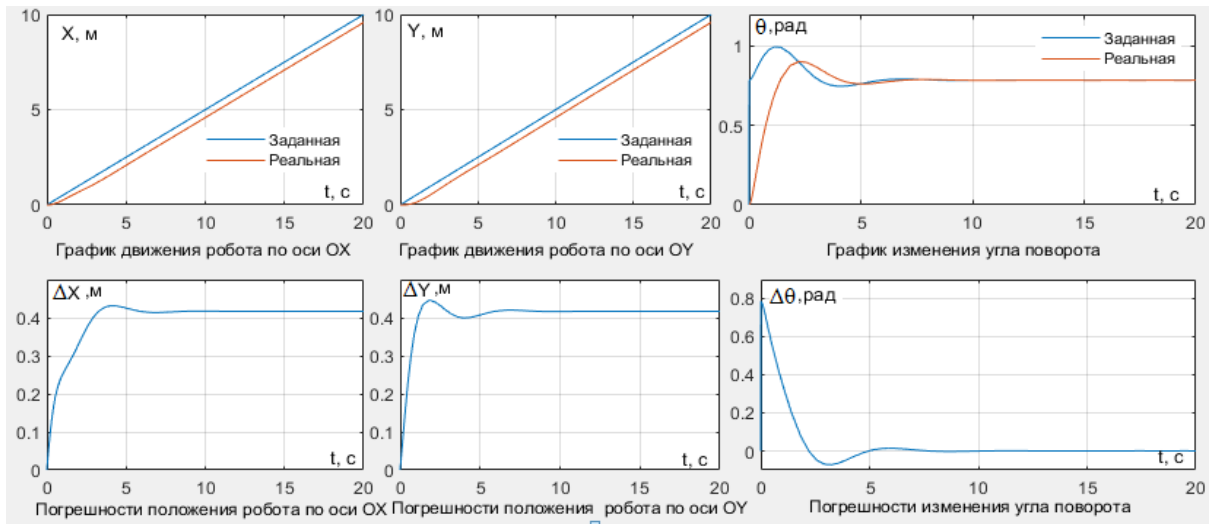


в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

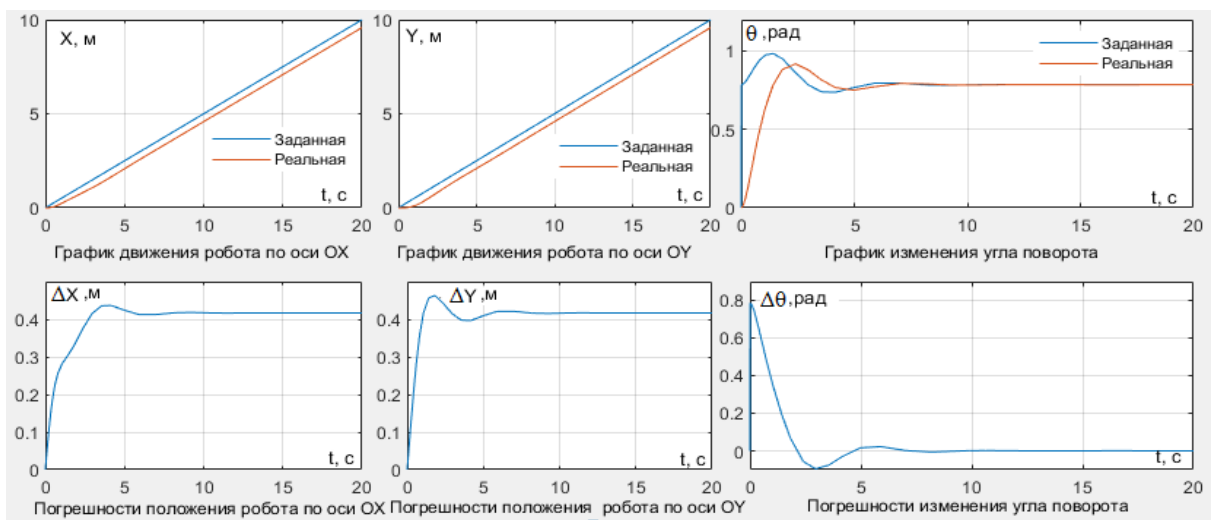
Рисунок 2.17. - Движение робота по линейной траектории



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$

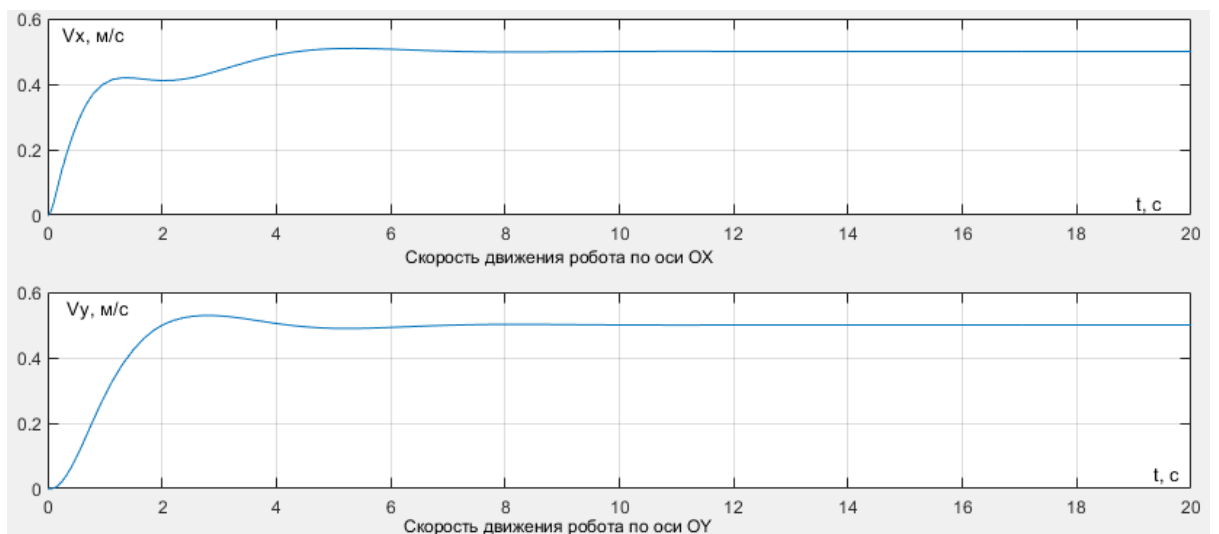


б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$

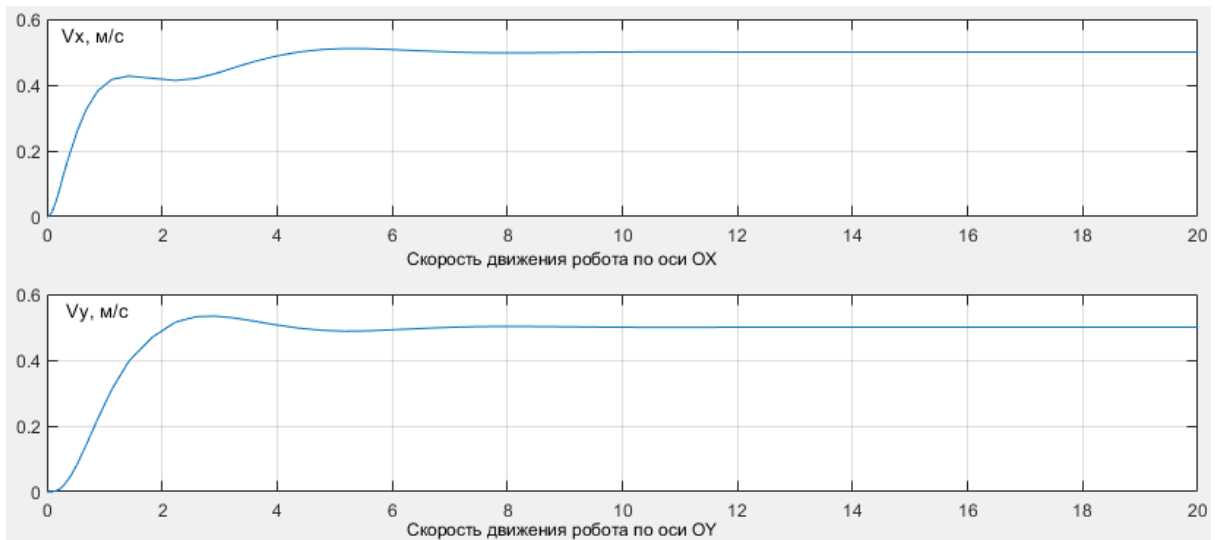


в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

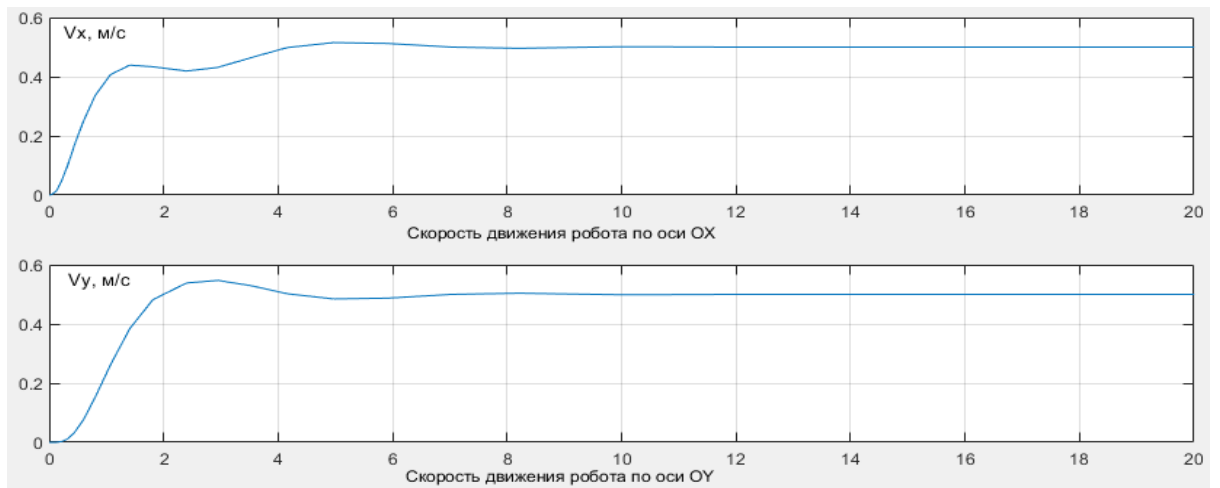
Рисунок 2.18.- Координаты робота и погрешности при движении по линейной траектории



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$



б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$

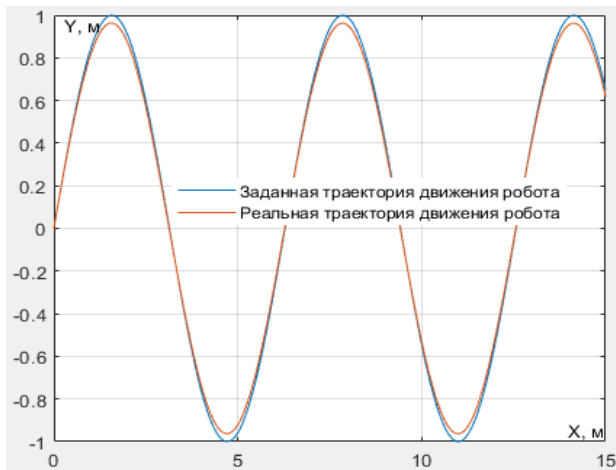


в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

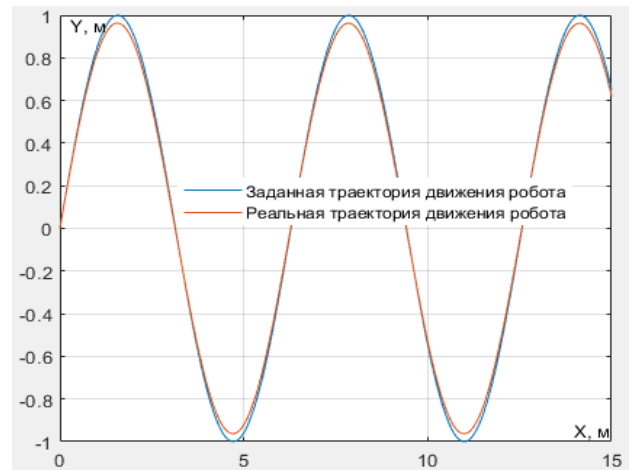
Рисунок 2.19.- Скорости движения робота по линейной траектории

2. Гармоническая траектория

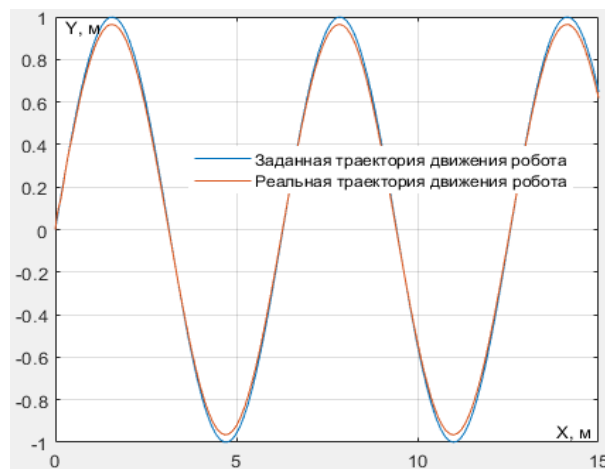
Результаты моделирования движения робота по гармонической траектории при трех разных постоянных времени двигателя робота приведены на рисунках 2.20 - 2.22.



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$

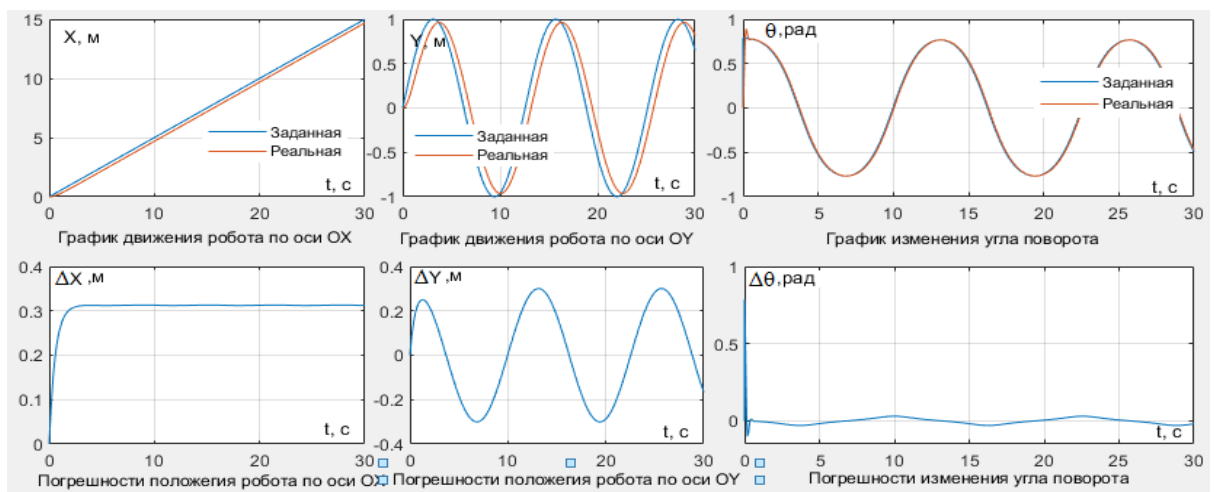


б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$

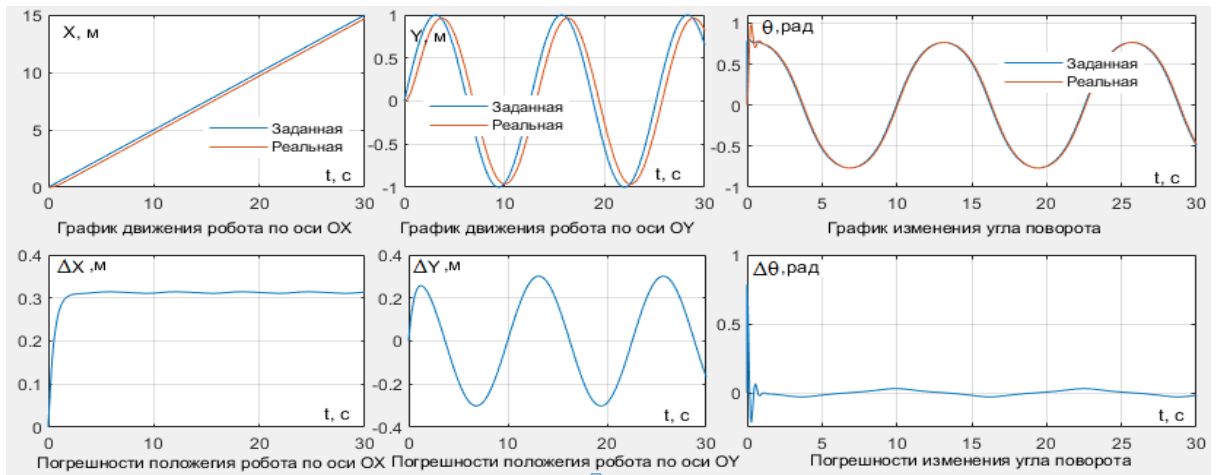


в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

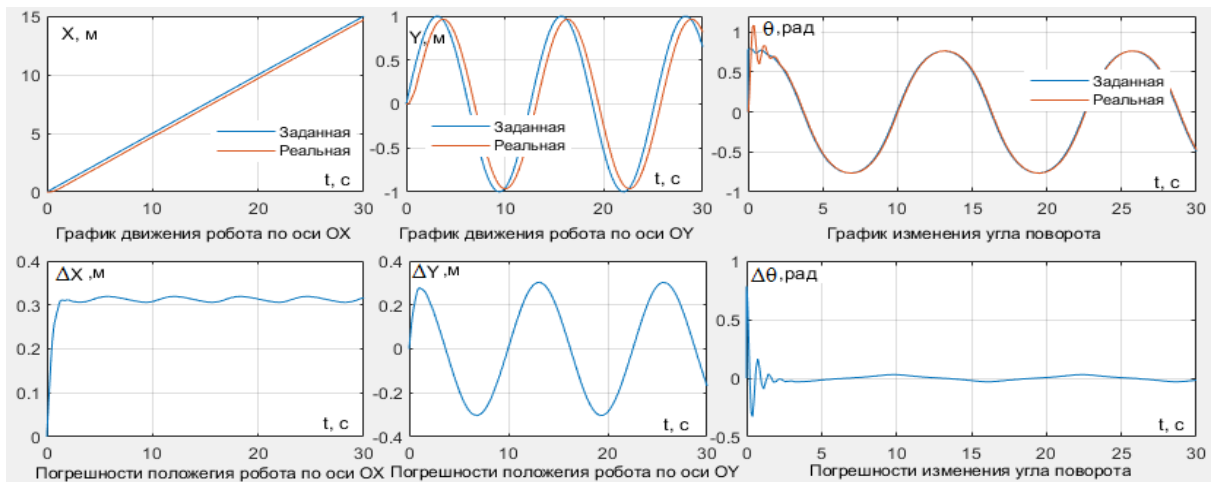
Рисунок 2.20. - Движение робота по гармонической траектории



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$

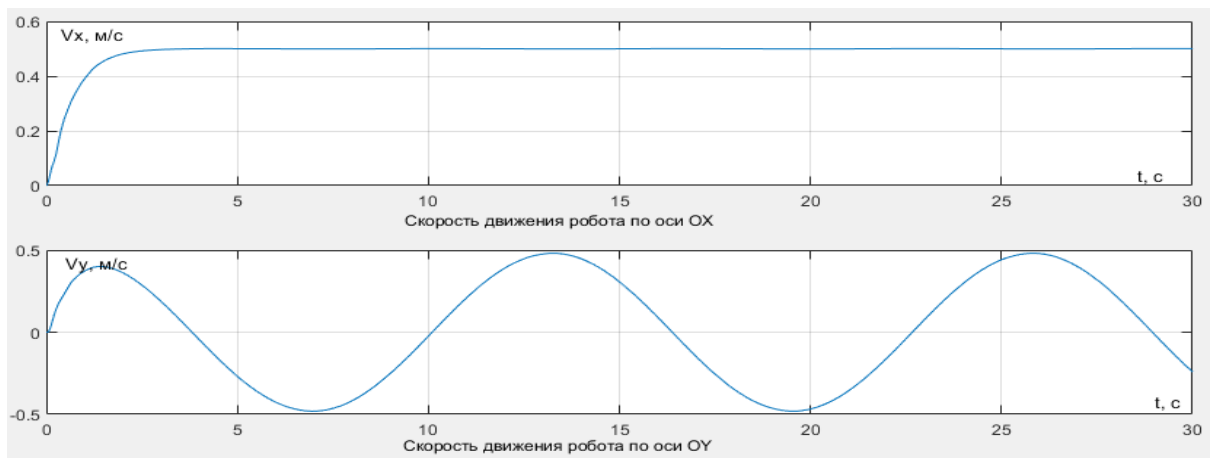


б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$

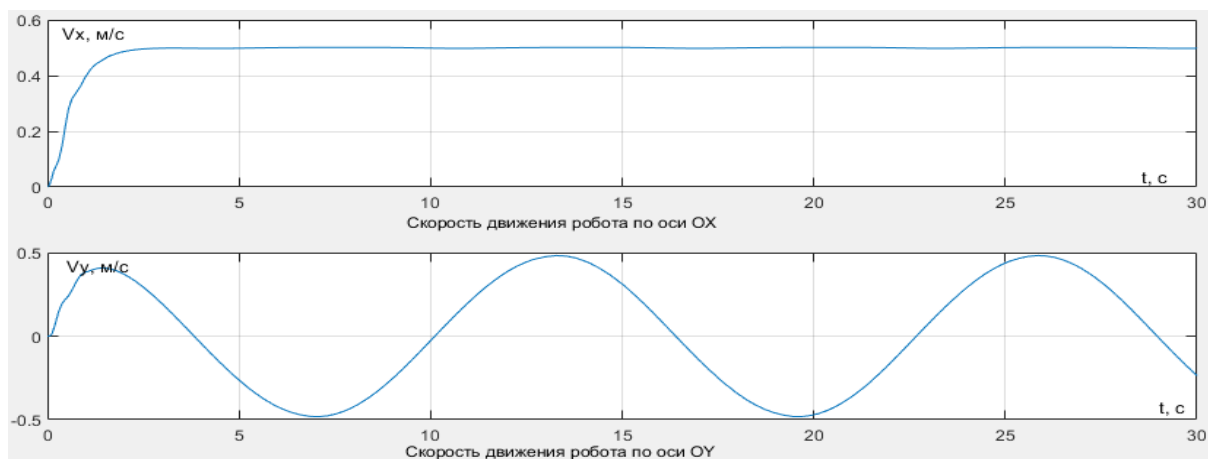


в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

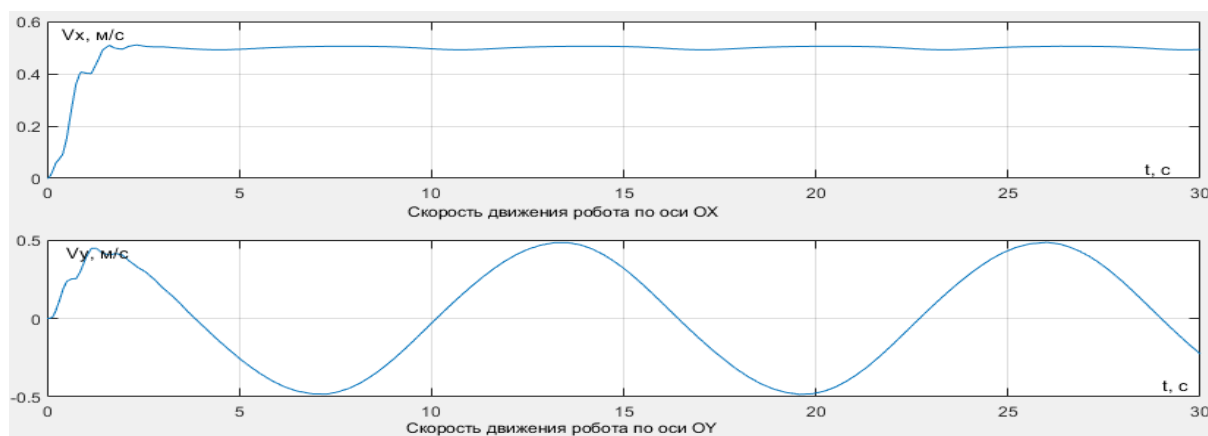
Рисунок 2.21. Координаты робота и погрешности при движении по гармонической траектории



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$



б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$



в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

Рисунок 2.22.- Скорости движения робота по гармонической траектории

Результаты моделирования по траекториям: круговая траектория, треугольник, квадрат и трапеция представлены в приложении Б.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

- изменение координат робота при движении по заданным детерминированным траекториям соответствует его модели и логике работы системы управления по отрицательной обратной связи;
- робот следует по заданным детерминированным траекториям с ожидаемыми динамическими погрешностями, зависящими от постоянных времени двигателя робота;
- при разработке и реализации модели наземного робота с системой управления на базе приёмника СНС не допущено ошибок.

2.4.2. Моделирование движения робота по произвольной траектории

Одной из задач при функционировании роботов в недостаточно известной обстановке является планирование безопасных траекторий движения, позволяющих строить гладкие безаварийные маршруты перемещения. Сложность синтеза траекторий движения робота состоит в том, что движение по такой траектории в большинстве случаев, во-первых, рассматривается как случайный процесс с неизвестными параметрами, а во-вторых, вычислительные возможности бортовых систем мобильных роботов ограничены, что не позволяет решать задачу планирования с использованием классических переборных или потенциальных алгоритмов.

Задать произвольную траекторию движения робота в реальной обстановке можно отметив, например, на карте точки, через которые должен пройти робот [131]. Другим возможным решением является получение траектории с помощью трекера на основе приемника СНС. Для этого необходимо перемещать трекер по желаемой траектории и записывать координаты придвижении.

В работе для этого использовалось приложение Geo Tracker [41], которое устанавливалось на коммуникатор с приемником СНС. Далее на реальной местности коммуникатор перемещался по траектории, проходящей через точки, которые являлись контрольными и через приложение записывались их географические координаты. Предполагаемая траектория движения робота проходила через 7 контрольных точек, как показано на рисунке 2.23.

Далее необходимо было привязать систему координат к начальной точке движения и вычислить математические (относительные) координаты контрольных точек движения робота, рис. 2.24.

Относительные координаты контрольных точек движения робота вычислялись в декартовой системе ОХУ с центром в начальной точке движения А0 на основе их астрономических координат. Полученные координаты используются для записи уравнений движения робота через них.



Рисунок 2.23. - Астрономические координаты точек траектории движения робота

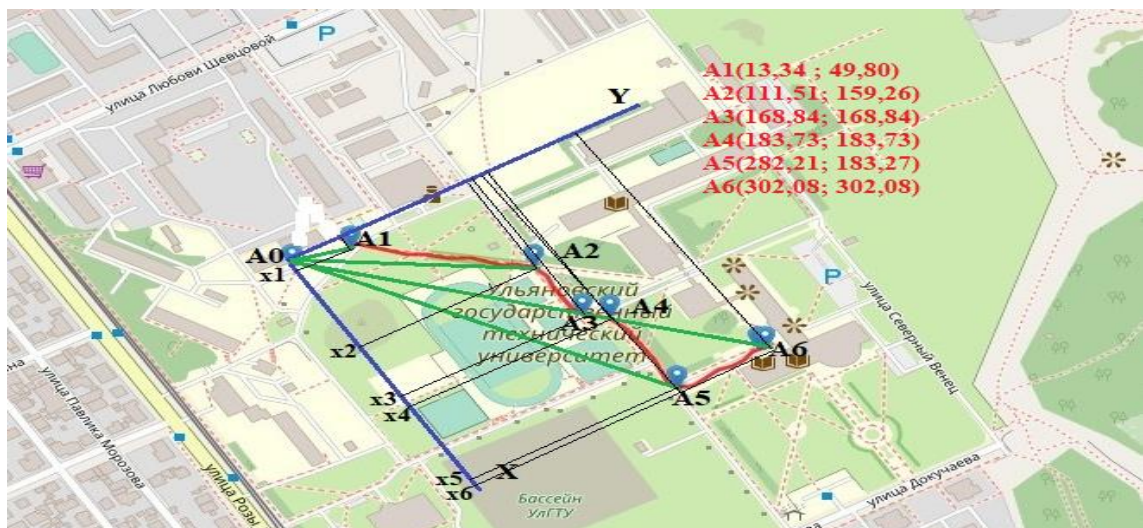


Рис. 2.24. - Математические координаты точек траектории движения робота

По координатам точек движения робота, строилась траектория движения робота по участкам. Для этого записывались уравнения прямых линий, проходящих через точки траектории.

Уравнение через любые две точки $A_0(x_0; y_0)$ и $A_c(x_c; y_c)$:

$$y = \frac{y_c - y_0}{x_c - x_0} x + \frac{y_0 x_c - y_c x_0}{x_c - x_0} \quad (2.23)$$

Участки траектории движения робота:

- Траектория движения робота по участку A0A1 с координатами A0(0; 0) и A1(13,4; 49,80):

$$y_{01} = \frac{49,80}{13,34}x = 3,73313x \quad (2.24)$$

- Траектория движения робота по участку A1A2 с координатами A1(13,4; 49,80) и A2(111,51; 159,26):

$$y_{12} = \frac{159,26 - 49,80}{111,51 - 13,34}x + \frac{49,80 \cdot 111,51 - 159,26 \cdot 13,34}{111,51 - 13,34} = 1,115x + 34,926 \quad (2.25)$$

- Траектория движения робота по участку A2A3 с координатами A2(111,51; 159,26) и A3(168,84; 168,84):

$$y_{23} = \frac{168,84 - 159,26}{168,84 - 111,51}x + \frac{159,26 \cdot 168,84 - 168,84 \cdot 111,51}{168,84 - 111,51} = 0,1671x + 140,626 \quad (2.26)$$

- Траектория движения робота по участку A3A4 с координатами A3(168,84; 168,84) и A4(183,73; 183,73):

$$y_{34} = \frac{183,73 - 168,84}{183,73 - 168,84}x + \frac{168,84 \cdot 183,73 - 183,73 \cdot 168,84}{183,73 - 168,84} = x \quad (2.27)$$

- Траектория движения робота по участку A4A5 с координатами A4(183,73; 183,73) и A5(282,21; 183,27):

$$y_{45} = \frac{183,27 - 183,73}{282,21 - 183,73}x + \frac{183,73 \cdot 282,21 - 183,27 \cdot 183,73}{282,21 - 183,73} = -4,671 \cdot 10^{-3}x + 184,5882 \quad (2.28)$$

- Траектория движения робота по участку A5A6 с координатами A5(282,21; 183,27) и A6(302,08; 302,08):

$$y_{56} = \frac{302,08 - 183,27}{302,08 - 282,21}x + \frac{183,27 \cdot 302,08 - 302,08 \cdot 282,21}{302,08 - 282,21} = 5,97936x - 1504,167 \quad (2.29)$$

На каждом участке траектории движения робота, задавшись желаемой скоростью движения вычисляется время, которое робот движется между точками и, тем самым устанавливается уравнение движения робота по времени.

Из формул (2.31 - 2.37) участки траектории движения робота по времени следующие:

– Траектория движения робота по участку A0A1 с координатами A0(0; 0) и A1(13,4; 49,80) за время $0 \leq t \leq t_1$:

$$\begin{cases} x_{01} = at \\ y_{01} = 3,73313at \end{cases} \quad (2.30)$$

где a - скорость робота по оси X.

– Траектория движения робота по участку A1A2 с координатами A1(13,4; 49,80) и A2(111,51; 159,26) за время $t_1 \leq t \leq t_2$:

$$\begin{cases} x_{12} = at \\ y_{12} = 1,115at + 34,926 \end{cases} \quad (2.31)$$

– Траектория движения робота по участку A2A3 с координатами A2(111,51; 159,26) и A3(168,84; 168,84) за время $t_2 \leq t \leq t_3$:

$$\begin{cases} x_{23} = at \\ y_{23} = 0,1671at + 140,626 \end{cases} \quad (2.32)$$

– Траектория движения робота по участку A3A4 с координатами A3(168,84; 168,84) и A4(183,73; 183,73) за время $t_3 \leq t \leq t_4$:

$$\begin{cases} x_{34} = at \\ y_{34} = at \end{cases} \quad (2.33)$$

– Траектория движения робота по участку A4A5 с координатами A4(183,73; 183,73) и A5(282,21; 183,27) за время $t_4 \leq t \leq t_5$:

$$\begin{cases} x_{45} = at \\ y_{45} = -4,671 \cdot 10^{-3}at + 184,5882 \end{cases} \quad (2.34)$$

– Траектория движения робота по участку A5A6 с координатами A5(282,21; 183,27) и A6(302,08; 302,08) за время $t_5 \leq t \leq t_6$:

$$\begin{cases} x_{56} = at \\ y_{56} = 5,97936at - 1504,167 \end{cases} \quad (2.35)$$

По уравнениям (2.30 по 2.35) траектория задается среде Simulink пакета MatLab с помощью «m.file».

Программа «m.file» в блоке «Заданная траектория» на рис. 2.13:

```
function [x,y] = Zadat_traek(t)
```

```
if (t<=t1) % Траектория движения робота по участку A0A1
```

```
    m = at;
```

```
    n = 3,73313at;
```

```
elseif ((t>=t1) && (t<=t2 )) % Траектория движения робота по участку A1A2
```

```
    m = at;
```

```
    n = 1,115at + 34,926;
```

```
elseif ((t>=t2) && (t<=t3 )) % Траектория движения робота по участку A2A3
```

```
    m = at;
```

```
    n = 0,1671at + 140,626;
```

```
elseif ((t>=t3) && (t<=t4 )) % Траектория движения робота по участку A3A4
```

```
    m = at;
```

```
    n = at;
```

```
elseif ((t>=t4)&&(t<=t5)) % Траектория движения робота по участку A4A5
```

```
    m = at;
```

```
    n = -4,671.10-3at + 184,5882;
```

```
elseif ((t>=t5)&&(t<=t6)) % Траектория движения робота по участку A5A6
```

```
    m = at;
```

```
    n = 5,97936at – 1504,167;
```

```
else
```

```
    m =302,08;
```

```
    n =302,08;
```

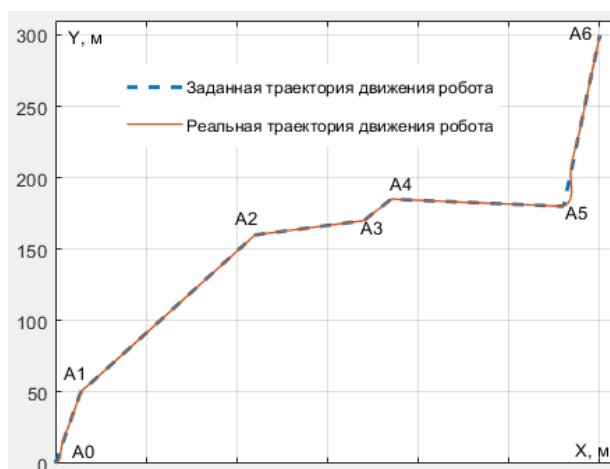
```
end
```

```
x = m;
```

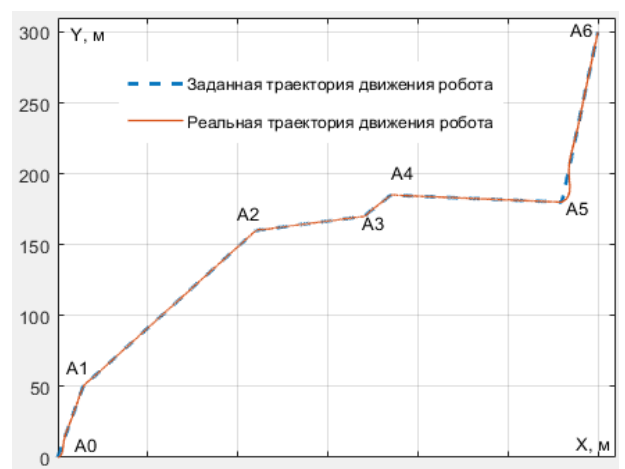
```
y = n.
```

На рисунке 2.25– 2.27 показаны результаты моделирования движения робота

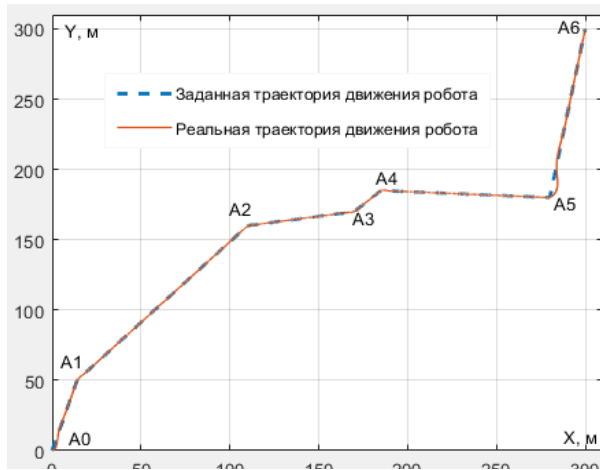
по заданной произвольной траектории.



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$

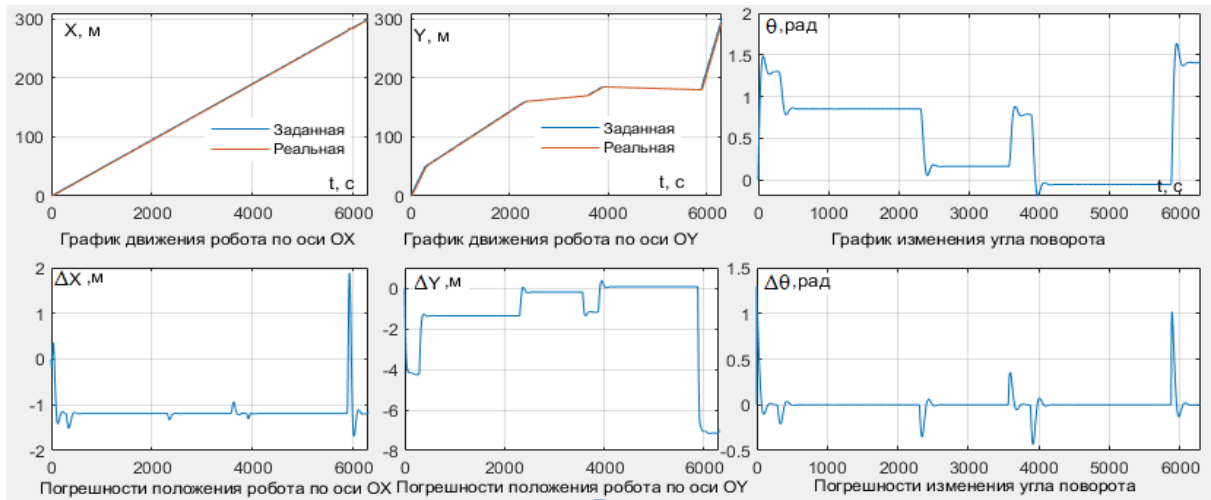


б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$

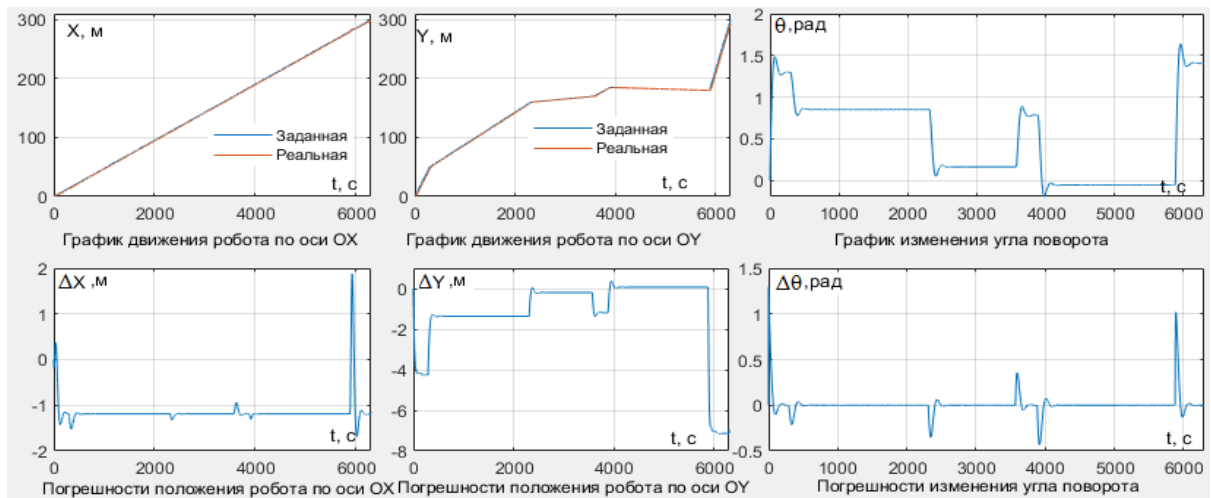


в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

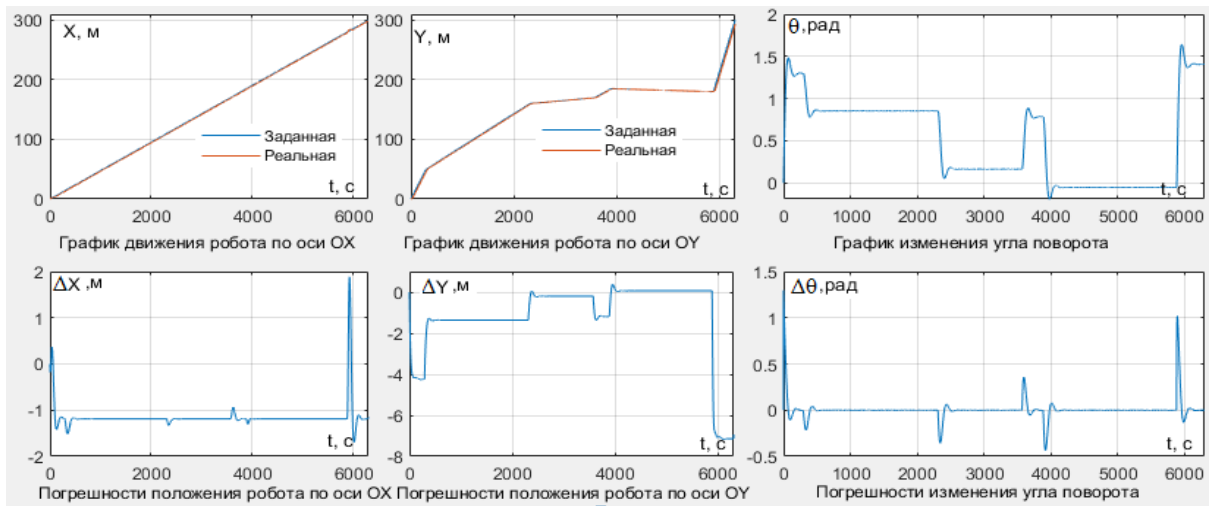
Рисунок 2.25. - Движение робота по заданной произвольной траектории



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$



б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$



в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

Рисунок 2.26. - Координаты робота и погрешности при движении по заданной произвольной траектории



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$



б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$



в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

Рисунок 2.27. - Скорости движения робота по заданной произвольной траектории

Выводы по результатам моделирования движения робота по произвольно заданной траектории в целом аналогичны выводам по результатам моделирования движения по функционально заданным траекториям.

В целом результаты моделирования показывают, что использование приемника спутниковой навигационной системы в системе управления позволяет обеспечить движение робота по самым различным траекториям с контролируемыми характеристиками погрешности и скорости перемещения.

2.5. Результаты и выводы

1. Разработана модель наземного робота с системой управления на базе приемника СНС. Модель позволяет:

- реализовывать логику работы системы управления, использующей приемник СПС с учетом особенностей кинематики робота и динамики его приводов;

- задавать движение робота по требуемым для исследования траекториям (функционально заданным или произвольным).

2. 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.

3. В целом при разработке и реализации модели наземного робота с системой управления на базе приемника СНС не допущено ошибок и ее можно использовать для целей разработки. Результаты моделирования подтверждают, что использование приемника СНС в системе управления позволяет обеспечить движение робота по самым различным траекториям с контролируемыми характеристиками погрешности и скорости перемещения.

ГЛАВА 3

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ОБНАРУЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОТКАЗОВ ПРИЕМНИКА СНС В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ НАЗЕМНОГО РОБОТА

3.1. Моделирование и исследование информационных отказов приемника СНС

Причины неустойчивого определения местоположения приемником СНС могут быть различны, они рассмотрены в разделе 1.2. Это могут быть условия, в которых эксплуатируется приемник (города с высотными зданиями, горы, малонаселенные районы, море и т.п.), атмосферные и погодные условия, неисправности самого устройства [129].

При этом в какой-то случайный момент времени приемник перестает обновлять на выходе данные о своем местоположении, и они "замораживаются" на заранее неизвестный период времени. Затем, когда работоспособность приемника восстанавливается, он 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.

Схема моделирования информационных отказов приемника СНС представлена на рис.3.1.



Рисунок 3.1. - Схема моделирования информационных отказов приемника СНС

На рисунке 3.2 представлена схема модели наземного робота с приёмником СНС при работе которого возникают информационные отказы [127]. Для исследования движения робота при возникновении отказов приемника СНС к модели, представленной на рисунке 2.15, после модели приемника СНС добавлен блок *Block_prost*, который в процессе моделирования в некоторый случайный момент времени "замораживает" сигнал на случайный интервал в соответствии со схемой алгоритма на рис. 3.3.



Рисунок 3.2. - Схема моделирования системы управления наземного робота с приёмником СНС, работающим с отказами

Алгоритм работы блока *Block_prost*, рис 3.3, следующий. На рисунке 3.3: t - модельное время; $X_{вход}$, $Y_{вход}$, $X_{выход}$, $Y_{выход}$ - входные и выходные координаты блока *Block_prost*; t_{fix} - момент времени до которого "замораживается" сигнал; t_i - момент времени в который это происходит; τ - длительность интервала "замораживания". Переменные t_i и τ - задаются генераторами случайных чисел. $P_{зад}$ - уровень при превышении которого случайным числом t_i происходит случай "замораживания" сигнала на интервал τ .

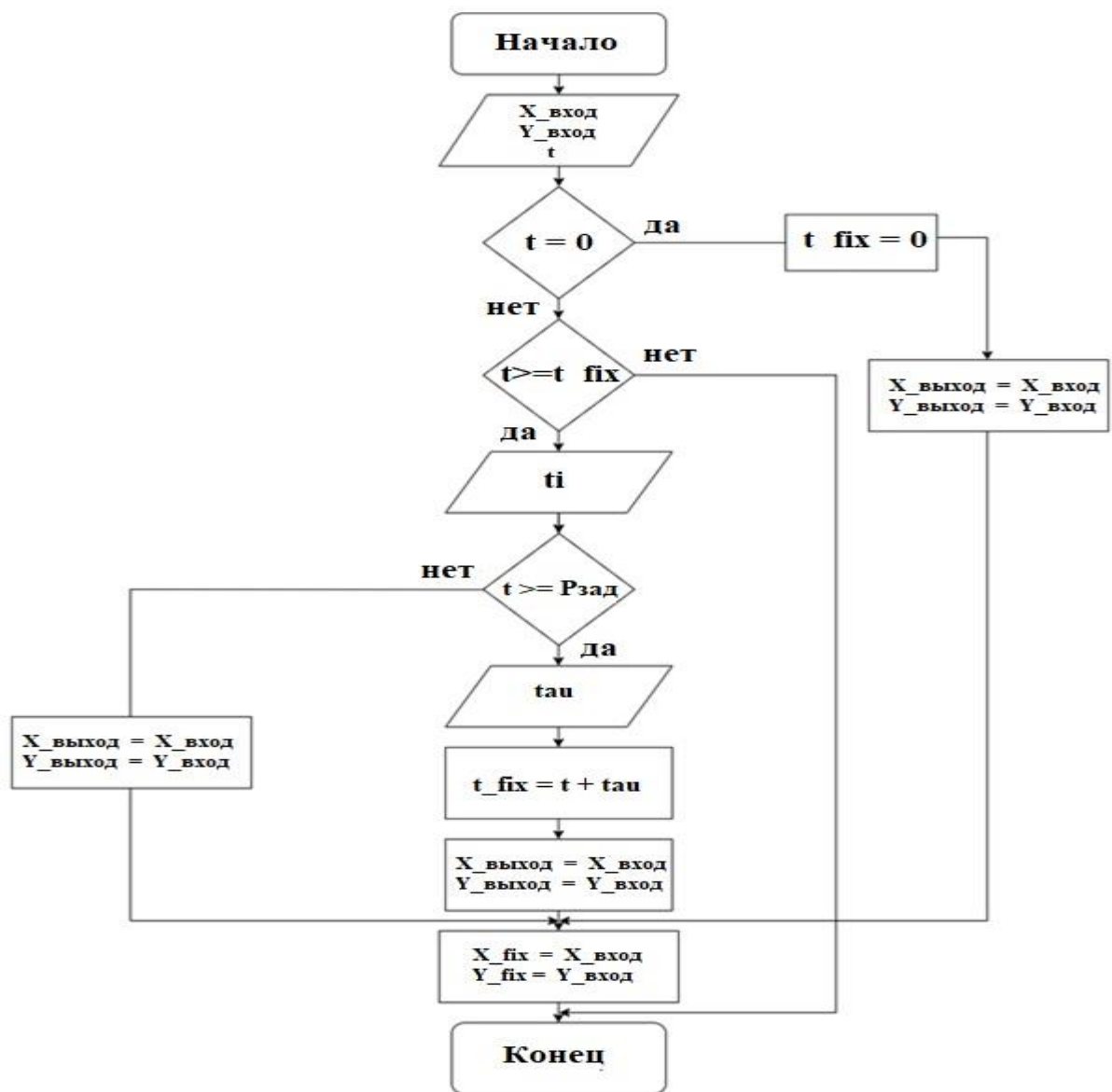


Рисунок 3.3. - Алгоритм моделирования информационного отказа вида "замораживание сигнала" на выходе приемника СНС [127]

На рисунке 3.4 показан пример сигнала приемника СНС вида при возникновении информационного отказа вида "замораживание сигнала".

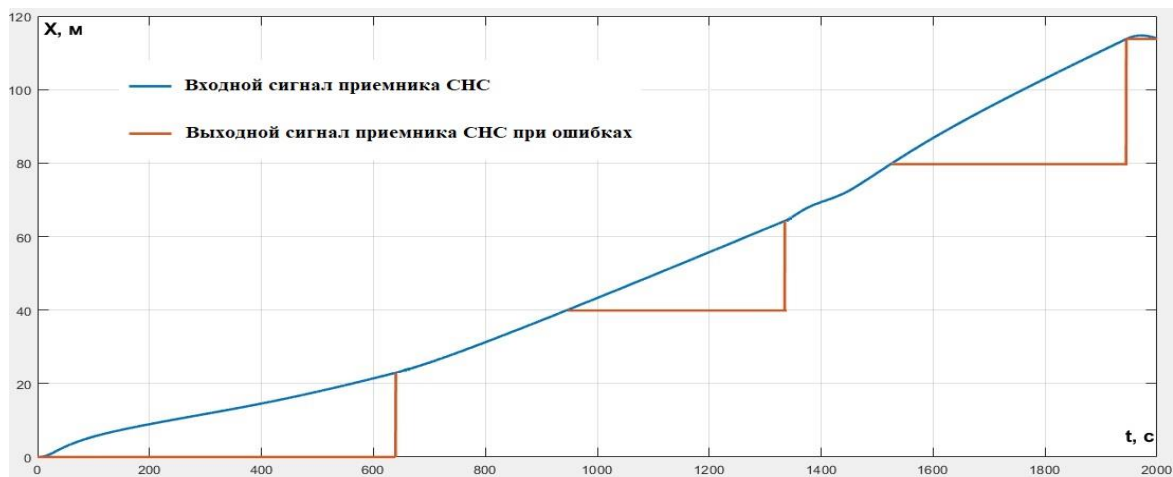


Рисунок 3.4. - Сигнал на выходе СНС приемника при информационном отказе

Когда выходной сигнал с приемника СНС по какой-либо причине "заморожен", а автономный робот продолжает двигаться, то управляющий сигнал формируется неправильно и это приводит к значительному отклонению траектории движения от заданной, рисунок 3.5.

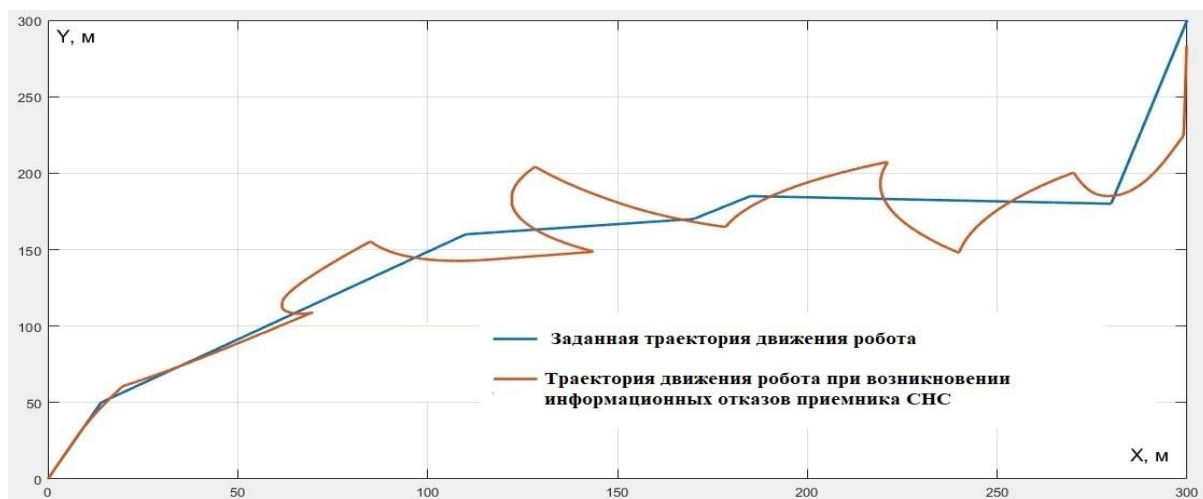


Рисунок 3.5. - Пример движения робота при информационных отказах приемника СНС

При восстановлении правильных координат на выходе приемника СНС робот движется к заданной траектории и погрешность его позиционирования уменьшается. Для исключения слишком больших отклонений от заданной

траектории, можно, например, на время "замораживания" сигнала на выходе приемника СНС прекращать движение робота, а при восстановлении целостности данных продолжать движение. Такой вариант управления движением будет эффективен, если, например, сигнал на выходе приемника СНС "заморожен" по причине отсутствия связи с достаточным количеством спутников. По прошествии некоторого времени спутники изменят свое положение, связь будет восстановлена, координаты определены, и робот сможет продолжить движение.

Как было сказано выше, для определения координат приемника необходимо знать координаты спутников (не менее 4) и дальность от приемника до каждого видимого спутника, которая определяется в навигационном приёмнике с точностью около 1 м. Для удобства рассмотрим простейший «плоский» случай, представленный на рис. 3.6.

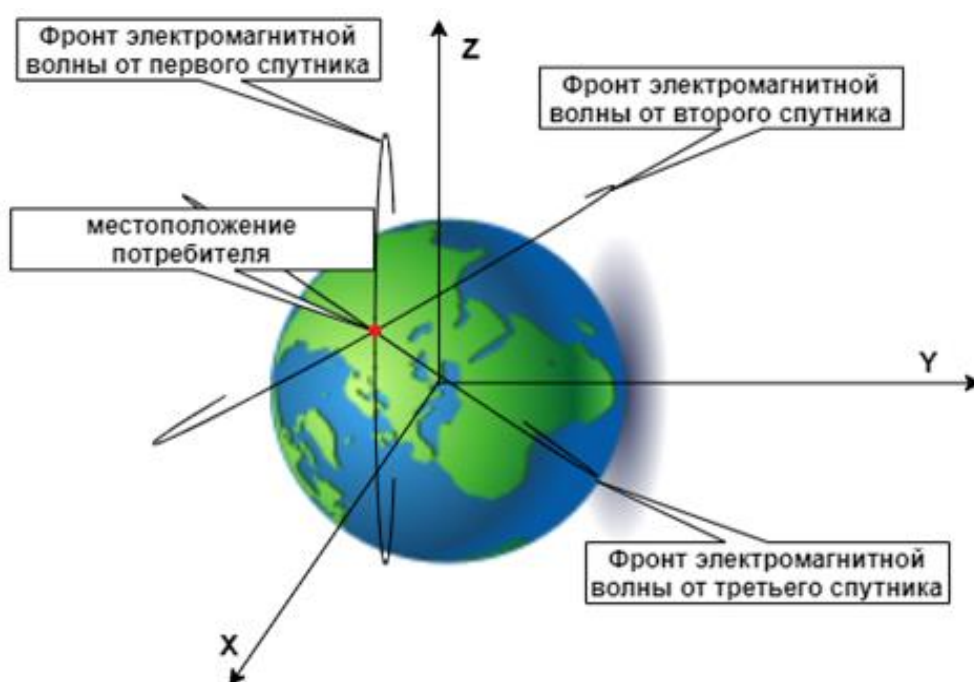


Рисунок 3.6. - Определение местоположения потребителя [116]

Каждый спутник можно представить в виде точечного излучателя. В этом случае фронт электромагнитной волны будет сферическим. Точкой пересечения двух сфер будет та, в которой находится приемник СНС.

Высота орбит спутников составляет около 20000 км. Следовательно, вторую точку пересечения окружностей можно отбросить из-за априорных сведений, так как она находится далеко в космосе.

Однако, чтобы обеспечить точность определения текущих координат местоположения приемника, требуется дополнительно решить задачу обеспечения целостности навигационных данных. Нарушение целостности навигационных данных связано с нарушением целостности радиосигналов навигационных спутников и проявляется в виде наличия резко выделяющихся из ряда измерений параметров этих сигналов. Причиной этого может быть, например, сбой данных о координатах навигационных спутников, что приводит к существенным ошибкам определения текущих координат местоположения.

Вероятность возникновения ошибок и параметров таких ошибок при работе приемника СНС требует изучения и анализа, т.к. эти характеристики необходимы при разработке методов контроля целостности навигационных данных.

Для получения данных об определении местоположения приемника СНС можно использовать различные мобильные навигационные приложения, например, "Real Time GPS Tracker", рис. 3.7 [14, 15].

Статистическая обработка данных на интервалах времени, в которые произошли ошибки определения координат позволяют сделать заключение об их параметрических и временных отличиях от случаев "замораживания" сигнала. С использованием Real Time GPS Tracker в разных местах, в разные промежутки времени и с разными параметрами, были получены следующие результаты определения координат местоположения приемника СНС [130].

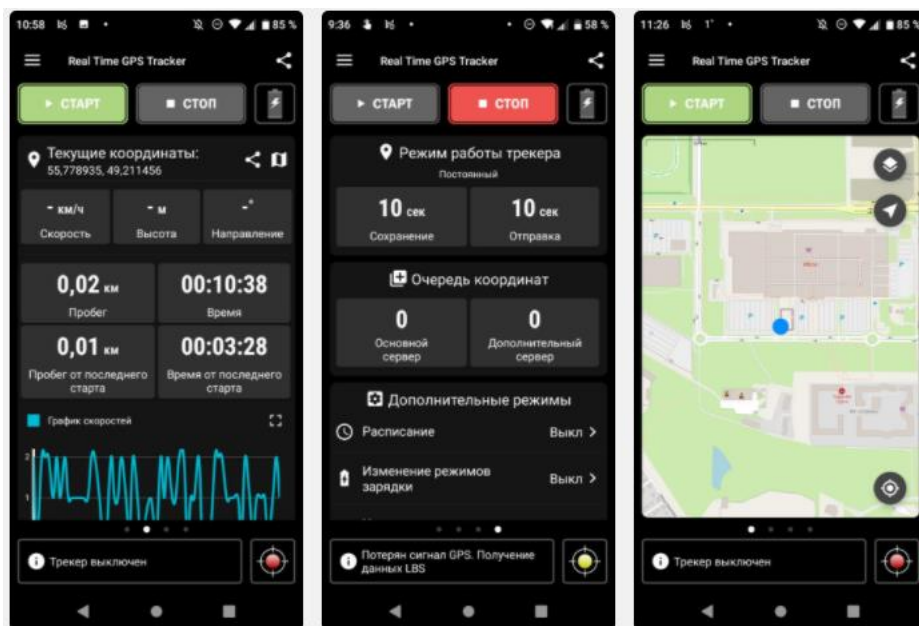


Рисунок 3.7. - Эмулятор аппаратного трекера для передачи GPS-координат в реальном режиме времени для Android - Real Time GPS Tracker [15]

Эксперимент 1.

Измерение координат в точке 54,35 град. широты и 48,38 град. долготы (г. Ульяновск, ул. Розы Люксембург, д.34) в течение 3 часов 10 минут с интервалом в 5 секунд.

Обработка полученных данных долготы

D) Первое место - "Улица Розы Люксембург, Д.34"			
время с 17:52:38 до 21:04:13 (20-04-16 за 3ч10мин)			
со сбором координат 5 сек.			
	Количество измерений	1589	
Мат. ожидание	48,38392784		
Дисперсия	5,05863E-10		
СКО	2,24914E-05		Мат. Ожидание +/- 3 СКО
В диапазон +/- 3 СКО	6,74742E-05		48,38399531
	-6,74742E-05		48,38386037
Количество рез_тов измерений лежит на слева "- 3 СКО"			21
Количество рез_тов измерений лежит на право "+ 3 СКО"			2
			Сумма
Количество результатов измерений лежит за пределами +/- 3 СКО			23



Рисунок 3.8. - Результаты измерения долготы в т. 54,35 град. широты и 48,38 град. долготы

Обработка полученных данных широты

D) Первое место - "Улица Розы Люксембург, Д.34"			
время с 17:52:38 до 21:04:13 (20-04-16 за 3ч10мин)			
со сбором координат 5 сек.			
	Количество измерений	1589	
Мат. ожидание	54,35229442		Мат. Ожидание +/- 3 СКО
Дисперсия	2,88271E-09		
СКО	5,36909E-05		
В диапазон +/- 3 СКО	0,000161073		54,35213335
	-0,000161073		54,35245549
Количество рез_тов измерений лежит на слева "- 3 СКО"			1
Количество рез_тов измерений лежит на право "+ 3 СКО"			0
			Сумма
Количество результатов измерений лежит за пределами +/- 3 СКО			1

ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ШИРОТА, ПОЛУЧЕННАЯ С REAL TIME GPS TRACKER



Рисунок 3.9. - Результаты измерения широты в т. 54,35 град. широты и 48,38 град. долготы

Эксперимент 2.

Измерение координат в точке 54,35 град. широты и 48,38 град. долготы (г. Ульяновск, ул. Розы Люксембург, д.34) в течение 2 часов 30 минут с интервалом в 10 секунд.

Обработка полученных данных долготы

II) Первое место - "Улица Розы Люксембург, Д.34"			
время с 10:24:48 до 12:55:14 (20-04-2020 за 2ч30мин)			
со сбором координат 10 сек.			
	Количество измерений	873	
Мат. ожидание	48,38389508		
Дисперсия	2,10647E-09		
СКО	4,58963E-05		Мат. Ожидание +/- 3 СКО
В диапазон +/- 3 СКО	0,000137689		48,38403277
	-0,000137689		48,38375739
Количество рез_тов измерений лежит на слева "- 3 СКО"			7
Количество рез_тов измерений лежит на право "+ 3 СКО"			8
Количество результатов измерений лежит за пределами +/- 3 СКО			Сумма
			15

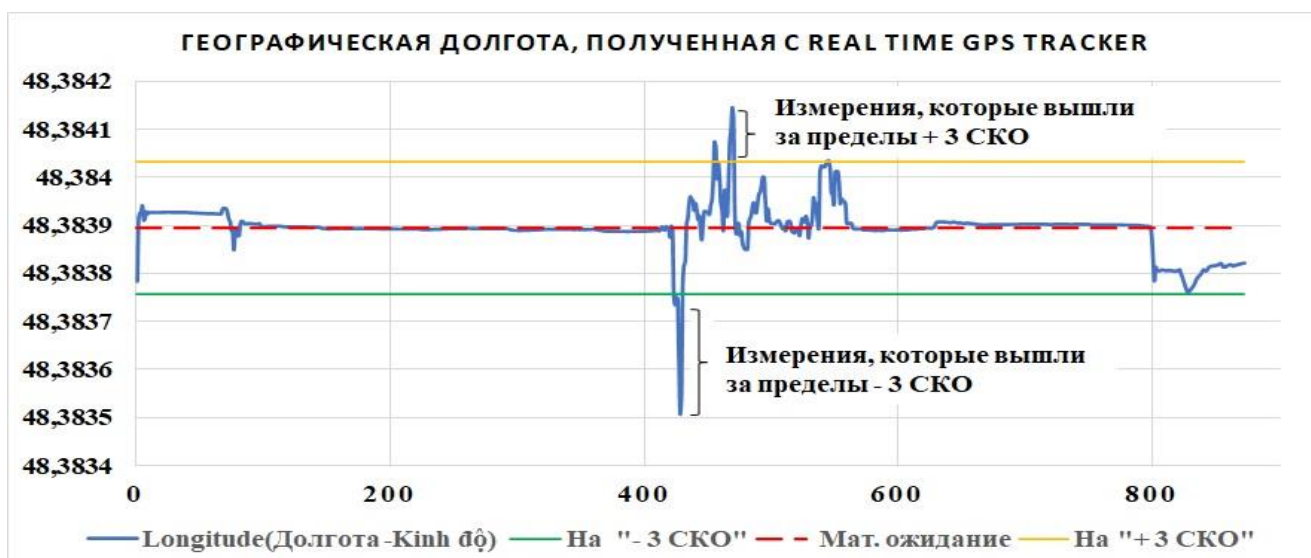


Рисунок 3.10. - Результаты измерения долготы в т. 54,35 град. широты и 48,38 град. долготы

Обработка полученных данных широты

II) Первое место - "Улица Розы Люксембург, Д.34"			
время с 10:24:48 до 12:55:14 (20-04-20 за 2ч30мин)			
со сбором координат 10 сек.			
	Количество измерений	873	
Мат. ожидание	54,35229257		
Дисперсия	9,45967E-09		
СКО	9,72608E-05		Мат. Ожидание +/- 3 СКО
В диапазон +/- 3 СКО	0,000291782		54,35258435
	-0,000291782		54,35200079
Количество рез_тов измерений лежит на слева "- 3 СКО"			5
Количество рез_тов измерений лежит на право "+ 3 СКО"			0
			Сумма
Количество результатов измерений лежит за пределами +/- 3 СКО			5



Рисунок 3.11. - Результаты измерения широты в т. 54,35 град. широты и 48,38 град. долготы

Эксперимент 3.

Измерение координат в точке 54,27 град. широты и 48,30 град. долготы (г. Ульяновск, ул. Камышинская, д.21) в течение 3 часов 20 минут с интервалом в 5 секунд.

Обработка полученных данных долготы со спутников

III) Второе место - "Камышинская улица, Д.21"			
время с 12:52:42 до 16:12:49 (25-04-2020 за 3ч20 мин)			
со сбором координат 5 сек.			
	Количество измерений	1868	
Мат. ожидание	48,3022936		Мат. Ожидание +/- 3 СКО
Дисперсия	1,43854E-08		
СКО	0,000119939		
В диапазон +/- 3 СКО	0,000359818	48,30265342	
	-0,000359818	48,30193378	
Количество рез_тов измерений лежит на слева "- 3 СКО"			19
Количество рез_тов измерений лежит на право "+ 3 СКО"			33
			Сумма
Количество результатов измерений лежит за пределами +/- 3 СКО			52

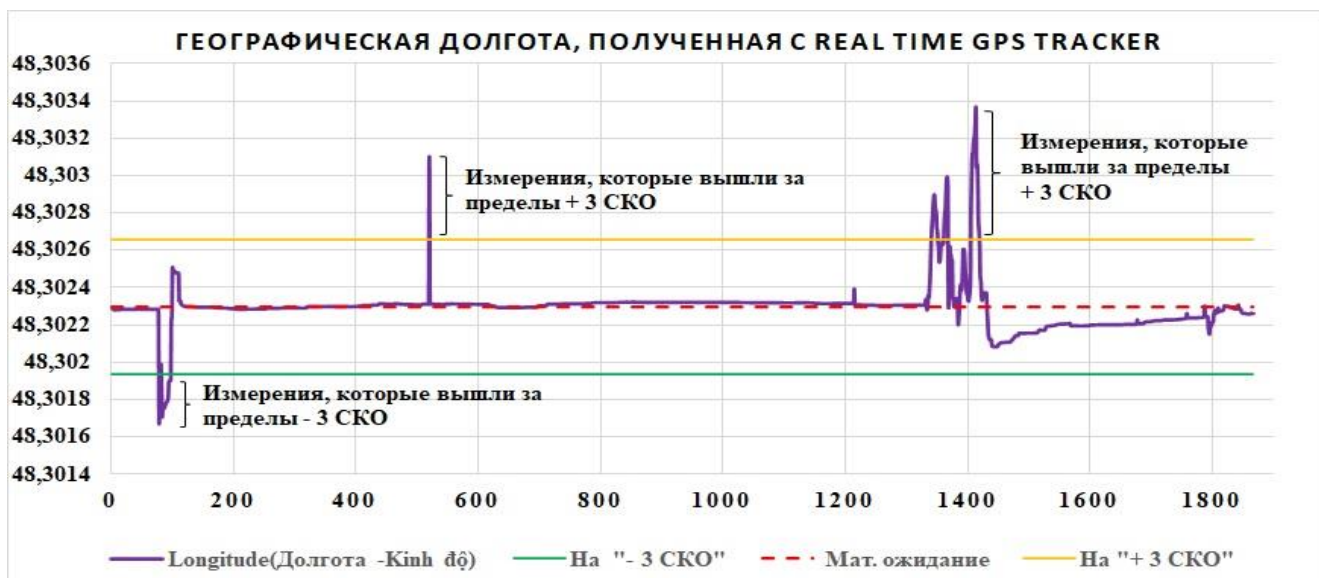


Рисунок 3.12. - Результаты измерения долготы точке 54,27 град. широты и 48,30 град. долготы

Обработка полученных данных широты

III) Второе место - "Улица Камышинская улица, Д.21" время с 12:52:42 до 16:12:49 (25-04-2020 за 3ч20 мин) со сбором координат 5 сек.			
	Количество измерений	1868	
Мат. ожидание	54,27158568		Мат. Ожидание +/- 3 СКО
Дисперсия	1,11771E-08		
СКО	0,000105722		
В диапазон +/- 3 СКО	0,000317165	54,27190285	
	-0,000317165	54,27126852	
Количество рез_тов измерений лежит на слева "- 3 СКО"			23
Количество рез_тов измерений лежит на право "+ 3 СКО"			0
Количество результатов измерений лежит за пределами +/- 3 СКО			Сумма
			23

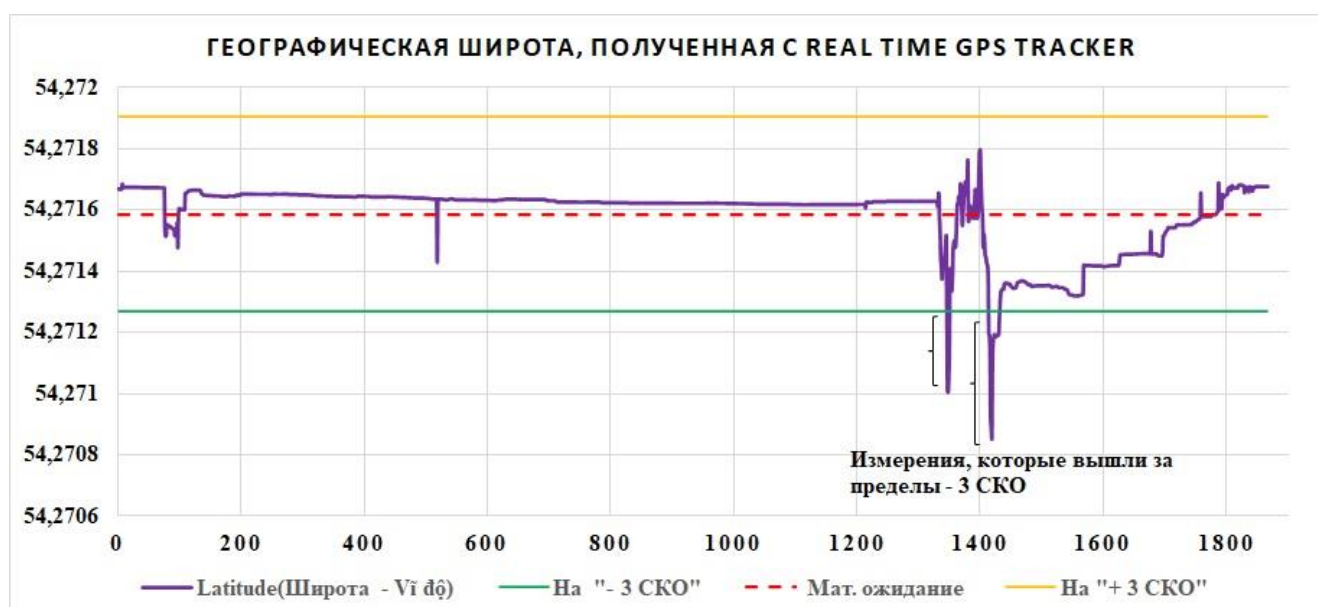


Рисунок 3.13. - Результаты измерения широты в точке 54,27 град. широты и 48,30 град. долготы

Эксперимент 4.

Измерение координат в точке с координатами 54,27 град. широты и 48,30 град. долготы (г. Ульяновск, ул. Камышинская, д.21) в течение 3 часов 02 минут с интервалом в 10 секунд.

Обработка полученных данных долготы

IV) Второе место - "Камышинская улица, Д.21"			
время с 08:46:34 до 11:48:09 (25-04-2020 за 3ч02 мин)			
со сбором координат 10 сек.			
	Количество измерений	988	
Мат. ожидание	48,3022943		
Дисперсия	3,90281E-09		
СКО	6,24725E-05		Мат. Ожидание +/- 3 СКО
В диапазон +/- 3 СКО	0,000187417		48,30248172
	-0,000187417		48,30210689
Количество рез_тов измерений лежит на слева "- 3 СКО"			9
Количество рез_тов измерений лежит на право "+ 3 СКО"			0
			Сумма
Количество результатов измерений лежит за пределами +/- 3 СКО			9



Рисунок 3.14. - Результаты измерения долготы в точке 54,27 град. широты и 48,30 град. долготы

Обработка полученных данных широты

IV) Второе место - "Камышинская улица, Д.21"				
время с 08:46:34 до 11:48:09 (25-04-2020 за 3ч02 мин)				
со сбором координат 10 сек.				
	Количество измерений	988		
Мат. ожидание	54,27161101			
Дисперсия	7,61118E-10			
СКО	2,75884E-05		Мат. Ожидание +/- 3 СКО	
В диапазон +/- 3 СКО	8,27651E-05	54,27152825	54,27169378	
	-8,27651E-05			
Количество рез_тов измерений лежит на слева "- 3 СКО"			1	
Количество рез_тов измерений лежит на право "+ 3 СКО"			1	
			Сумма	
Количество результатов измерений лежит за пределами +/- 3 СКО			2	



Рисунок 3.15. - Результаты измерения широты в точке 54,27 град. широты и 48,30 град. долготы

Результаты экспериментов, представленные в таблицах 3.1-3.8 и на рис. 3.8-3.15 показывают, что ошибки измерения положения статично расположенного приемника СНС возникают достаточно редко, носят кратковременный характер и изменяются в основном скачком или импульсно, т.е. их можно отнести к так называемым аномальным наблюдениям или выбросам, резко выделяющимся в общей выборке данных

3.2. Исследование алгоритма обнаружения информационных отказов приемника СНС на основе невязок фильтра Калмана

В современных условиях, проблема помехозащищенности и информационной надежности спутниковых навигационных систем в управлении мобильными наземными роботами связана с целостностью и достоверностью навигационных определений, которая отражает способность навигационного комплекса непрерывно поддерживать требуемые тактико-технические характеристики в изменяющихся условиях эксплуатации.

Таким образом, основная задача, которую решают алгоритмы автономного контроля целостности навигационных данных заключается в определении возникновения ошибок в полученных навигационных данных, определяемых приемником СНС и выработка сигнала о возникновении информационного отказа, на основе которого в системе управления принимаются различные решения.

Как было показано в главе 1 для мобильных наземных объектов с использованием приемника СНС в системе управления движением предпочтительным является использование методов, которые позволяют автономно контролировать целостность навигационных данных. Большинство существующих алгоритмов автономного контроля целостности навигационных данных основано на методах статистической теории радиотехнических устройств, например, методах оценок (максимального отличия решения; сравнения дальностей; сравнения местонахождения; невязки по методу наименьших квадратов) и фильтрационных методах [58].

Использование фильтрации сигналов для обнаружения ошибок позволяет значительно уменьшить объёмы обрабатываемой информации с сохранением и повышением ее достоверности. Фильтрация позволяет исключить избыточные данные, не приносящие дополнительной информации о положении объекта, а также провести исключение выбросов, которые приводят к искажениям данных и ошибкам в определении местоположения [125].

Наиболее широко и успешно для решения задачи фильтрации и обнаружения ошибок в навигационных данных используется оптимальная фильтрация Калмана.

Она удобна с точки зрения реализации в составе реальной бортовой цифровой вычислительной системы.

Одним из алгоритмов автономного контроля целостности навигационных данных является адаптивно-робастный алгоритм описанный в работе [43]. Данный алгоритм позволяет определять различные виды нарушений целостности навигационных данных, вызванные сбоями и помехами в данных приемника ГЛОНАСС/GPS. Алгоритм основан на контроле невязок фильтра Калмана.

При реализации данного алгоритма контроля достоверности навигационных данных используется следующая структура уравнений оптимальной фильтрации:

$$\begin{aligned}x_{k+1} &= F_{k+1,k} x_k + w_{k+1} \\z_{k+1} &= H_{k+1} x_{k+1} + v_{k+1}\end{aligned}\tag{3.1}$$

где x_{k+1} – вектор состояния размерности n ; w_{k+1} – вектор возмущения размерности n ; z_{k+1} – вектор измерений размерности m ; v_{k+1} – вектор случайных ошибок измерения размерности m ; $F_{k+1,k}$ – матрица состояния системы размера $n \times n$; H_{k+1} – матрица измерений размера $m \times n$.

На основе известной оценки \hat{x}_k в текущий момент времени k дается прогноз оценки для будущего момента $k + 1$ (априорная оценка $\hat{x}_{k+1/k}$), который в дальнейшем скорректируем с учетом текущих измерений z_{k+1} .

Таким образом, в начале такта вычисления $k + 1$ дается прогноз оценки на этот такт по уравнению

$$\hat{x}_{k+1/k} = F_{k+1} \hat{x}_k\tag{3.2}$$

Далее вычисляется оптимальная матрица усиления K_{k+1} , т.е. матрица, при которой среднее значение суммы квадратов ошибок оценивания принимает наименьшее значение. При этом в первую очередь определяется значение априорной матрицы ошибок оценивания P_{k+1} по формуле

$$P_{k+1/k} = F_{k+1,k} P_k F_{k+1,k}^T + Q_k\tag{3.3}$$

где Q_k – ковариационная матрица, действующего на объект

возмущения, размера $n \times n$. Матрицу Q_k задают исходя из свойств определенной системы, как $Q_k = M[w_j w_k^T]$, считая что составляющие вектора w некоррелированы между собой.

Оптимальная матрица усиления вычисляется по уравнению:

$$K_{k+1} = P_{k+1/k} H_{k+1/k}^T [H_{k+1} P_{k+1/k} H_{k+1}^T + R_{k+1}]^{-1} \quad (3.4)$$

где R_{k+1} – неотрицательно определенная матрица шумов измерений размером $m \times m$. Матрицу R_{k+1} задают исходя из свойств определенной системы, как $R_{k+1} = [v_j v_k^T]$, считая что составляющие вектора v некоррелированы между собой.

На следующем такте вычислений необходимо получить значение апостериорной матрицы ошибок оценивания P_{k+1} . Поэтому после вычисления матрицы K_{k+1} определяется:

$$P_{k+1} = [I - K_{k+1} H_{k+1}] P_{k+1/k} \quad (3.5)$$

В конце такта $k + 1$ осуществляется корректировка априорной оценки с учетом текущих измерений:

$$\hat{x}_{k+1} = \hat{x}_{k+1/k} + K_{k+1} (z_{k+1} - H_{k+1} \hat{x}_{k+1/k}) \quad (3.6)$$

В следующем такте (такт $k + 2$) процедура вычислений повторяется вновь на основе найденных для такта $k + 1$ значений \hat{x}_{k+1} , P_{k+1} .

Роль начальных условий выполняют следующие априорные оценки:

$$\hat{x}(0) = M[x(0)]; P_0 = M[x(0)x^T(0)] \quad (3.7)$$

Более подробно эти уравнения оптимальной фильтрации рассматриваются, например, в работе [117].

В качестве параметров вектора состояния системы используются ошибки по координатам в проекциях на инерциальную систему координат, ошибки по проекциям вектора скорости в инерциальной системе, информационные отказы приемника СНС, нулевые сигналы акселерометров, дрейф нулевого сигнала датчиков угловой скорости. Состав вектора состояния выбирается исходя из наиболее значимых составляющих ошибок инерциальной навигационной системы и возможностей бортовой цифровой вычислительной машины. Матрицу состояния

$F_{k+1,k}$ (динамическую модель системы) описывают при помощи уравнений ошибок инерциальной навигационной системы в инерциальной системе координат, при условии редуцированности системы:

$$\begin{cases} \Delta \dot{\vec{R}}_u = \Delta \vec{V}_u \\ \Delta \dot{\vec{V}}_u = -\langle \vec{\psi} \rangle \vec{a}_u + A_{u1} \Delta \vec{a}_1 \\ \dot{\vec{\psi}} = -A_{u1} \Delta \vec{\omega}_1 \\ \Delta \dot{\vec{a}} = 0 \\ \Delta \dot{\vec{\omega}} = 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

где $\Delta \dot{\vec{R}}_u$ – ошибка местоположения; $\Delta \dot{\vec{V}}_u$ – ошибка по проекциям вектора скорости; $\dot{\vec{\psi}}$ – ошибка ориентации; \vec{a}_1 – ускорение в связанной системе координат (ССК), \vec{a}_u – ускорение в ИСК; A_{u1} – матрица ориентации ИСК относительно ССК; $\langle \vec{\psi} \rangle$ – вектор ошибок по углам ориентации; $\Delta \dot{\vec{a}}_1$ – нулевые сигналы акселерометров; $\Delta \dot{\vec{\omega}}_1$ – дрейф нулевого сигнала ДУС.

Таким образом, вектор состояния выглядит, как:

$$x = [\Delta R_{x_u} \Delta R_{y_u} \Delta R_{z_u} \Delta V_{x_u} \Delta V_{y_u} \Delta V_{z_u} \Delta \psi \Delta \theta \Delta \gamma \Delta \vec{a}_{1x} \Delta \vec{a}_{1y} \Delta \vec{a}_{1z} \Delta \vec{\omega}_{1x} \Delta \vec{\omega}_{1y} \Delta \vec{\omega}_{1z}] \quad (3.9)$$

где $\Delta \psi, \Delta \theta, \Delta \gamma$ – ошибки подвеса по углам курса, тангажа и крена.

Матрица $F_{k+1,k}$ на каждом шаге измерений будет иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix}
1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & a_{u,z} & -a_{u,y} & A_{u1}[0][0].\Delta t & A_{u1}[0][1].\Delta t & A_{u1}[0][2].\Delta t & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -a_{u,z} & 0 & a_{u,x} & A_{u1}[1][0].\Delta t & A_{u1}[1][1].\Delta t & A_{u1}[1][2].\Delta t & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & a_{u,y} & -a_{u,x} & 0 & A_{u1}[2][0].\Delta t & A_{u1}[2][1].\Delta t & A_{u1}[2][2].\Delta t & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -A_{u1}[0][0].\Delta t & -A_{u1}[1][0].\Delta t & -A_{u1}[2][0].\Delta t \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -A_{u1}[1][0].\Delta t & -A_{u1}[1][1].\Delta t & -A_{u1}[1][2].\Delta t \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -A_{u1}[2][0].\Delta t & -A_{u1}[2][1].\Delta t & -A_{u1}[2][2].\Delta t \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1
\end{pmatrix} \quad (3.10)$$

В системе предполагается малое изменение нулевых сигналов акселерометров и дрейфа нулевого сигнала ДУС в запуске и масштабных коэффициентов.

Коррекция навигационного решения осуществляется по информации системы управления, к которой подключен приемник СНС. Наиболее информативными параметрами при этом являются геодезические координаты и вектор скорости. Поэтому вектор измерений будет состоять из ошибок по координатам и ошибок по проекциям вектора скорости в инерциальной системе координат:

$$Z = [\Delta R x_u \ \Delta R y_u \ \Delta R z_u \ \Delta V x_u \ \Delta V y_u \ \Delta V z_u]. \quad (3.11)$$

Почти любая ошибка определения навигационных параметров может быть выделена на фоне обновляемой последовательности действительных ошибок оценивания (так называемых невязок фильтра Калмана (ФК)) [43]. Нарушение адекватности математических моделей ошибок и реальных измерительных процессов, а также наличие аномальных наблюдений приводит к расходимости и потере целостности ФК, что проявляется в значительном отличии действительных ошибок оценивания от нуля и от их прогнозируемых среднеквадратичных значений. Таким образом, диагональные элементы матрицы P задаются априорно и могут значительно отличаться от апостериорных ошибок ковариации.

Алгоритм обработки данных по алгоритму, представленному в [43] приведен

на рисунке 3.16. На рисунке 3.16: $z(k)$ - измерения в текущий момент времени; x_0 , p_0 – первоначальные оценки; r - ковариация шума измерения; q - ковариация шума процесса; $t(k)$ - предсказание состояния системы в текущий момент времени; $x(k-1)$ - состояние системы а прошлый момент времени; $n(k)$ - предсказание ошибки; $p(k-1)$ - ошибка в прошлый момент времени; $K(k)$ - усиление Калмана (Kalman Gain); $\hat{x}(k)$ - корректирование априорной оценки с учетом текущих измерений; $p(k)$ - апостериорная матрица ошибок оценивания; $v(k)$ - последовательность невязок фильтра Калмана (ФК); M - математическое ожидание невязки; σ - среднеквадратичное отклонение (СКО) ряда невязок; $\|v^2(k)\|$ - квадраты нормированной невязки.

В соответствии с теорией калмановской фильтрации обновляемая последовательность невязок ФК:

$$v_k = z_k - H_k F_{k,k+1} x_k^{(p)} \quad (3.12)$$

где $F_{k,k+1} x_k^{(p)}$ – априорная оценка вектора ошибок x_k на k -м шаге по $k-1$ измерениям, должна представлять собой белый шум с нормальным распределением.

Процедуры локализации нарушений в навигационном комплексе опираются на технологию поканальной (поэлементной) обработки вектора наблюдений $z_i = \{z_1, \dots, z_m\}$, позволяющей контролировать навигационный комплекс по обобщенным параметрам, характеризующим состояние каждого из m измерительных каналов.

Для контроля i -го измерительного канала предлагается использовать квадрат невязки ФК, нормированной при помощи среднеквадратичного отклонения ее скользящего невзвешенного среднего, рассчитанного на интервале времени, при помощи скользящего окна (D_{win}). Скользящее среднее используется для нормирования, так как оно само по себе является фильтром низких частот, т.е. пропускает низкочастотную активность (долгосрочные циклы), отсекая высокочастотные – случайные колебания.

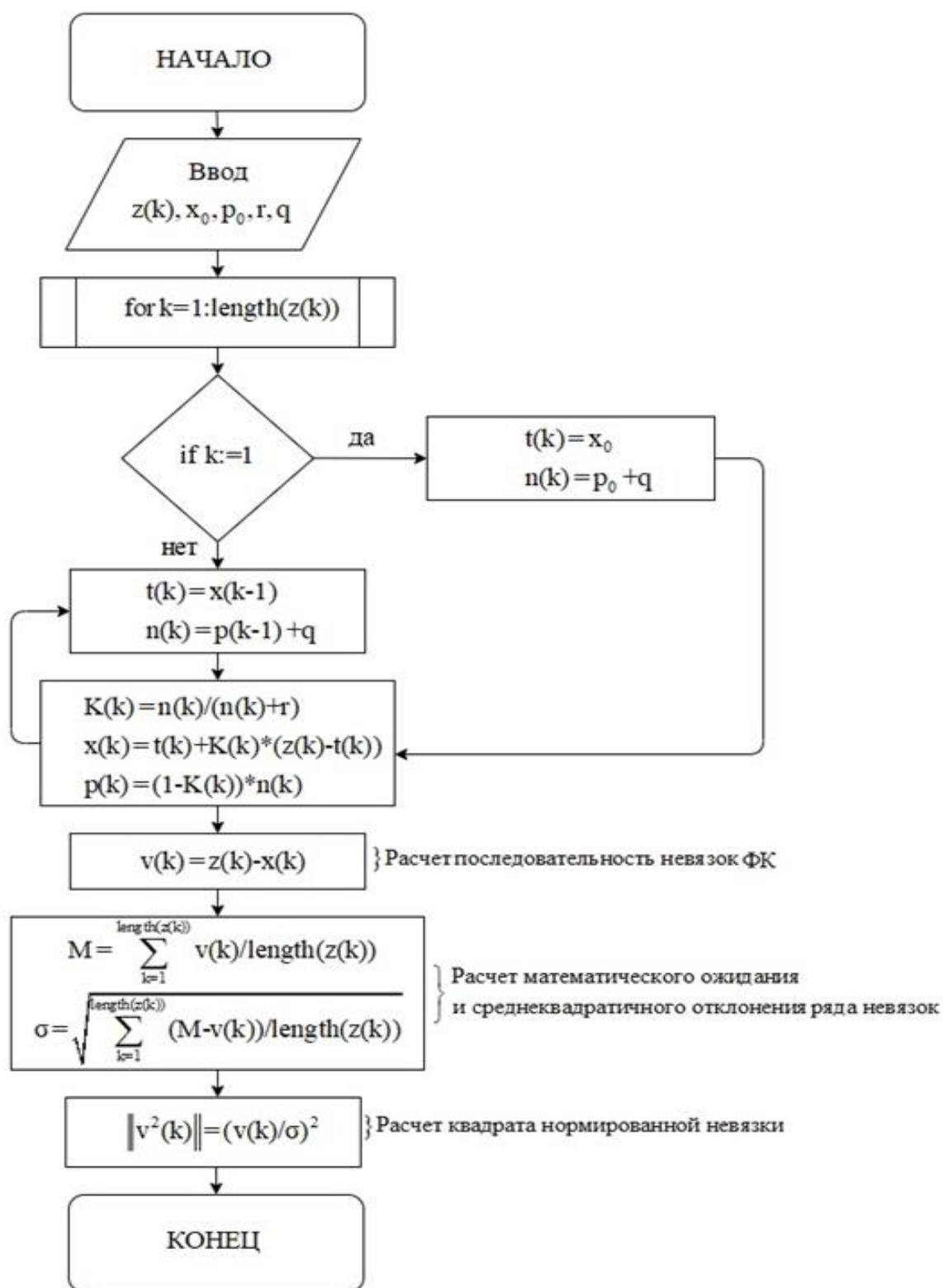


Рисунок 3.16. - Схема обработки данных по алгоритму [43]

Таким образом, за показатель по которому оценивается целостность навигационных данных принят квадрат скользящей средней, совмещенный с квадратом невязки процедурой нормирования.

На первоначальном этапе производится накопление значений математического ожидания и среднеквадратичного отклонения (СКО) ряда невязок до заполнения скользящего окна, используемого для анализа системы. При большей длине окна снижается скорость сходимости значений нормированных невязок к нормальному уровню после обнаружения сбойной информации, кроме того, увеличивается время запуска алгоритма.

На начальном этапе работы алгоритма ($Dwin < 20$) проводятся следующие процедуры для каждого измерительного канала.

- Расчет математического ожидания ряда невязок и простого кумулятивного скользящего среднего модулей невязок в каждом канале, где $i = 1, \dots, 2$ (2 канала по координатам):

$$\begin{cases} M_i = \sum_{j=1}^{oki} v_{i,j} / oki \\ \bar{M}_i = \sum_{j=1}^{oki} |v_{i,j}| / oki \end{cases}, \quad (3.13)$$

где M_i – математическое ожидание невязки в i -м канале; \bar{M}_i – кумулятивное скользящее среднее модуля невязки в i -м канале; $v_{i,j}$ – невязка в i -м канале на текущем такте; oki – общее количество измерений; i – номер канала.

- Расчет СКО ряда невязок и СКО кумулятивного невзвешенного скользящего среднего ряда модулей невязок в каждом канале:

$$\begin{cases} \sigma_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{oki} (M_i - v_{i,j})^2 / oki} \\ \bar{\sigma}_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{oki} (M_i - |v_{i,j}|)^2 / oki} \end{cases}, \quad (3.14)$$

где σ_i – СКО ряда невязок в i -м канале; $\bar{\sigma}_i$ – СКО скользящего среднего ряда модулей невязок в i -м канале.

СКО скользящего среднего модулей невязок $\bar{\sigma}$ рассчитывается на всем протяжении проведения измерений, т.е. является кумулятивным, и необходимо для определения нижней границы знаменателя нормированной невязки.

В штатном режиме функционирования алгоритма проводятся следующие процедуры для каждого измерительного канала:

- Расчет квадрата нормированной невязки:

$$\|v_i^2\| = (v_{i,j} / \sigma_i)^2, \quad (3.15)$$

где $\|v_i^2\|$ - квадрат нормированной невязки в i -м канале.

- Коррекция математического ожидания при помощи скользящего окна:

$$M = \left(\sum_{j=oki-D_{win}}^{oki} v_{i,j} \right) / D_{win}. \quad (3.16)$$

- Коррекция СКО ряда невязок при помощи скользящего окна:

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_{j=oki-D_{win}}^{oki} (M_i - v_{i,j})^2 / D_{win}}. \quad (3.17)$$

- Коррекция кумулятивного скользящего среднего и его СКО на всей траектории движения при условии вхождения нормированной невязки в допусковый интервал (используется для определения нижней границы знаменателя нормированной невязки):

$$\begin{cases} \bar{M}_i = \sum_{j=1}^{oki} |v_{i,j}| / oki \\ \bar{\sigma}_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{oki} (\bar{M}_i - |v_{i,j}|)^2 / oki} \end{cases}. \quad (3.18)$$

Допусковый интервал для квадрата нормированной невязки выбирается исходя из статистических свойств нормированной невязки, а именно: при отсутствии рассогласования между реальными z_k и прогнозируемыми $H_k F_{k,k+1} x_k^{(p)}$ наблюдениями квадрат нормированной невязки имеет распределение χ^2 с определенной вероятностью. При условии того, что была выбрана длина окна D_{win} , выбирается табличное значение критерия χ^2 для D_{win} степеней свободы с некоторой вероятностью $\varphi : \chi^2(\varphi, D_{win})$. Так как критерий χ^2 оценивает совокупность элементов ряда с единичной нормой $\left(\sum_{j=1}^{D_{win}} v_j^2 \right)$, то для приведения

нормы к единичной (т.е. нормирование каждой невязки по уровню 3σ вместо σ) для оценки одного элемента используют величину $\alpha = \chi_{3\sigma}^2(\varphi, D_{win})/D_{win}$.

Однако, вследствие особенностей измерителей комплексных систем, выбор вероятности φ целесообразно проводить апостериорно после оценки уровня нестационарностей, присущих конкретным измерителям.

Квадрат нормированной невязки формируется по текущей невязке и отражает текущее состояние i -го канала вектора наблюдений. Его отклонение от допуска ($\|v_i^2\| > \alpha$) связано с типом ошибок, возникающих в навигационном канале.

Таким образом, данный алгоритм позволяет определять наличие ошибок в последовательности навигационных данных на основе невязок ФК. При этом, как следует из данных работы [43] алгоритм хорошо срабатывает в случае кратковременных сбоев, когда невязки достаточно резко возрастают и выходят из допускового канала. В тоже время случай, когда приемник СНС перестает обновлять данные на выходе, т.е. происходит "замораживание" сигнала требует отдельного рассмотрения т.к. в алгоритме характер накопления невязок и формирование допуска ($\|v_i^2\| > \alpha$) может отличаться от случая импульсных или скачкообразных помех.

Для определения указанных параметров алгоритма для различных видов ошибок нужно смоделировать систему управления наземным мобильным роботом с контролем информационных отказов приемника СНС на основе рассмотренного алгоритма, рис. 3.17 [128, 130].



Рисунок 3.17. - Схема моделирования системы управления мобильным роботом с контролем информационных отказов приемника СНС на основе невязок фильтра Калмана [128]

Результаты моделирования в случае "замораживания" сигнала на выходе приемника СНС приведены на рисунках 3.18 – 3.20.



Рисунок 3.18. - Результат моделирования обнаружения отказов вида "замораживание" сигнала на выходе приемника СНС на основе невязок ФК [130]

На рис. 3.18. моделировалось движение робота по заданной траектории в течение 7000 секунд, во время движения по траектории робота сигнал "замораживался" на интервалы от 1000 до 1700 секунд, от 3000 до 3700 секунд и от 5000 до 5700 секунд.



Рисунок 3.19. - Результат моделирования обнаружения информационного отказа приемника СНС на основе невязок ФК

Для детализации процессов на рис. 3.19. приведены результаты моделирование движения робота в течение 7000 секунд, в траектории робота, а сигнал "замораживался" на период от 3000 до 4500 секунд.

На рис. 3.18, 3.19 видно, что при "замораживании" сигнала значения невязок фильтра Калмана начинают нарастать и затем возвращаются к малым значениям при восстановлении корректного определения положения робота.

При этом видно, что нарастание значений невязок идет достаточно медленно, в отличие от случая скачкообразного изменения навигационных данных. Поэтому необходимо также рассмотреть обнаружение информационных отказов в случае достаточно кратковременных, но многочисленных "замораживаний" сигнала приемника СНС.

На рис. 3.20 приведены результаты моделирования системы управления наземным мобильным роботом при кратковременных, но многочисленных "замораживаниях" сигнала приемника СНС. Траектория движения наземного мобильного робота была аналогична реализованной в предыдущих случаях моделирования, рис. 3.20 а. Полное время движения робота также составляло 7000 с. Во время движения по заданной траектории у приемника СНС происходят информационные отказы между 1150–1200 сек. и 3750–3800 сек. с прерыванием каждые 2 секунды. Как видно на рисунке 3.20 б это приводит к росту квадрата нормированных невязок ФК на данных участках.

Детализация результатов моделирования возникновения информационных отказов и их определения на основе невязок фильтра Калмана показаны на рисунке 3.20 в, г.

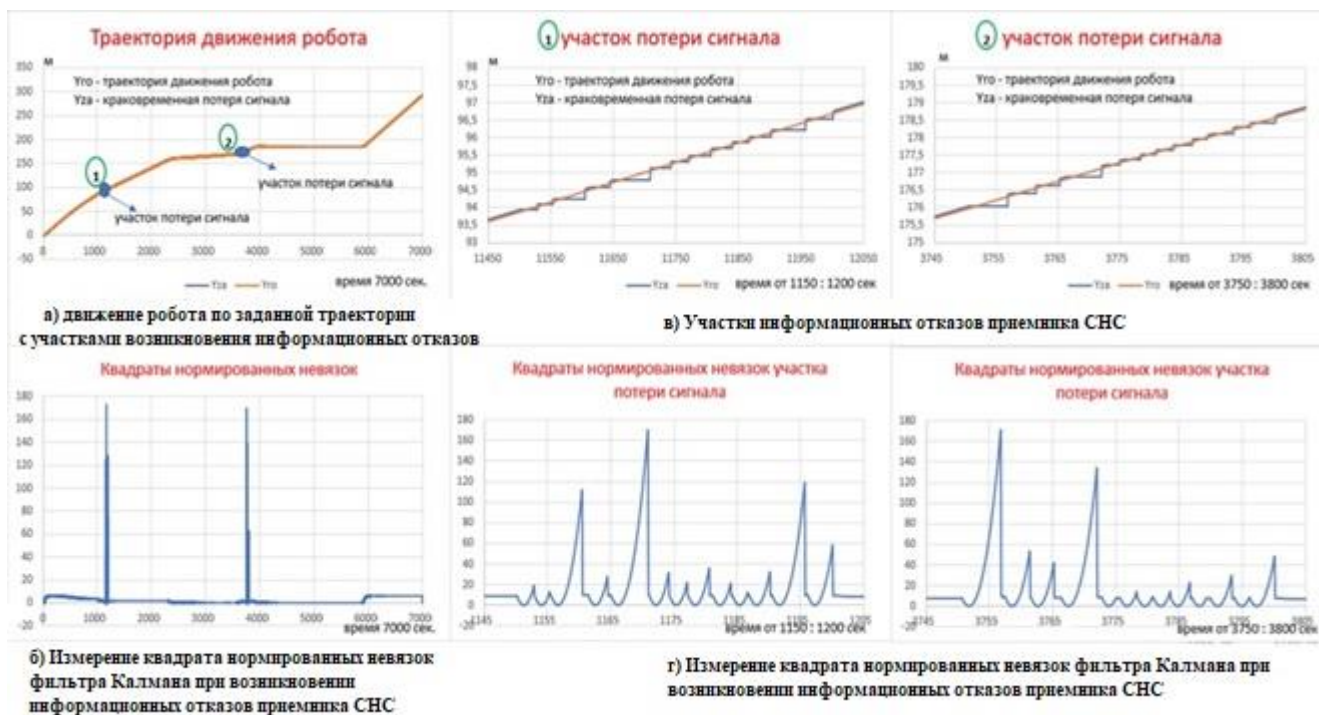


Рисунок 3.20. - Результат моделирования обнаружения кратковременных информационных отказов приемника СНС на основе невязок ФК

Таким образом, алгоритм на основе суммирования невязок фильтра Калмана в скользящем окне позволяет выявлять самый распространенный информационный отказ при работе СНС - "замораживание" данных на выходе приемника,

возникающее по различным причинам. При этом нарастание суммы невязок происходит постепенно и, следовательно, для диагностики подобного отказа требуется некоторое время, оценку которого также необходимо провести, т.к. на этом интервале движение робота будет происходить с нарастанием отклонения от требуемой траектории.

3.3. Алгоритм контроля информационного отказа приемника СНС определением "замораживания" сигнала

Как показало исследование описанного в [54] алгоритма он позволяет обнаруживать ошибки навигационных данных на выходе приемника СНС заключающиеся не только в аномальных скачкообразных изменениях, но и в "замораживании" сигнала. Относительным недостатком алгоритма можно считать его сложность, что при ограниченных вычислительных ресурсах системы управления мобильным роботом может ограничить его применение.

Предполагая, что робот непрерывно движется по заданной траектории (т.е. его координаты изменяются) сам факт прекращения изменения навигационных данных на выходе приемника СНС говорит о том, что произошёл информационный отказ и сигнал "заморожен". Для определения прекращения изменения навигационных данных можно предложить следующий алгоритм.

Пусть $\{X_i\}$ временной ряд, являющийся реализацией случайного процесса $X(t)$, описывающего изменение некоторой переменной (в рассматриваемом случае - любой из координат мобильного робота). Тогда "замораживание" выходного сигнала означает, что существует ряд значений X_i , $i = j, j+k$ таких, что $X_j = X_{j+1} = \dots = X_{j+k}$, где имеется в виду равенство с точностью, равной точности приемника СНС.

Пусть $P_\rho = \frac{n}{N+n}$ - вероятность того, что ρ значений $X_j, X_{j+1}, \dots, X_{j+\rho-1}$ лежат друг от друга на расстоянии, не большем, чем точность определения координат приемником СНС, то есть:

$$|X_{j+l_1} - X_{j+l_2}| < \varepsilon, \quad \forall l_1, l_2 : 0 \leq l_1, l_2 \leq \rho-1, \quad (3.19)$$

где n – равные значения выходного сигнала; N – неравные значения выходного сигнала; ε - указанная точность определения равенства сигналов.

Тогда на участке сигнала, где нет "замораживания" $P_r = 0$, а та часть сигнала, для которой $0 < P_r \leq 1$ "заморожена" с тем большей вероятностью, чем ближе P_r к единице [10].

Предложенный алгоритм был реализован в рассматриваемой модели для обнаружения "замораживания" сигнала на выходе приемника СНС. Сигнал с приёмника СНС при возникновении ошибки и результат его обработки алгоритмом определения "замораживания" сигнала представлены на рисунках 3.21, 3.22.

Момент "замораживания" сигнала по рассмотренному алгоритму будет определяться с некоторым запаздыванием, определяемым как количеством k отсчетов, используемых в алгоритме, так и принятым граничным значением ρ .

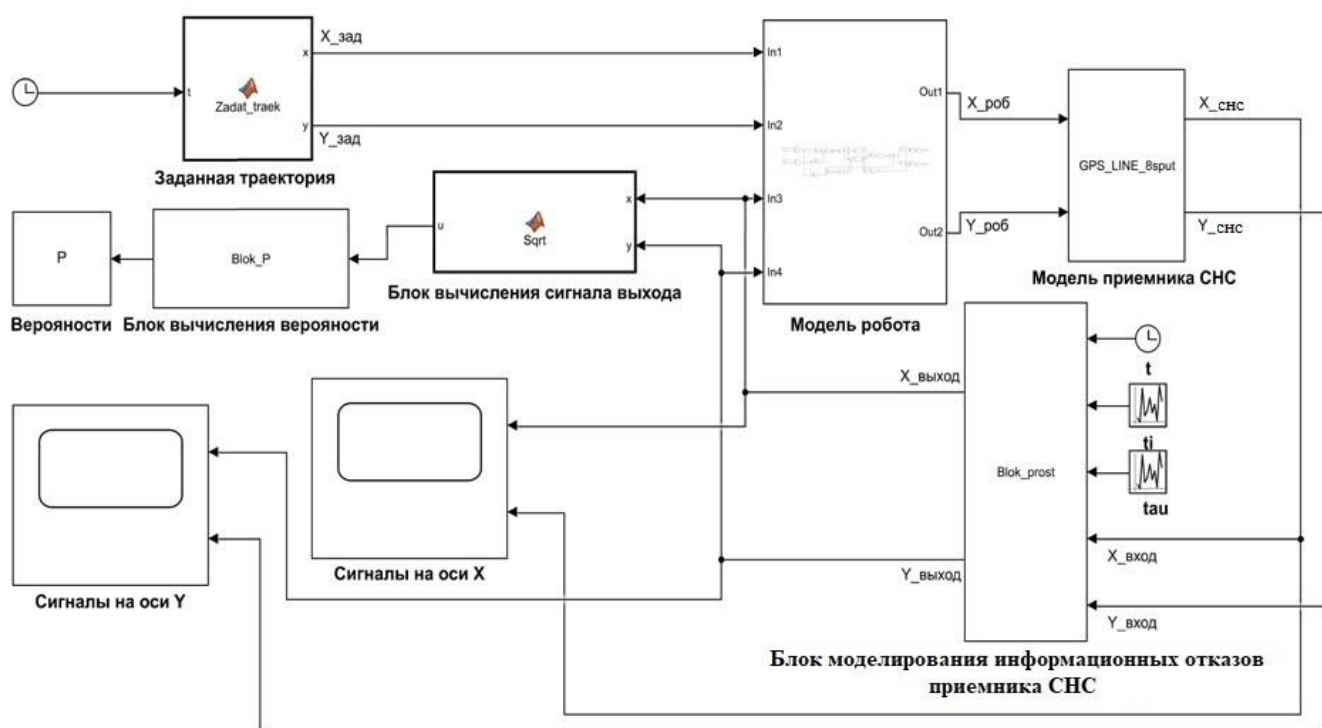


Рисунок 3.21. - Схема моделирования определения "замораживания" сигнала с приёмника СНС

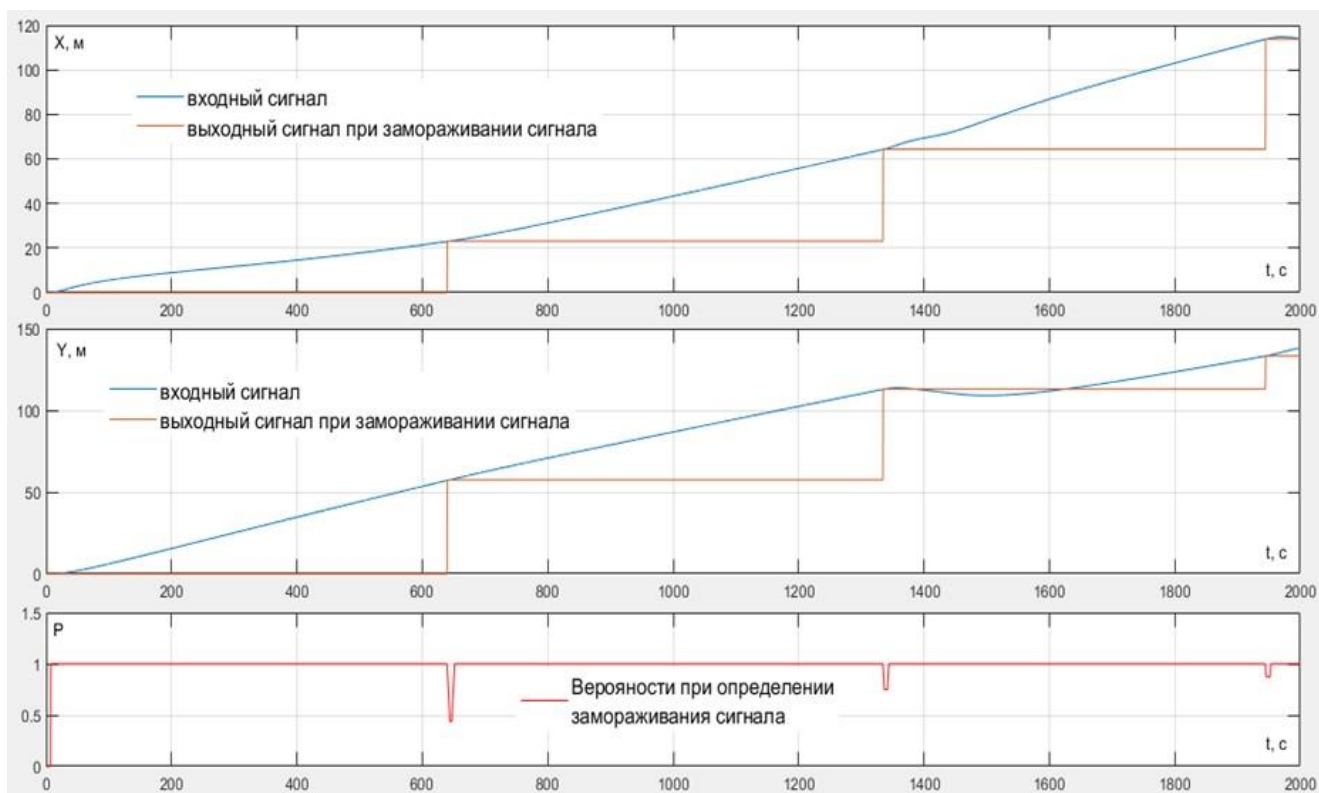


Рисунок 3.22. - Результат определения "замораживания" сигнала на выходе приемника СНС

Существенным недостатком данного алгоритма можно считать то, что он будет корректно работать только в случае движения робота. Если робот, по каким-то причинам не движется, то данные на выходе приемника СНС не будут обновляться, но алгоритм выдаст информацию о возникновении информационного отказа. Поэтому при построении алгоритма необходимо учитывать информацию о фактическом состоянии робота - параметрах движения или остановке.

3.4. Комбинированный алгоритм контроля приемника СНС

Движение наземного робота при выполнении функциональной задачи является, как правило, недетерминированным процессом. В структуре системы управления роботом обычно присутствуют устройства, которые обеспечивают оценку складывающейся ситуации и изменение параметров и траектории движения. Так, например, в мобильных роботах «Инженер» производства компании «Сервосила» в системе управления используются лазерный сканер,

инерциальные датчики, датчики одометрии, система стереозрения и приемник спутниковой навигации [59]. При этом лазерный сканер и система стереозрения предназначены для обнаружения препятствий и корректировки траектории движения для избегания столкновений с ними. Для локализации робота в пространстве используются инерциальные датчики, датчики одометрии, приемник спутниковой навигации.

Таки образом, задача управления плоским движением наземного робота имеет ту особенность, что в процессе выполнения функций робот может неоднократно останавливаться на неопределенное время в разных, заранее неизвестных, точках траектории и затем продолжать движение. Такие остановки могут привести к тому, что при использовании автономных алгоритмических методов оценки навигационных данных может быть сформирован ложный сигнал об их недостоверности.

Для корректного обнаружения недостоверности навигационных данных СНС необходимо учитывать дополнительную информацию о параметрах движения мобильного робота.

Для решения задачи оценки достоверности навигационных данных [65], получаемых с СНС в системе управления наземным мобильным роботом [66, 67], предлагается использовать методы обнаружение неисправностей на основе уравнений соответствия [7].

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:

$$V_{пр} = \frac{(\omega_{п} + \omega_{л})}{2} r_k \quad (3.20)$$

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 :

$$S_2 = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (3.21)$$

Необходимо в процессе движения робота постоянно отслеживать отношение $S = S_2/S_1$, которое при правильной работе СНС будет приблизительно равной величиной ($S \approx \text{const}$). Если же нарушится целостность данных, и в результате произойдет информационный отказ приемника СНС, то координаты на выходе приемника не изменятся и S_2 , а, соответственно, и S , будут равны нулю.

Для вычисления S необходимо знать угловые скорости вращения правого и левого ведущих колес ω_p, ω_l , т.е. использовать информацию с одометров.

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

$$S'_1 = \frac{(U_p + U_l)}{2} \Delta t \quad (3.22)$$

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

Для оценки работы предложенного алгоритма в системах Simulink и MatLab был смоделирован наземный мобильный робот с системой управления на базе приемника СНС, рисунок 3.23.

Моделировалось движение трехколесного робота с двумя независимыми ведущими колесами (блок "Модель робота"), подробно описанного в главе 2 [38]. Модель робота была дополнена моделью СНС (блок "Модель приемника СНС") [73]. При движении робота по заданной траектории в данных о его координатах в модели СНС в случайные моменты времени вводились случайные по длительности интервалы "замораживания" сигнала ("Блок моделирования информационных

отказов приемника СНС"). Моделировалось движение робота по произвольной траектории (блок "Заданная траектория") [86]. Оценка достоверности навигационных данных СНС проводилась по сигналу S' , полученному через управляющие напряжения на двигателях робота по его модели.

При нормальном без информационных отказов сигнале СНС робот следовал по заданной траектории на плоскости XY с допустимыми погрешностями, определяемыми, во-первых, собственной динамикой робота, и, во-вторых, погрешностями определения положения, заданными в модели приемника СНС.

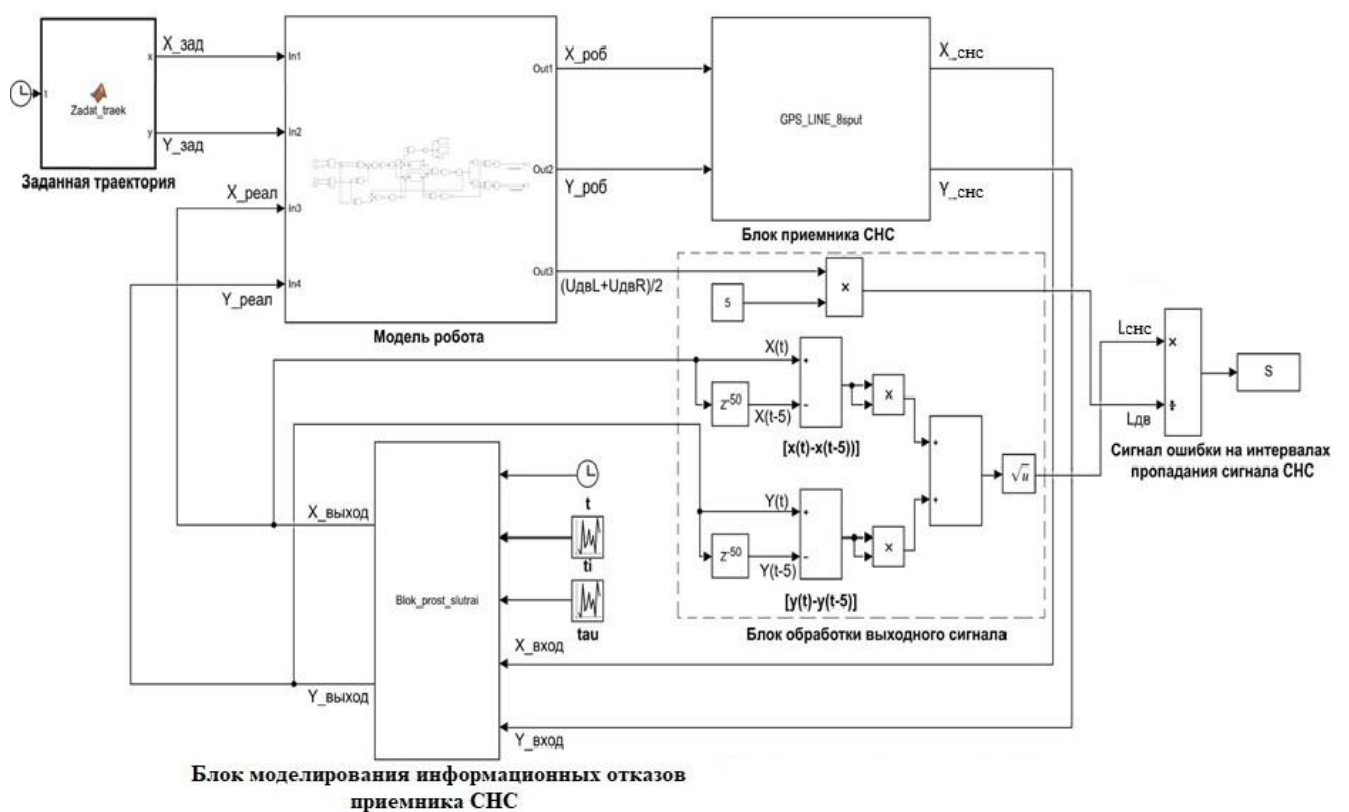


Рисунок 3.23. - Модель мобильного робота с системой управления для определения информационного отказа приемника СНС комбинированным алгоритмом

При задании интервалов "замораживания" сигнала приемника СНС траектория движения робота отличалась от заданной, так как в эти интервалы координаты робота на выходе "Блок моделирования информационных отказов приемника СНС" не обновлялись в соответствии с его перемещением и, следовательно,

управляющий сигнал в системе формировался неправильно, рисунок 3.24.

При восстановлении правильных координат на выходе приемника СНС робот возвращался к заданной траектории и погрешность его позиционирования уменьшалась.

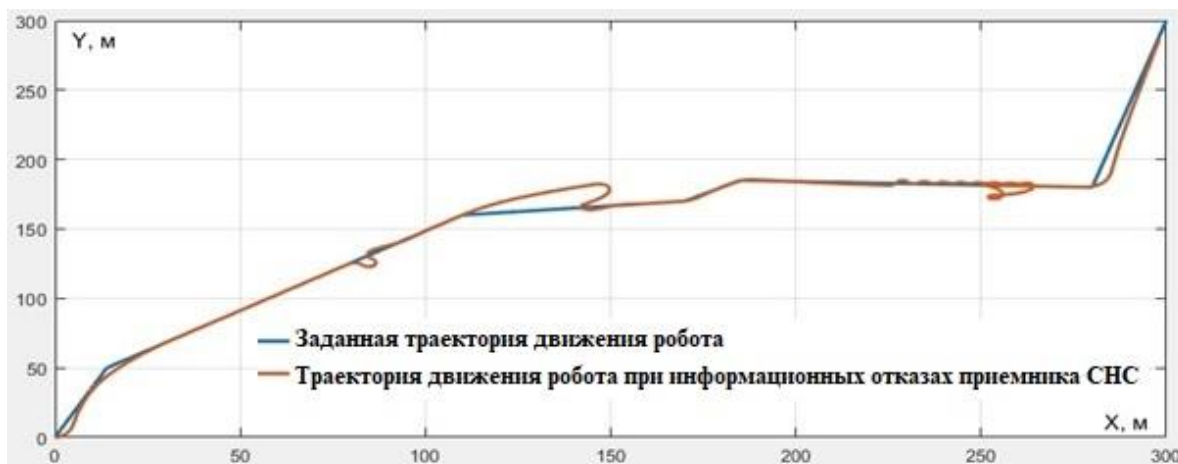


Рисунок 3.24. - Траектории движения робота

Общее время движения робота по траектории, приведенной на рисунке 3.24, составляло 7000 секунд. Для вычисления S_2 и S_1 использовался интервал $\Delta t = 5$ секунд. Результаты работы алгоритма оценки достоверности навигационных данных СНС приведены на рисунке 3.25.

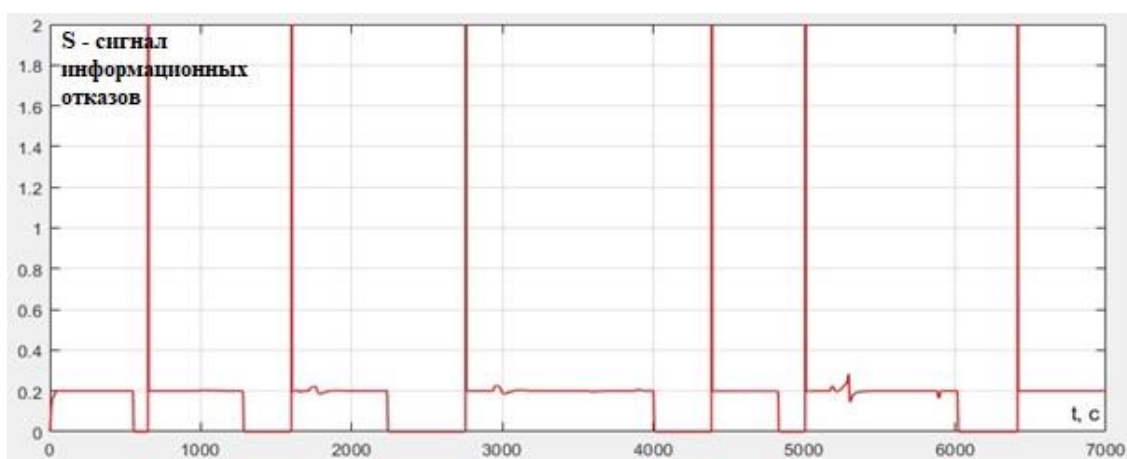


Рисунок 3.25. - Результаты определения информационных отказов приемника СНС

На рисунке 3.25 видно, что в те моменты, когда в данные с приемника СНС возникали информационные отказы величина $S' = 0$. В конце каждого интервала отказа приемник СНС восстанавливает работоспособность и измеряет положение робота, в которое он успел переместиться за время потери сигнала, что вызывает импульсное изменение S' .

По результатам моделирования движения наземного мобильного робота можно сделать вывод, что предложенный алгоритм оценки достоверности данных приемника СНС позволяет определять информационные отказы. По значению сигнала S (или S') можно своевременно переходить на управление от других датчиков, например, одометров, а при восстановлении корректности данных снова возвращаться к управлению от приемника СНС.

Если система управления движением робота является аппаратурно-безызбыточной и не содержит дополнительных датчиков перемещения робота, то для исключения слишком больших отклонений от заданной траектории, можно, например, на время информационного отказа приемника СНС прекращать движение робота, а при восстановлении целостности данных продолжать движение. Такой вариант управления движением будет эффективен, если информационный отказ приемника СНС произошел по причине отсутствия связи с достаточным количеством спутников. По прошествии некоторого времени спутники изменяют свое положение, сигнал восстановится, координаты будут определены, и робот сможет продолжить движение по траектории.

3.5. Исследование быстродействия алгоритмов обнаружения информационных отказов приемника СНС

Как указывалось выше, немаловажным параметром системы управления мобильным роботом будет быстродействие алгоритма определения достоверности навигационных данных, т.к. с момента возникновения отказа приемника СНС и до момента его обнаружения робот будет двигаться по ошибочным данным положения, что приведет к существенному отклонению его от заданной траектории. Поэтому время определения ошибки навигационных данных должно

быть минимальным. Для определения времени, необходимого для определения информационного отказа, заключающегося в "замораживании" сигнала с выхода приемника СНС был проведено исследование и сравнение рассмотренных алгоритмов по быстродействию.

На вход моделей описанных в п. 3.2 и 3.4 задавалась траектория движения робота по «треугольнику». Данная траектория было выбрана потому, что резкое изменение направления движения может вызывать при работе алгоритма обнаружения ошибок сбои, когда изменение направления движения принимается за информационный отказ приемника СНС.

По результатам моделирования требовалось найти время, за которое алгоритм определит возникновение информационного отказа ("замораживание" сигнала) приемника СНС.

При движении робота по траектории «треугольник» так же моделировались случаи "замораживания" сигнала, таб. 3.9.

Таблица 3.9.

Моменты времени и длительность "замораживания" сигнала с приемника
СНС

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

Результат моделирования движения робота приведен на рис. 3.26.

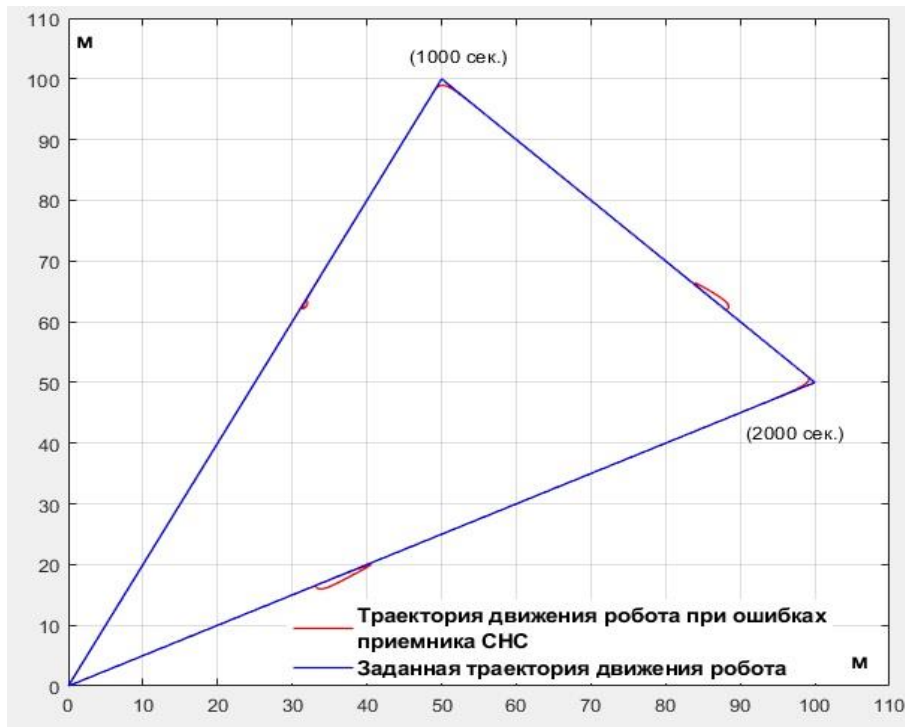


Рисунок 3.26. - Траектории движения робота

На рисунках 3.27 и 3.28 приведены результаты определения ошибок навигационных данных алгоритмом на основе вычисления невязок ФК по п. 3.2.

Диаграмма измерения невязок ФК при информационных отказах приемника СНС



Рисунок 3.27. - График изменения невязок ФК



Рисунок 3.28. - График изменения невязок ФК (увеличенный масштаб)

Информационный отказ приемника СНС определяется от начала момента "замораживания" сигнала t_1 до момента t_2 , при котором нормированная сумма невязок превышает значение заданного порога (в данном случае 10, для того чтобы накопленные невязки ФК, возникающие при резком изменении движения робота, не принимались за информационный отказ приемника). Быстродействие алгоритма обнаружения информационного отказа приемника СНС определяется разностью $\Delta t = t_2 - t_1$ и показывает время на определении отказа.

На рис. 3.27. видно, при заданном пороге что для устойчивого определения отказа с учетом изменений невязок ФК, возникающих при резком изменении траектории движения робота, требуется около $\Delta t = 20$ секунд.

На рисунках 3.29 приведены результаты определения ошибок навигационных данных комбинированным алгоритмом по п.3.4.

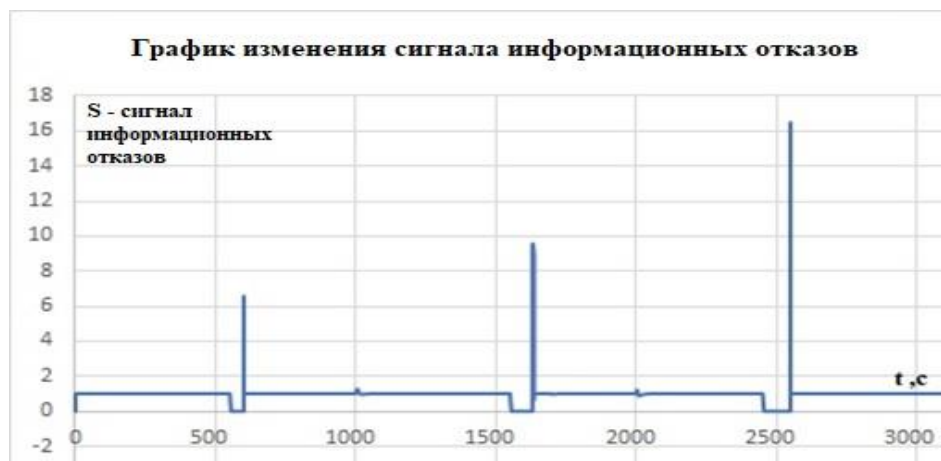


Рисунок 3.29. - График изменения сигнала информационных отказов

Как описано в результатах моделирования в разделе 3.4 в те моменты, когда в данных с приемника СНС возникали ошибки величина $S = 0$. Так как для вычисления S использовалось время на определении ошибки $\Delta t = 5$ секунд, то это и есть быстродействие комбинированного алгоритма.

Результаты двух модельных экспериментов, представленные выше, показали, что время обнаружения ошибок комбинированным алгоритмом обнаружения информационных отказов приемника СНС меньше, чем быстродействие алгоритма обнаружения информационных отказов приемника СНС по невязкам фильтра Калмана. Кроме того, достоинством комбинированного алгоритма так же является то, что время обнаружения информационного отказа в принципе может быть задано, как параметр алгоритма.

3.6. Результаты и выводы

1. Модель наземного робота с системой управления дополнена блоком моделирования информационных отказов приемника СНС, который позволяет задавать отказы различного вида с различными параметрами. Доработанная модель позволяет:

- моделировать возникновение различных информационных отказов приемника СНС вызванных нарушениями целостности навигационных данных;
- оценивать влияние информационных отказов приемника СНС на характеристики движения робота по заданным траекториям;
- разрабатывать и исследовать алгоритмы контроля приемника СНС, целостности навигационных данных;
- реализовывать и исследовать различные способы управления наземным мобильным роботом, учитывающие ошибки в навигационных данных;
- оценивать информационную надежность системы управления движением наземного робота.

2. Проведено моделирование и оценка параметров известного автономного алгоритма обнаружения информационных отказов приемника СНС на

основе контроля нарастания в скользящем окне суммы невязок фильтра Калмана, обрабатывающего выходной сигнал приемника СНС. Результаты моделирования показали, что алгоритм наиболее эффективен при ошибках, которые характеризуются скачкообразным изменением сигнала приемника СНС. При ошибках, характеризующихся “замораживанием” сигнала, для определения нарушения целостности навигационных данных требуется более длительное время (до нескольких десятков секунд).

3. 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. Предложенный алгоритм позволяет эффективно контролировать возникновение информационных отказов, характеризующихся “замораживанием” сигнала на выходе приемника СНС.

4. Модельное исследование разработанного алгоритма автономного контроля приемника СНС показало, что при одинаковых параметрах возникающих отказов приемника СНС, время, необходимое для обнаружения отказов у него меньше (в 3 - 4 раза), чем у алгоритма контроля приемника СНС по невязкам фильтра Калмана. Кроме того, достоинством разработанного алгоритма является то, что время контроля в принципе может быть задано, как параметр алгоритма, что позволяет настраивать его для реализации в системах управления различного быстродействия.

ГЛАВА 4

РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ НА ОСНОВЕ АВТОНОМНОГО КОНТРОЛЯ ПРИЕМНИКА СНС

4.1. Способ управления мобильным роботом на основе автономного контроля приемника СНС

Как показали результаты моделирования, проведенного в 3 главе, движение мобильного робота при информационных отказах приемника СНС, выражающихся в "замораживании" координат на выходе приемника, приводит к значительным отклонениям его от заданной траектории движения.

В главе 1 было рассмотрено, что возможным решением задачи повышения точности управления движением мобильного робота при информационных отказах приемника СНС является комплексирование его с навигационной системой другого типа. Для глобальной навигации чаще всего это инерциальная навигационная система [82]. Но такой подход не лишен определенных недостатков. ИНС малоэффективны в случаях, когда скорость объекта часто и резко меняется. Они так же плохо подходят для задач навигации роботов малого размера, какими обычно являются наземные мобильные роботы. Навигационные версии гироскопов должны устанавливаться на стабильной платформе, их цена достаточно высока. [30].

Если система управления движением робота является аппаратурно-безызыточной и не содержит кроме приемника СНС дополнительных датчиков перемещения робота, то для исключения слишком больших отклонений от заданной траектории, можно, например, на время информационных отказов приемника СНС прекращать движение робота, а при восстановлении целостности навигационных данных продолжать движение. Такой вариант управления движением будет эффективен, если информационный отказ приемника СНС произошел, например, по причине отсутствия связи с достаточным количеством спутников. По прошествии некоторого времени спутники изменят свое положение,

отказ исчезнет, координаты будут определены, и робот сможет продолжить движение по траектории. Время следования робота в точку назначения в этом случае будет заранее неизвестно, непрогнозируемо и, как минимум, возрастет. Если же отказ произойдет по другим причинам (попадание в зону экранирования сигнала от спутников), то без перемещения робота связь может не восстановиться, и робот не сможет автономно закончить движение.

Если в системе управления есть датчики определения локального положения робота, например, одометры, то не используя комплексирование можно при недостоверности навигационных данных с приемника СНС переключаться на управление от них, а при восстановлении целостности данных снова возвращаться к управлению от приемника СНС.

При этом известно, что на практике постоянное управление роботом по координатам, определяемым по данным одометрии, приводит к накоплению значительных погрешностей, т. к. реально пройденные расстояния отличаются от вычисленных по углу поворота и заданному радиусу колес из-за различных влияющих факторов (проскальзывание колес, разные радиусы колес, различие поверхностей, по которым движется робот, и др.). Но, учитывая, что интервалы управления от одометров, в общем случае, будут достаточно короткими (только во время информационных отказов приемника СНС), по сравнению с общим временем движения робота, то использование одометрии не приведет к значительным погрешностям траектории.

В том случае, если система управления движением робота является аппаратурно-безызбыточной и не содержит дополнительных датчиков перемещения, то для исключения слишком больших отклонений от заданной траектории предлагается переходить при нарушении целостности навигационных данных на управление по модели робота. Система в этом случае будет иметь вид, представленный на рисунке 4.1 [67, 68].

Система управления типовой структуры, состоящая из устройства управления (преобразователи, вычислители, двигатели), объекта управления (робот) и датчика положения (приемник СНС), замкнутая обратной связью по

положению, дополнена тремя блоками: блоком определения целостности навигационных данных, который функционирует по одному из рассмотренных в главе 3 алгоритмов, блоком переключения режима работы, и блоком модели робота.

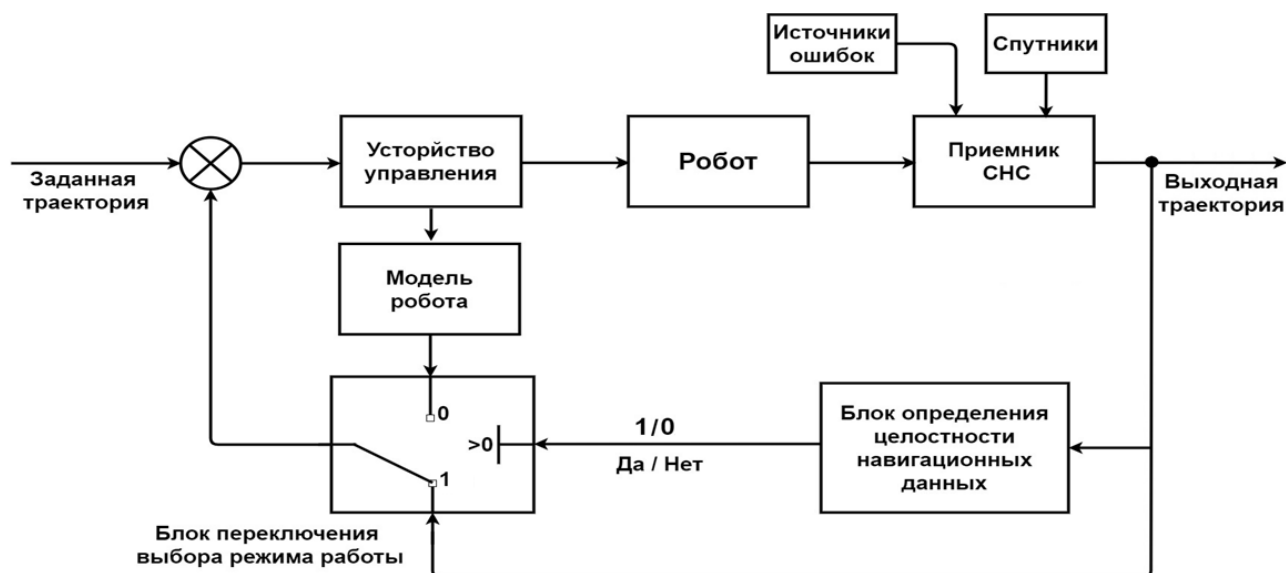


Рисунок 4.1. - Структурная схема системы управления мобильным роботом с выбором режима управления

Система на рис. 4.1 работает следующим образом. При движении робота блок определения целостности навигационных данных постоянно контролирует их и при корректных данных с приемника СНС выставляет признак их целостности по значению сигнала S - «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 информационном отказе и ошибочности данных с приемника СНС (значение «0») в обратную связь поступают координаты робота, вычисленные по его модели. Необходимая для этого модель содержит динамическую модель робота с включением моделей двигателей. Для данной модели входными сигналами являются значения управляющих напряжений на двигатели $U_{\text{п}}$ и $U_{\text{л}}$, а выходными — вычисленные координаты робота. Следовательно, на интервалах информационных отказов приемника СНС управляющее воздействие формируется

по разности координат, определяемых требуемой траекторией движения, и координат, вычисленных по модели робота. В системе происходит выбор режима управления — по измеренным данным положения робота или по данным, вычисленным по его модели.

4.2. Моделирование способа управления мобильным роботом на основе автономного контроля приемника СНС

Для оценки характеристик и особенностей реализации работы предложенного способа в среде Simulink /Matlab был смоделирован наземный мобильный робот с системой управления на базе приемника СНС, блоком обработки выходного сигнала, который реализует алгоритм определения целостности навигационных данных на выходе блока моделирования информационных отказов приемника СНС. В блоке обработки выходного сигнала (совместно с блоком сигнала ошибки на интервалах информационных отказов приемника СНС) был реализован алгоритм определения целостности навигационных данных, описанный и исследованный в п. 3.4-3.5. Для реализации описанного выше способа, в модель был включен блок выбора режима управления, который управляется сигналом S с выхода блока обработки выходного сигнала как описано в предыдущем пункте.

Остальные блоки модели («Заданная траектория», «Модель робота», «Модель приемника СНС», «Блок моделирования информационных отказов приемника СНС») аналогичны тем, которые использовались в моделях, рассмотренных в главах 2 и 3.

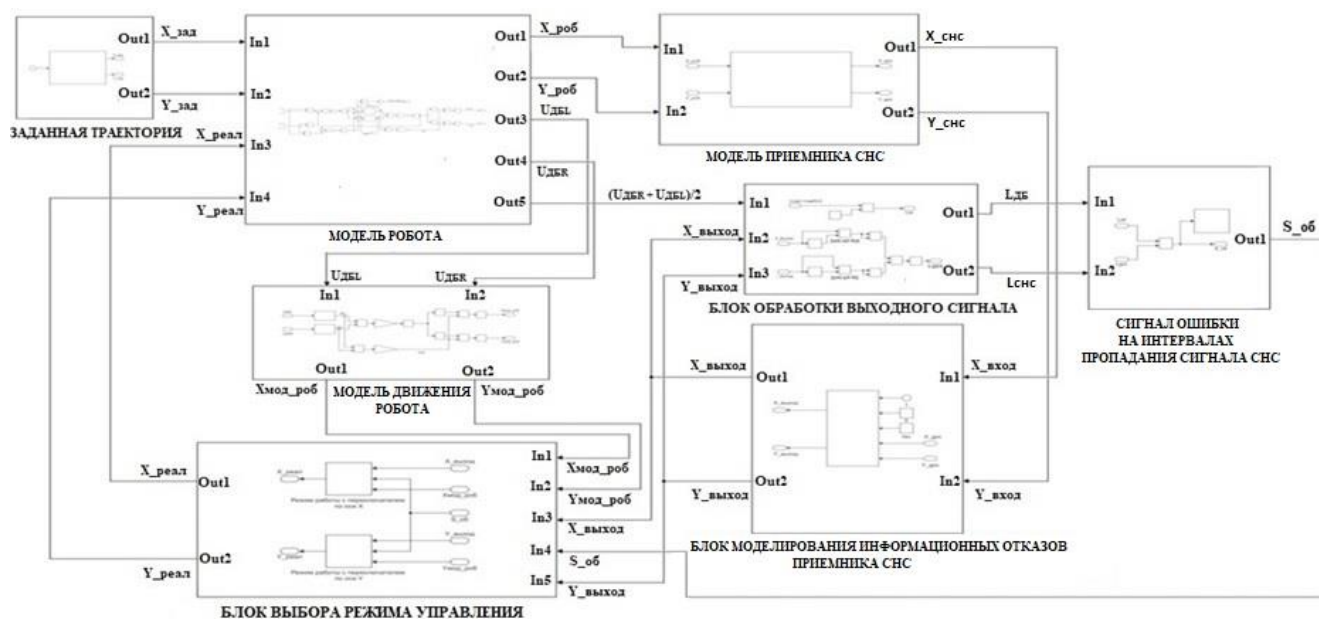


Рисунок 4.2. - Общая модель системы для реализации способа управления мобильным роботом на основе автономного контроля приемника СНС

Моделировалось движение робота по траектории, описанной в п. 2.4.2, параметры информационных отказов приемника СНС были аналогичны реализованным в п. 3.4.

При информационных отказах приемника СНС траектория движения робота, как и в результатах проведенных ранее моделирований, отличалась от заданной, так как в эти интервалы сигнал на выходе приемника СНС не изменяется, и координаты робота на выходе "Блока моделирования информационных отказов приемника СНС" не обновлялись в соответствии с его перемещением и, следовательно, управляющий сигнал в системе формировался неправильно, в этом случае блоки обработки выходного сигнала и вычисления сигнала S на интервалах ошибки навигационного сигнала определяли что $S = 0$.

При нормальном без информационных отказов сигнале с приемника СНС робот следовал по заданной траектории с допустимыми погрешностями, определяемыми, во-первых, собственной динамикой робота, и, во-вторых, погрешностями определения положения, заданными в модели приемника СНС и в этом случае величина сигнала S на интервалах информационного отказа приемника

СНС был не равен нулю $S = \text{const}$.

В том случае, когда навигационные данные с приемника СНС были целостные и $S \neq 0$ через блок выбора режима управления по обратной связи на вход блока модели робота подавались координаты с модели приемника СНС, а в тех случаях, когда возникали информационные отказы приемника СНС и $S = 0$, по обратной связи на вход блока модели робота подавались координаты с модели движения робота.

Результаты моделирования движения робота по траектории при реализации описанного способа управления на рис. 4.4.

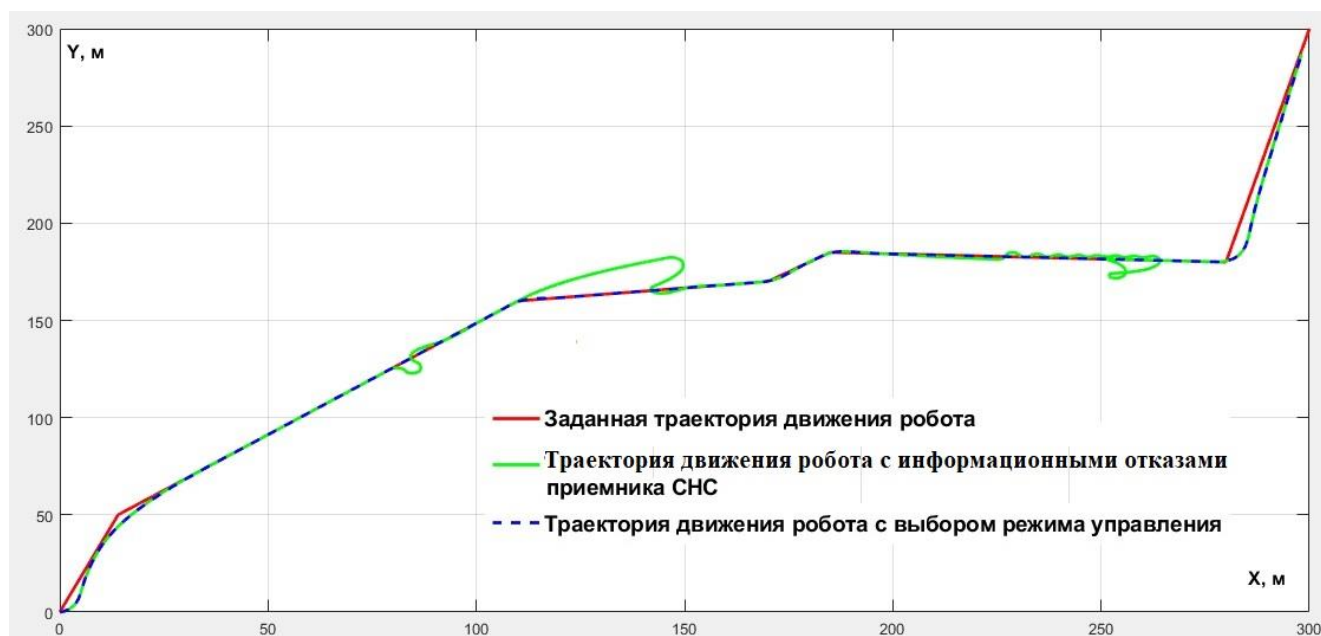


Рисунок 4.4. - Траектории движения робота при возникновении информационных отказов приемника СНС без изменения способа управления и с выбором режима управления

По траекториям, приведенным на рисунке 4.4 видно, что предложенный способ управления позволяет избежать больших отклонений от траектории движения, вызываемых информационными отказами приемника СНС.

Для оценки эффективности способа проведем расчет отклонений траектории движения робота от заданной при возникновении информационных отказов

приемника СНС без изменения способа управления и с выбором режима управления. В каждый момент времени будет оцениваться отклонения по координатам X и Y, возникающие при движении, а так же расстояние L от точки на заданной траектории до точки на реальной траектории движения, рис. 4.5.

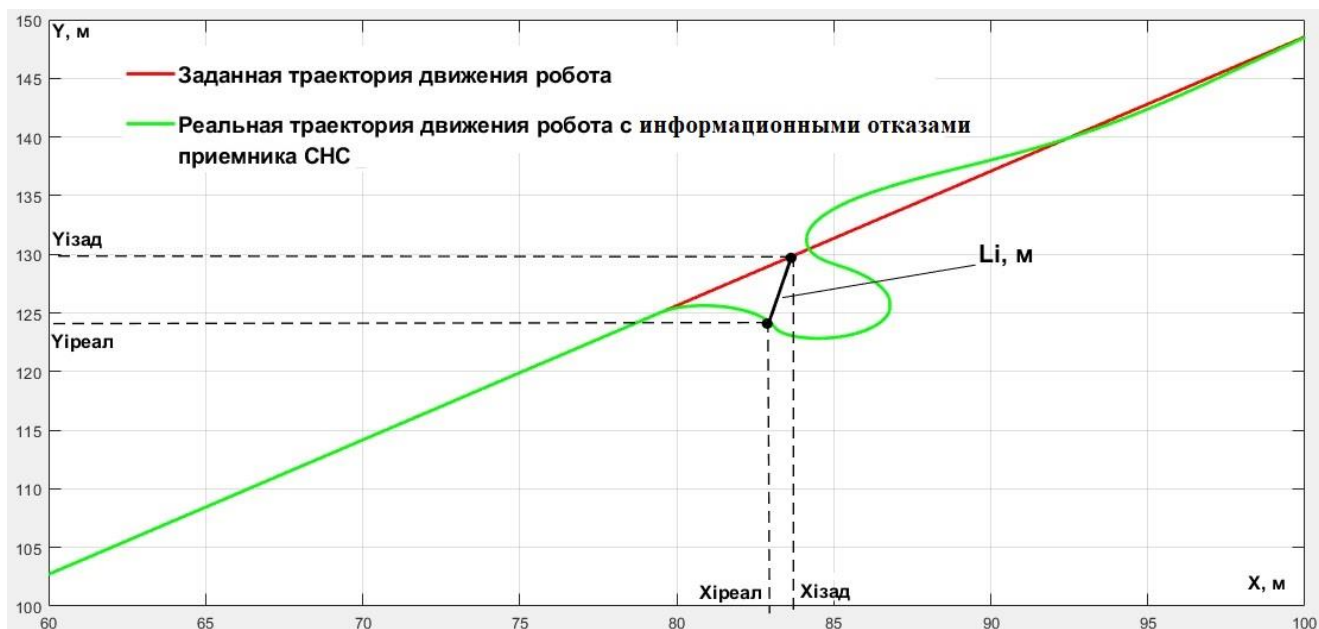


Рисунок 4.5. – Оценка отклонение траектории движения робота от заданной при информационных отказах приемника СНС

Для оценки погрешностей следования мобильного робота по заданной траектории. используем следующие выражения:

- СКО по X:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{i\text{реал.}} - X_{i\text{зад}})^2}{N}} ; \quad (4.1)$$

- СКО по Y:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{i\text{реал.}} - Y_{i\text{зад}})^2}{N}} ; \quad (4.2)$$

- расстояние L и СКО по L:

$$L_i = \sqrt{(X_{i\text{реал}} - X_{i\text{зад}})^2 + (Y_{i\text{реал}} - Y_{i\text{зад}})^2}$$

$$\sigma_L = \sqrt{\frac{\sum_i^N L_i^2}{N}}, \quad (4.3)$$

где $X_{i\text{реал}}$, $Y_{i\text{реал}}$ - реальные координаты X, Y, соответственно,

$X_{i\text{зад}}$, $Y_{i\text{зад}}$ - заданные координаты X, Y, соответственно.

Рассчитаем величины для (4.1) – (4.3) при управлении роботом без переключения.

- СКО по X:

$$\sigma_X^{\text{без_управ.}} = \sqrt{\frac{\sum_i^N (X_{i\text{реал.}} - X_{i\text{зад}})^2}{N}} = 8,47$$

$i=1...70001$;
 $N=70001$

- СКО по Y:

$$\sigma_Y^{\text{без_управ.}} = \sqrt{\frac{\sum_i^N (Y_{i\text{реал.}} - Y_{i\text{зад}})^2}{N}} = 4,50 ;$$

- Расстояние L и СКО по L:

$$L_i = \sqrt{(X_{i\text{реал}} - X_{i\text{зад}})^2 + (Y_{i\text{реал}} - Y_{i\text{зад}})^2}$$

$$\sigma_L^{\text{без_управ.}} = \sqrt{\frac{\sum_i^N L_i^2}{N}} = 9,60$$

Аналогично рассчитаем величины для (4.1) – (4.3) для управления роботом с переключением на управление по модели.

- СКО по X:

$$\sigma_{\bar{X}}^{\text{с.перекл.}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{иреал.}} - X_{\text{изад.}})^2}{N}} = 2,04$$

$i=1 \dots 70001$;
 $N=70001$

- СКО по Y:

$$\sigma_{\bar{Y}}^{\text{с.перекл.}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_{\text{иреал.}} - Y_{\text{изад.}})^2}{N}} = 2,38;$$

- расстояние L и СКО по L:

$$L_i = \sqrt{(X_{\text{иреал.}} - X_{\text{изад.}})^2 + (Y_{\text{иреал.}} - Y_{\text{изад.}})^2}$$

$$\sigma_L^{\text{с.перекл.}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N L_i^2}{N}} = 3,13$$

Сравнительные результаты представлены в таблицах 4.1. 4.2,

Максимальные погрешности траектории движения робота представлены в таблице 4.1, оценка СКО в таблице 4.2.

Таблица 4.1.

Максимальные погрешности траектории движения робота

$\Delta_{\bar{X}}^{\text{без_управ.}}$, м	$\Delta_{\bar{Y}}^{\text{без_управ.}}$, м	$\Delta_{\bar{L}}^{\text{без_управ.}}$, м
32,98	18,80	33
$\Delta_{\bar{X}}^{\text{с.перекл.}}$, м	$\Delta_{\bar{Y}}^{\text{с.перекл.}}$, м	$\Delta_{\bar{L}}^{\text{с.перекл.}}$, м
3,11	5,20	7,29

Таблица 4.2.

Оценка СКО

$\sigma_{\bar{X}}^{\text{без_управ.}}$	$\sigma_{\bar{Y}}^{\text{без_управ.}}$	$\sigma_{\bar{L}}^{\text{без_управ.}}$
8,47	4,50	9,60
$\sigma_{\bar{X}}^{\text{с.перекл.}}$	$\sigma_{\bar{Y}}^{\text{с.перекл.}}$	$\sigma_{\bar{L}}^{\text{с.перекл.}}$
2,04	2,38	3,13

Таким образом, по результатам в таблицах 4.1 - 4.2 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 достаточно высокую эффективность способа для обеспечения точности движения робота при нарушении целостности данных спутникового позиционирования.

4.3. Структура системы управления мобильным роботом со средствами автономного контроля информационных отказов приемников СНС

Для определения структуры системы управления мобильным роботом, в которой можно реализовать рассмотренный выше способ управления с выбором режима управления по результатам автономного контроля приемника СНС рассмотрим известные близкие технические решения.

Так известны мобильные роботы «Инженер» производства компании «Сервосила» [89]. В системе навигационного управления которых используются лазерный сканер, инерциальные датчики (инерциальный измерительный модуль 6DOF IMU, состоящий из одного трехосного микромеханического акселерометра и трех одноосных микромеханических гироскопов), датчики одометрии, система стереозрения и приемник спутниковой навигации. При этом лазерный сканер и система стереозрения предназначены для обнаружения препятствий и корректировки траектории движения для избегания столкновений с ними.

Для определения текущего положения робота в пространстве и управления движением по заданной траектории используются инерциальные датчики, датчики одометрии, приемник спутниковой навигации.

В системе управления мобильным роботом «Инженер» для определения положения робота в пространстве используются нескольких датчиков, что является определенным ее недостатком, так как приводит к росту стоимости, габаритов, энергопотребления, сложности системы.

Другим техническим решением является модуль системы управления мобильным роботом [96], рис. 4.6., который содержит схему преобразователя напряжения электропитания, схему микроконтроллера, схему энергонезависимой памяти, схему приемника ГЛОНАСС/GPS, схему электронного компаса, схему одометра, схему гироскопа, схему датчика ускорения, схему обработки данных видеокамеры, видеокамеру, схему многоканального аналого-цифрового преобразователя, инфракрасный датчик расстояния, ультразвуковой датчик расстояния.

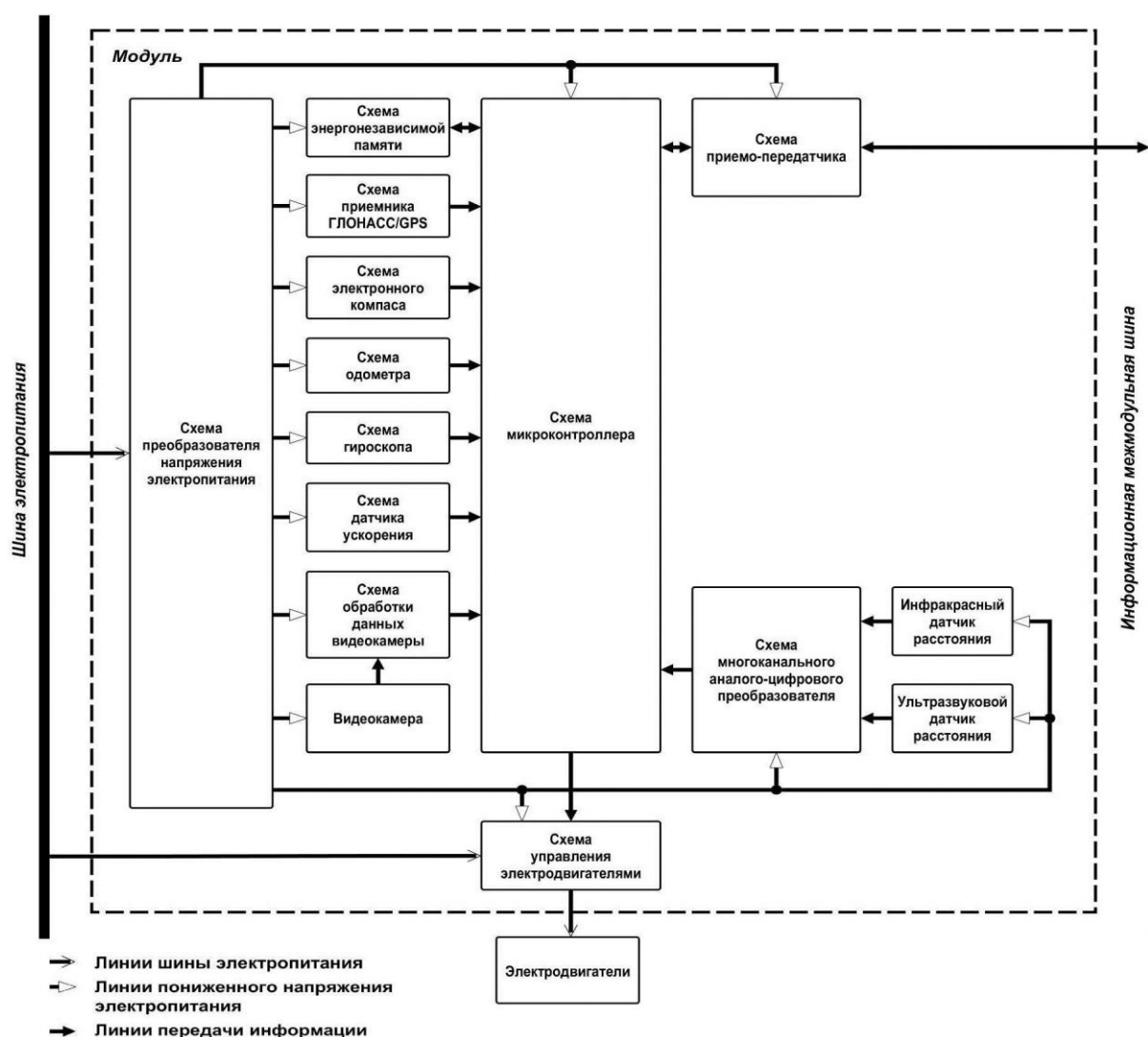


Рис. 4.6. Модуль системы управления мобильным роботом [96]

Данный модуль предназначен для решения задачи управления движением робота в заданном направлении с заданной средней скоростью с избеганием столкновения с препятствиями в недетерминированном пространстве.

Инфракрасный датчик расстояния и ультразвуковой датчик расстояния используются в мобильном роботе для определения расстояния до препятствия.

Для определения положения робота в пространстве и управления движением робота в заданном направлении с заданной скоростью используются несколько датчиков: приемник СНС, электронный компас, одомер, гироскоп, датчик ускорения.

Для обеспечения помехозащищенности и информационной надежности системы управления в модуле реализован принцип аппаратурной избыточности - для определения навигационных параметров используются несколько датчиков, работающих на различных физических принципах.

Используя рассмотренные выше в данной работе алгоритм автономного контроля приемника СНС и способ с выбором режима управления по модели робота при возникновении информационных отказов приемника СНС можно обеспечить упрощение устройства путем создания аппаратурно-безызыточной системы с минимальными энергопотреблением, стоимостью, габаритами, без снижения точности, помехозащищенности и информационной надежности управления движением наземного робота.

Это достигается тем, система управления мобильным роботом должна состоять из ультразвукового датчика расстояния и инфракрасного датчика расстояния, подключенных к многоканальному аналого-цифровому преобразователю, видеокамеры, подключенной к схеме обработки данных видеокамеры, микроконтроллера к которому подключены энергонезависимая память, схема управления электродвигателями, многоканальный аналого-цифровой преобразователь, схема обработки данных видеокамеры и приемника СНС.

Кроме того она должна содержать программно-аппаратный блок выбора режима управления, состоящий из блока моделирования, блока оценки

достоверности навигационных данных и ключевого устройства, при этом выход приемника СНС параллельно подключается ко входу блока оценки достоверности навигационных данных и первому входу ключевого устройства, ко второму входу ключевого устройства подключен выход блока моделирования на вход которого подключен выход микроконтроллера на схему управления двигателями, на управляющий вход ключевого устройства подключен выход блока оценки достоверности навигационных данных, а выход ключевого устройства подключен ко входу микроконтроллера системы.

При этом, аппаратная часть блока выбора режима управления, может быть реализована на микроконтроллере системы.

На рис.4.7 представлена структурная схема системы управления мобильным роботом с автономным контролем приемника СНС [69].

Система содержит ультразвуковой датчик расстояния и инфракрасный датчик расстояния, подключенные к многоканальному аналого-цифровому преобразователю. Многоканальный аналого-цифровой преобразователь преобразует аналоговые сигналы, поступающие с инфракрасного датчика расстояния и ультразвукового датчика расстояния, в цифровую форму и передает их в микропроцессор. Инфракрасный датчик расстояния и ультразвуковой датчик расстояния используются мобильным роботом для определения расстояния до препятствия.

Видеокамера подключена к схеме обработки данных видеокамеры и передает кадры видеоизображения в схему обработки данных видеокамеры, где они обрабатываются и анализируются. Данные результата анализа передаются в микроконтроллер.

Микроконтроллер передает схеме управления электродвигателями данные в цифровой форме о требуемых скорости и направлении вращения электродвигателей робота.

Энергонезависимая память предназначена для хранения в цифровом виде данных для настройки системы и подключена к микроконтроллеру системы. Данные, содержащиеся в энергонезависимой памяти, загружаются в оперативную

память микроконтроллера по мере необходимости. Данные в энергонезависимой памяти могут быть изменены микроконтроллером.

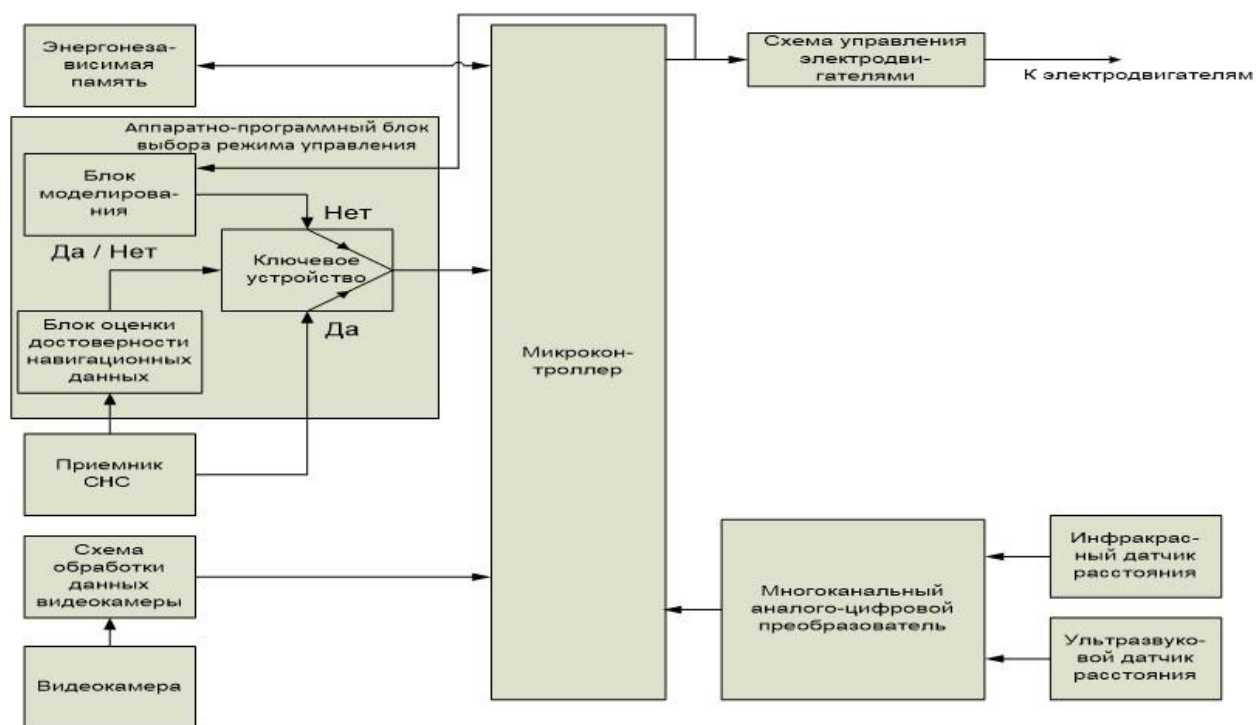


Рисунок 4.7. - Структурная схема системы управления [70]

Приемник СНС получает значения текущих географических координат - широту и долготу, которые необходимы для определения положения робота в пространстве с целью управления движением робота в заданном направлении с заданной скоростью.

Микроконтроллер системы выполняет функции сбора и обработки информации, поступающей от других элементов системы. На основании этой информации микроконтроллер определяет положение робота, расстояние между роботом и возможными препятствиями и осуществляет управление электродвигателями робота таким образом, чтобы обеспечить перемещение робота в заданном направлении с заданной средней скоростью, избегая столкновения с препятствиями.

Программно-аппаратный блок выбора режима управления получает данные

о текущих координатах робота с приемника СНС и данные с микропроцессора на схему управления электродвигателями, определяющие скорость и направление вращения электродвигателей робота. Аппаратная часть блока выбора режима управления состоит из микроконтроллера, с требуемыми для принятия указанных сигналов универсальными цифровыми портами. Блок выбора режима управления передает результат определения координат робота в микропроцессор системы.

Блок оценки достоверности навигационных данных, на который поступают данные с приемника СНС, программно реализует алгоритм контроля целостности навигационных данных, описанный в п. 3.4, который позволяет определять возникновение информационных отказов приемника СНС.

Результатом работы блока оценки достоверности навигационных данных является подача на управляющий вход ключевого устройства сигнала подтверждающего достоверность данных с приемника СНС - "да", либо сигнала недостоверности этих данных - "нет". В зависимости от значения этого сигнала на управляющем входе, ключевое устройство передает на микропроцессор системы либо данные о текущих координатах робота, полученные с приемника СНС (сигнал с блока оценки достоверности навигационных данных имеет значение, подтверждающее достоверность данных с приемника СНС - "да"), либо данные о координатах робота, вычисленных в блоке моделирования по данным с микроконтроллера о заданных скоростях и направлениях вращения электродвигателей робота (сигнал с блока оценки достоверности навигационных данных имеет значение недостоверности данных с приемника СНС - "нет"). Блок моделирования программно реализует модель движения робота, описывающую его движение на координатной плоскости при приложении к электродвигателям управляющих напряжений, задающих их скорости и направления вращения. Система управления мобильным роботом работает следующим образом.

При включении системы микроконтроллер загружает данные из энергонезависимой памяти в оперативную память микроконтроллера. Эти данные содержат информацию о требуемой траектории движения робота (либо, как минимум, информацию о координатах точки, куда робот должен двигаться).

Приемник СНС получает данные о текущих координатах робота. По информации о требуемой траектории движения робота и о его текущих координатах микропроцессор управляющей программой формирует управляющие сигналы на схему управления электродвигателями, задающие скорости и направления вращения электродвигателей робота. Робот начинает движение. В общем случае, управляющие сигналы формируются управляющей программой таким образом, чтобы текущие координаты робота, постоянно определяемые приемником СНС при движении робота, стремились к координатам требуемой траектории.

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 движении робота достоверность координат, получаемых приемником СНС, постоянно определяется блоком оценки достоверности навигационных данных. В том случае, если достоверность координат, полученных приемником СНС подтверждена, блок оценки достоверности навигационных данных выставляет на своем выходе сигнал "да", подтверждающий достоверность данных с приемника СНС. Этот сигнал переключает ключевое устройство таким образом, чтобы в микропроцессор передавались данные о координатах робота с приемника СНС.

При движении робота управляющие сигналы, задаваемые микропроцессором на схему управления электродвигателями и задающие скорости и направления вращения электродвигателей робота, передаются в блок моделирования, в котором по ним вычисляется перемещение робота относительно последних координат определенных приемником СНС, достоверность которых подтверждена блоком оценки достоверности навигационных данных.

Если при работе приемника СНС по какой-либо причине произошли ошибки, например, на него действуют помехи, нарушающие определение навигационных

данных, то координаты робота будут определены приемником СНС неправильно. В этом случае достоверность координат, полученных приемником СНС не подтверждается блоком оценки достоверности навигационных данных и он выставляет на своем выходе сигнал "нет" недостоверности данных с приемника СНС. Сигнал "нет" недостоверности данных с приемника СНС переключает ключевое устройство таким образом, что в микропроцессор передаются данные о координатах робота, вычисленных в блоке моделирования по данным с микроконтроллера о заданных скоростях и направлениях вращения электродвигателей робота.

Таким образом обеспечивается точность, помехозащищенность и информационная надежность системы управления мобильным роботом.

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

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

4.4. Результаты и выводы

1. 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 информационных отказах приемника СНС, т.е. 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.

2. Для оценки характеристик и особенностей реализации предложенного способа с выбором режима управления он был смоделирован в системе управления мобильным роботом на основе автономного контроля приемника СНС.

3. 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.

4. Разработана структурная схема системы управления мобильным роботом с автономным контролем приемника СНС. Реализация в системе предложенной структуры рассмотренного в 3 главе работы комбинированного алгоритма автономного контроля приемника СНС и способа с выбором режима управления по модели робота при возникновении информационных отказов приемника СНС обеспечивают аппаратную безызбыточность системы, минимальные энергопотребление, стоимость и габариты, без снижения ее точности, помехозащищенности и информационной надежности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. Схема обеспечивает аппаратную безызыточность 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

AAIM	Aircraft Autonomous Integrity Monitoring
FD	Failure Detection
FI	Failure Identification
GBAS	Ground based augmentation system
GPS	Global Position System
HDOP	Horizontal Dilution of Precision
PDOP	Position Dilution of Precision
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
SBAS	Space based Augmentation Systems
TDOP	Time Dilution of Precision
VDOP	Vertical Dilution of Precision
АЦП	Аналого-цифровой преобразователь
БИНС	Бесплатформенные инерциальные навигационные системы
ГАЛИЛЕО	Европейская спутниковая система
ГЛОНАСС	Глобальная навигационная спутниковая система
ИНС	Инерциальные навигационные системы
МШУ	Мало-шумящий усилитель
МЭМС	Микроэлектромеханические системы
РЧ ИС	Радиочастотная интегральная схема
СКО	Среднеквадратическое отклонение
СНС	Спутниковые навигационные системы
ПАВ	фильтр на поверхностных акустических волнах
ПЛИС	программируемая логическая интегральная схема
ФК	фильтр Калмана
X _{зад}	Заданные координаты по оси X
Y _{зад}	Заданные координаты по оси Y
X _{роб}	Координаты робота по оси X
Y _{роб}	Координаты робота по оси Y

X_снс	Координаты с приемника СНС по оси X
Y_снс	Координаты с приемника СНС по оси Y
X_вход	Входные сигналы по оси X из приемника СНС
Y_вход	Входные сигналы по оси Y из приемника СНС
X_выход	Выходные сигналы по оси X
Y_выход	Выходные сигналы по оси Y
X_реал	Реальные координаты по оси X
Y_реал	Реальные координаты по оси Y
UдвL	Напряжение на левом двигателе
UдвR	Напряжение на правом двигателе
Lдв	Условное расстояние
Lснс	Расстояние, которое робот проедет за некоторое время при нормальных сигналах СНС

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Brown R. G., Mc Burney P. W. Self-Contained GPS Integrity Check Using Maximum Solutions Separation / R. G. Brown, P. W. Mc Burney // Navigation - Journal of The Institute of Navigation. - 1988. - Vol. 35. - No 1. - P. 41-53.
2. Brown R. G. Integrity Monitoring of the Global Positioning System Using a Barometric Altimeter / Brown, Alison, Schmid, Tom // Proceedings of the 1988 National Technical Meeting of the Institute of Navigation. - January 1988. - P. 245-253.
3. Brown R. G., Mc Burney P. W. Self-contained GPS Integrity Check Using Maximum Solution Separation / R. G. Brown, P. W. Mc Burney // Navigation. - Summer 1988. - Vol. 35. - No 2.
4. Brown R. G., Baseline A. GPS RAIM scheme and a note on the equivalence of three RAIM methods / R. G. Brown., A. Baseline // Navigation. - 1992. - Vol. 39. - No 3. - P. 301-316.
5. Brown, R. G., Patrick Y. C. GPS Failure Detection by Autonomous Means Within the Cockpit / R. G. Brown, Y. C. Patrick // Electrical Engineering, Iowa State University Ames. - December 1986.
6. European Geostationary Navigation Overlay Service. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/EGNOS>
7. Gertler J. Analytical redundancy methods in fault detection and isolation / J. Gertler // Proc. IFAC Symp. SAFEPROCESS (Baden-Baden, 1991). - Oxford: Pergamon Press, 1991. - Vol. 1. - P. 9-21.
8. Huynh Duc Toan, Tran Xuan Khoa, Pham Ngoc Minh, Nguyen Ha Phuong. Application Kalman filter for building model and algorithm distance protection relay / Huynh D. T., Tran X. K., Pham N. M., Nguyen H. P. // The 3rd National Conference on Control and Automation. - VCCA-2015. - Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/fc04/33e8acf02cb60910d2f654c2773527269492.pdf>
9. Jakub Machuta, Jakub Kraus. SBAS avionics compared to GBAS on-board equipment // Magazine of Aviation Development. - 2017. - Vol. 6, No 1. - P.11-16.
10. Jurišica, Ladislav, Duchoň, František, Kastan, Dusan, Babinec, Andrej. High Precision GNSS Guidance for Field Mobile Robots // International Journal of

- Advanced Robotic Systems. - 2012. - 9.1.10.5772/52554.
11. Kristensen S, Horstmann S., Klandt J., Lohner F., and Stopp A. Human-friendly interaction for learning and cooperation // Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea. - 2001. - IEEE. - P. 2590 - 2595.
 12. Krzysztof Kozłowski, Dariusz Pazderski. Practical Stabilization of a Skidsteering Mobile Robot - A Kinematic-based Approach. [Электронный ресурс]. - Режим доступа:https://researchgate.net/publication/224673512_Practical_Stabilization_of_a_Skid-steering_Mobile_Robot_-_A_Kinematic-based_Approach.
 13. Parkinson B. W., Axelrad P. Autonomous GPS Integrity Monitoring Using the Pseudorange Residual / B. W. Parkinson, P. Axelrad // Navigation. - Summer 1988. - Vol. 35.- No. 2.
 14. Real Time GPS Tracker - приложение на Android. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://appmoz.ru/prilozhenie-real-time-gps-tracker/>
 15. Real Time GPS Tracker / Hardware tracker emulator for real time GPS coordinates transferring (for Android). [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://livegpstracks.com/default.php?ch=soft&pid=rttandr>
 16. Receiver autonomous integrity monitoring. [Электронный ресурс]. - Режим доступа:https://en.wikipedia.org/wiki/Receiver_autonomous_integrity_monitoring
 17. Sturza M. A. Navigation system integrity monitoring using redundant measurements // Navigation. - 1989. - Vol. 35. - № 4. - P. 483-501.
 18. Wide Area Augmentation System. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/611925>
 19. Wi-Fi. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>
 20. Young C. Lee. Analysis of Range and Position Comparison Methods as a Means to Provide GPS Integrity in the User Receiver // The MITRE Corporation, McLean, Virginia. - 1986.
 21. Zogg Jean-Marie. GPS. Essentials of Satellite Navigation. Compendium. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.studmed.ru/zogg-jean>

- marie-gps-essentials-of-satellite-navigation-compendium_dbca87a2b7a.html
22. Аникин А.А. Разработка и моделирование систем комплексирования разнородных наблюдений // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ульяновск. - 2006. - Режим доступа: <http://tk.ulstu.ru/lib/diser/aaa.pdf>.
 23. Акимов И.О. , Илюхин С.Н., Ивлев Н. А., Колосов Г.Е.. Методика калибровки магнитометра на этапе наземной диагностики систем космического аппарата.- Инженерный журнал: наука и инновации. - 2018.- № 5. - С. 1-15. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-kalibrovki-magnitometra-na-etape-nazemnoy-dagnostiki-sistem-kosmicheskogo-apparata/viewer>.
 24. Ахмедов Д.Ш., Ибраев А.С. Использование одометрии для повышения точности инерциальной навигационной системы транспортного средства / Журнал «Технические науки – от теории к практике». - 2017. - № 5(65). - С. 44-56. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-odometrii-dlya-povysheniya-tochnosti-inertsialnoy-navigatsionnoy-sistemy-transportnogo-sredstva/viewer>.
 25. Акселерометр // Виды и трипы // Работа и применение // Особенности. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://electrosam.ru/glavnaja/slabotochnye-seti/oborudovanie/akselerometr/>
 26. Баженов Е.И. , Мокрушин С.А., Охалкин С.И.. Разработка системы ориентации мобильного робота в пространстве// Известия ТулГУ. Технические науки, 2021. -Вып №.4. - С. 354-358. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-sistemy-orientatsii-mobilnogo-robota-v-prostranstve/viewer>.
 27. Базылев Д. Н. , Попченко Ф. А. , Ибраев Д. Д. , Маргун А. А., Зименко К. А., Кремлев А. С.. Траекторное управление шагающим роботом с использованием видеокамеры // В журнале «Известия высших учебных заведений - Приборостроение». - 2017. - №.9. - С. 875-879. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/traektornoe-upravlenie-shagayuschim-robotom-s-ispolzovaniem-videokamery/viewer>

28. Безнос А. В., Гурфинкель Е. В., Жихарев Д. Н., Ленский А. В., Савицкий К. В., Формальский А. М., Чесалин Л. С. Управление автономным движением двухколёсного велосипеда с гироскопическим стабилизатором // Докл. Науч. школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы. - М.: Институт механики МГУ, 1999. - С. 57-67.
29. Бобровский С. Навигация мобильных роботов / С. Бобровский // Журнал PC Week / RE . – 2004. - № 9. - С. 52.
30. Бобровский С. Навигация мобильных роботов / С. Бобровский // Журнал PC Week/RE. – 2004. - № 10. - С. 53.
31. Богер Е.А. Точность навигационного решения в зависимости от стабильности опорных генераторов, точности синхронизации и геометрии расположения источников опорных сигналов // бакалаврская работа / Е. А. Богер; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций, Радиотехника и телекоммуникации. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://elib.spbstu.ru/dl/2/7494.pdf>
32. Бопп В. А. Роль лидара в современных транспортных средствах / Виктория Андреевна Бопп // Известия ТулГУ. - Технические науки. - 2020. – Вып. № 4. – С. 342-345. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/rol-lidara-v-sovremennyh-transportnyh-sredstvah/viewer>.
33. Варавва В. Г., Кирейченко В. А. Контроль целостности GNSS в бортовых навигационных системах / В. Г. Варавва, В. А. Кирейченко // Проблемы безопасности полетов. - 1992. - № 9.
34. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. - М.: Высшая школа 1976 г. - 480 с.
35. Веремеенко К.К., Головинский А.Н., Инсаров В.В., Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий . - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003 г. - 280 с.
36. Виктор Алексеев. Приемники GNSS для спутниковых навигационных систем

- gps // системы позиционирования. - 2013. - № 02. - С. 52-59.
37. Власов В. М., Мактас Б. Я., Богумил В. Н., Конин И. В. Беспроводные технологии на автомобильном транспорте / Глобальная навигация и определение местоположения транспортных средств // Учебное пособие. - Москва, ИНФРА, 2018. – 184 с.
 38. Власов В.М., Бойков В.И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Бесконтактные средства локальной ориентации роботов. - СПб: Университет ИТМО, 2017. - 169 с.
 39. Гвардейцев М.И., Морозов В.П., Розенберг В.Я. Специальное математическое обеспечение управления. - М.: Советское радио. - 1978.
 40. Генике А.А., Побединский Г.Г. Глобальные спутниковые системы определения местоположения и их применение в геодезии // Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Картгеоцентр, 2004. - 355 с.: ил. - С. 147-148.
 41. Геотрекер - GPS трекер. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://coandroid.ru/4845-geotrekker-gpstrekker.html> (дата обращения: 05.03.2020)
 42. Герасимов В.Н., Михайлов Б.Б. Решение задачи управления движением мобильного робота при наличии динамических препятствий // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. Спецвыпуск "Робототехнические системы". - 2012. - № 6. - С. 83-92. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/reshenie-zadachi-upravleniya-dvizheniem-mobilnogo-robot-a-pri-nalichii-dinamicheskikh-prepyatstviy/viewer>.
 43. Грошев А.В., Фролова О.А. Помехоустойчивый контроля данных в комплексной инерциально-спутниковой навигационной системе // Управление большими системами: сборник трудов. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. Москва : 2018. - Вып. 74. - С. 63-80.
 44. Глобальная навигационная спутниковая система GPS. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/gps.php>
 45. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru/guide/glonass.php>
 46. Глобальная навигационная спутниковая система ГАЛИЛЕО. [Электронный

- ресурс]. - Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/galileo.php>
47. Глобальная навигационная спутниковая система БЭЙДОУ. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/beidou.php>
48. Гироскоп. Виды и устройство. Работа и применение. Особенности. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://electrosam.ru/glavnaja/slabotochnye-seti/oborudovanie/giroskop/>
49. Гилимьянов Р.Ф., Рапопорт Л.Б. Метод деформации пути в задачах планирования движения роботов при наличии препятствий // Проблемы управления, 2012. - № 01. - С. 70-76. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-deformatsii-puti-v-zadachah-planirovaniya-dvizheniya-robotov-pri-nalichii-prepyatstviy/viewer>.
50. Девянин Е. А. О движении колёсных роботов // Докл. Науч. школы-конференции «Мобильные роботы и мехатронные системы». - М.: Институт механики МГУ, 1999. - С. 169-200.
51. Дмитриев, С.П., Колесов Н.В., Осипов А.В. Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем // СПб. : ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2004. - 208 с.
52. Движение робота к точке с заданными координатами. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/277829/> (дата обращения 28.03.2020 г.)
53. Датчик давления. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Датчик_давления.
54. Змыгер М.И., Латмфуллмы Р.Н., Романова Е.П. Исследование и разработка алгоритмов и программ обработки первичной информации для повышения точности контроля параметров в АСУТП. - Казань 1980. - С. 19-20.
55. Иванов, А. В. Комплексные оптимальные алгоритмы обработки информации в навигационных системах подвижных наземных объектов с контролем целостности навигационного обеспечения / А. В. Иванов // Радиотехника. - 2010. - № 12.
56. Иванов, А. В. Алгоритмы обработки информации в навигационных системах наземных подвижных объектов с контролем целостности навигационных

- данных спутниковых радионавигационных систем / А. В. Иванов, Д. В. Комраков, В. О. Сурков // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. - 2014. - № 52. - С. 53-58.
57. Иванов, А. В. Автономные системы контроля целостности навигационных данных спутниковых радионавигационных систем / А. В. Иванов // Радиотехника. - 2014. - № 7. - С. 55-64.
58. Иванов А.В., Негуляева А.П., Москвитин С.П. Автономный контроль целостности навигационных данных спутниковых радионавигационных систем методами сравнения и невязок / А.В. Иванов, А.П. Негуляева, С.П. Москвитин // Вестник ТГТУ. - 2016. - Т. 22. - № 3. - С. 358-367.
59. Изерман, Р. Перспективные методы контроля, обнаружения и диагностики неисправностей и их применение / Р. Изерман // Приборы и системы управления, 1998. - № 4. - С. 56 - 70.
60. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru/GLONASS/VisibleZones.php>.
61. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.glonass-iac.ru/GPS/ephemeris.php>.
62. Инерциальная навигационная система. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://wiki.wargaming.net/ru/Navy:Инерциальная_навигационная_система
63. Исследование метода создания опорной геодезической сети с помощью спутниковой технологии. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://privetstudent.com/diplomnyye/diplomnyye-raboty-po-geologii/1497-issledovanie-metoda-sozdaniya-opornoj-geodezicheskoj-seti-s-pomoschyu-sputnikovoy-tehnologii.html>
64. Калёнова В.И., Морозов В. М., Салмина М. А. Устойчивость и стабилизация установившихся движений неавтономных механических систем одного класса / В.И. Калёнова, В. М. Морозов, М. А. Салмина // Мобильные роботы и мехатронные системы. - М.: Изд-во Моск. ун-та, 2004. - С. 119-134.

65. Киселев С.К., Чан В.Т. Алгоритм оценки достоверности данных спутниковой навигационной системы при управлении траекторным движением наземных мобильных роботов / С.К. Киселев , В.Т. Чан // В сборнике: Молодежь и современные информационные технологии / Сборник трудов XVIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск. - 2021. - С. 409-410.
66. Киселев С.К., 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.
67. Киселев С.К., 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.
68. Киселев С.К., Чан В.Т. Управление автономным мобильным роботом при сбоях спутниковой навигационной системы / С.К. Киселев, В.Т. Чан // В сборнике: Интегрированные системы управления: Сб. науч. тр. – Ульяновск: ФНПЦ АО «НПО «Марс». - 2021. - С. 64-72.
69. Киселев С.К., Чан В.Т. Устройство управления мобильным роботом / С.К. Киселев, В.Т. Чан. // Патент на полезную модель 209590 U1. - 17.03.2022. - Заявка № 2021122819 от 29.07.2021.
70. Клейнен Дж. Статистические методы в имитационном моделировании // Пер. с англ. - М.: Статистика, 1978. - 221 с.;
71. Комраков Д. В. Контроль целостности навигационной информации в глобальных навигационных спутниковых системах. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://tstu.ru/book/elib/pdf/stmu/2014/67.pdf>
72. Комраков, Д. В. Контроль целостности навигационной информации в глобальных навигационных спутниковых системах. - Режим доступа: <https://tstu.ru/book/elib/pdf/stmu/2014/67.pdf>.
73. Конин В.В., Харченко В.П. Системы спутниковой радионавигации. —

- Национальный авиационный университет. - К.: Холтех. - 2010. - 520 с.
74. Круглова Т.Н., Власов А.С. Моделирование системы управления полноприводным четырехколесным сельскохозяйственным мобильным роботом / Т.Н. Круглова, А.С. Власов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. - 2019. - № 5. - С148-149. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-sistemy-upravleniya-polnoprivodnym-chetyrehkolesnym-selskohozyaystvennym-mobilnym-robotom/viewer>.
75. Курганов С.М. Система планирования траектории и управления движением двухколесного мобильного робота: магистерская диссертация / Курганов Сергей Михайлович. - Санкт-Петербург. - 2016. - С. 30-43.
76. Легенький В.И. О построении систем управления с инвариантной программой Математичні машини і системи, 2004, № 1, стр. 115-121
77. Лю В. Методы планирования пути в среде с препятствиями (обзор) // Математика и математическое моделирование. - 2018. - № 01. - С. 15-58. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-planirovaniya-puti-v-srede-s-prepyatstviyami-obzor/viewer>.
78. Майоров А.В., Москатов Г.К., Шибанов Г.П. Безопасность функционирования автоматизированных объектов. - М. : Машиностроение, 1988. – 262 с
79. Максимей И.В. Имитационное моделирование на ЭВМ. - М.: радио и связь. - 1988. - 232 с.
80. Мартыненко Ю.Г. Устойчивость неуправляемых движений одноколёсного мобильного робота с маховичной системой стабилизации // Проблемы механики современных машин. Материалы международной конференции. Т. 1. - Улан-Удэ, 2000. - С. 96-101.
81. Мартыненко Ю. Г. Управление движением мобильных колёсных роботов, Фундамент. и прикл. матем. - 2005ю – Т. 11, № 8. - С. 31-50. - Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_9160766_67430703.pdf
82. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем // СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ

- Электроприбир". - 2009. - 280с.
83. Матвеев В.В. Инерциальные навигационные системы. - Изд.ТулГУ. - 2012г.
84. Магнитометр. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Магнитометр>.
85. Мелешко В.В., Нестеренко О.И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы // Учебное пособие. - Кировоград: ПОЛИМЕД. - Сервис. - 2011. - 164с.
86. Минин, А.А. Навигация и управление мобильным роботом, оснащенный лазерным дальномером // дис. к.т.н. по специальности 05.02.05. Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. - 2008. - 182 с.
87. Михайлов С., Кульнев В. Анализ направлений и состояния разработок функциональных дополнений к спутниковым радионавигационным системам // Беспроводные технологии. - 2006. - №3 (04). - С. 61-69.
88. Михайлов Б. Б., Назарова А. В., Ющенко А. С. Автономные мобильные роботы - навигация и управление / Б. Б. Михайлов, А. В. Назарова, А. С. Ющенко // Журнал «Известия ЮФУ. Технические науки». - 2016. - № 2. - С. 49-50. -Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtonomnye-mobilnye-roboty-navigatsiya-i-upravlenie/viewer>.
89. Мобильные роботы Сервосила «Инженер». [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.servosila.com/media/doc-ru/Servosila-Mobile-Robots-Engineer-Brochure-Rus.pdf> (дата обращения: 11.03.2021).
90. Муранов А.А. Анализ работы бортовых терминальных систем моноблочных жидкостных ракет-носителей при нештатном расходовании топлива// Проблемы управления. – 2018. - №5. - С. 73-78.
91. Наземная система функционального дополнения GBAS. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://npcas.ru/wiki/nazemnaya-sistema-funktsionalnogo-dopolneniya-gbas.html>
92. Одометрия. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://robocraft.ru/blog/technology/736.html>.
93. Одометрия как основа для навигации мобильных роботов. [Электронный

- ресурс].- Режим доступа:
https://studwood.ru/570647/informatika/odometriya_osnova_navigatsii_mobilnyh_robotov
94. Определение целостности для целей навигации. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://navis-ukraine.com.ua/publications/43-publication-integrity.html>
95. Охоцимский Д. Е., Мартыненко Ю. Г. Новые задачи динамики и управления движением мобильных колёсных роботов / Д. Е. Охоцимский, Ю. Г. Мартыненко // Успехи механики. - 2003. - Т. 2. - № 1. - С. 3-47.
96. Патент на полезную модель РФ RU 192 180U1 (2019.05), В25J 13/00 (2019.05); G05D 1/00 (2019.05).
97. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования [Текст]. - М.: Радиотехника. - 2010. - 800 с.
98. Петров Б.Н., Портнов-Соколов Ю.П., Андриенко А.Я., Иванов В.П. Бортовые терминальные системы управления: принципы построения и элементы теории) / Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко, В.П. Иванов // М.: Машиностроение. - 1983. – 200 с.
99. Позиционирование в сетях Wi-Fi с высокой точностью. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/cisco/blog/270779/>.
100. Полляк Ю.Г. Вероятностное моделирование на ЭВМ. - М.: Советское радиою – 1971. - 400 с.
101. Прохорцов А.В., Савельев В.В. Методы определения координат и скорости подвижных объектов с помощью спутниковых радионавигационных систем / А.В. Прохорцов, В.В. Савельев // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2011. - № 02. - С. 264-274. -Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-opredeleniya-koordinat-i-skorosti-podvizhnyh-obektov-s-pomoschyu-sputnikovyh-radionavigatsionnyh-sistem/viewer>
102. Простые приложения на Android для просмотра спутников GPS и координат. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.encyclopedia-stranstviy.com/2018/09/prilozheniya-android-sputniki-gps-koordinaty.html>.
103. Расчет расстояния между двумя точками по координатам. [Электронный

- ресурс]. - Режим доступа: <https://planetcalc.ru/73/> (дата обращения: 05.03.2020).
104. Решение навигационной задачи. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://www.elismod.ru/tg_tea/02/01.htm
105. Сатышев А.С., Каптюк И.В. Динамическая модель мобильного колесного робота / А.С. Сатышев, И.В. Каптюк // Молодёжь и наука : сб. матер. VIII Всерос. науч.-тех. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных, посвященной 155-летию со дня рождения К.Э. Циолковского. Красноярск . - Сибирский федеральный ун-т. - 2012. - Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2012/section12.html> (дата обращения 27.04.2021).
106. Савочкин А.Е., Михеев М.Ю., Прокофьев О.В., Линкова М.А. Математические и информационно-структурные модели прогнозирования состояния технически сложных объектов / А.Е. Савочкин, М.Ю. Михеев, О.В. Прокофьев, М. А. Линкова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - 2015. - № 4 (32). - С. 232-249.
107. Савочкин А.Е., Михеев М.Ю., Прокофьев О.В. Прогнозирование литеральных ситуаций по коротким временным рядам / А.Е. Савочкин , М.Ю. Михеев , О.В. Прокофьев // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". - 2017. - Т. 1. - С. 320-324.
108. Серапинас Б.Б. Глобальные системы позиционирования. - М.: Каталог. - 2002. - 106 с.
109. Сергей Михайлов, Виктор Кульнев. Анализ направлений и состояния разработок функциональных дополнений к спутниковым радионавигационным системам. - Режим доступа: <https://wireless-e.ru/gps/gps-glonass/>.
110. Смольников Б. А. Проблемы механики и оптимизации роботов. - М.: Наука. - 1991.
111. Системы Дифференциальной Коррекции Глобальных Навигационных Спутниковых Систем. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Differential_GPS
112. Соловьев Ю.А. Точность определения относительных координат и синхронизации шкал времени объектов при использовании спутниковых

- радионавигационных систем / Ю.А. Соловьев // Радиотехника, ИПРЖР. – 1998. - №9.
113. Соловьев, Ю.А. Системы спутниковой навигации. - М.: Эко-Трендз. - 2000.
114. Спутниковые навигационные системы. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://epizodsspace.airbase.ru/bibl/mai/sputnikov-navig-2004.pdf>
115. Спутниковые системы функционального дополнения. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://bstudy.net/830834/tehnika/sputnikovye_sistemy_funktsionalnogo_dopolneni_ua
116. Спутниковые системы навигации. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.bestreferat.ru/referat-191443.html>
117. Сурков В.О. Системы навигации подвижных наземных объектов и их характеристики / В.О. Сурков // Молодой ученый. - 2015. - № 9 (89). - С. 298-302. - Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/89/18270/> (дата обращения: 18.04.2021).
118. Сурков В. О. Анализ методов контроля целостности спутниковых радионавигационных систем в навигационных системах подвижных наземных объектов / В.О. Сурков // Молодой ученый. - 2016. - № 13 (117). - С. 219-221. - Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/117/32472/>.
119. Сухорукова М.В., Сулейманов Д.Ф. Метод определения координат мобильных устройств по радиосигналу wi-fi точек / М.В. Сухорукова // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2007. - № 41. – С. 40-43. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-opredeleniya-koordinat-mobilnyh-ustroystv-po-radiosignalu-wi-fi-tochek/viewer>
120. Технологии робототехники. Агентство промышленного развития Москвы [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://investmoscow.ru/media/3340361/05-технологии-робототехники.pdf> (дата обращения: 27.04.2021)
121. Трунин, А. С. Методы определения текущего местоположения автономного робота / А. С. Трунин. - Текст : непосредственный // Молодой ученый. - 2019. -

- № 36 (274). - С. 1-5. - Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/274/62285/>.
122. Тугашова Л. Г., Затонский А.В. Моделирование объектов управления в MatLab. – Лань. - 2020. – 144 с.
123. Харисов, В.Н., Перов А.И., Болдин В.А. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС // ИПРЖР, Москва. - 1998.
124. Хацько Н. Е. Решение терминальной задачи управления с использованием информации инерциального блока / Радиоэлектроника, информатика, управления. - 2016. - № 1. - С. 101-107.
125. Хруль С.А., Сонькин Д.М. Адаптивный алгоритм обработки потока навигационных данных на основе метода диагностической фильтрации / С.А. Хруль, Д.М. Сонькин // Известия Томского политехнического университета. - 2012. - Т. -321. - № 5. -Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/adaptivnyy-algoritm-obrabotki-potoka-navigatsionnyh-dannyh-na-osnove-metoda-diagnosticheskoy-filtratsii/viewer>
126. Чан В.Т., Киселев С.К. Моделирование спутниковой системы навигации / В.Т. Чан, С.К. Киселев // В сборнике: Информатика и вычислительная техника (ИВТ-2019) / Сборник научных трудов XI Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, студентов и молодых ученых. г. Ульяновск. - 2019. - С. 157-166.
127. Чан В.Т., Киселев С.К. Контроль целостности навигационных данных, используемых для управления мобильным роботом / В.Т. Чан, С.К. Киселев // В сборнике: Информатика и вычислительная техника (ИВТ-2020) / Сборник научных трудов XII Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, студентов и молодых ученых. г. Ульяновск. - 2020. - С. 260-270.
128. Чан В.Т., Киселев С.К. Моделирование системы управления мобильным роботом с контролем ошибок спутниковой навигационной системы / В.Т. Чан, С.К. Киселев // В сборнике: Информатика, моделирование, автоматизация проектирования (ИМАП-2020) / XII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых : сборник научных трудов. Ульяновск. - 2021. - С. 196-201.

129. Чан В.Т., Киселев С.К. Обнаружение неисправностей Глонасс/GPS трекеров при эксплуатации / В.Т. Чан., С.К. Киселев // Вестник Ульяновского государственного технического университета. - 2019. - № 3 (87). - С. 46-51.
130. Чан В.Т. Оценка способа автономного контроля ошибок спутниковой навигационной системы / В.Т. Чан, С.К. Киселев // В сборнике: Вузовская наука в современных условиях. сборник материалов 55-й научно-технической конференции. В 3 ч. - Ульяновскую - 2021. - С. 118-121.
131. Чан В.Т. Формирование траектории для исследования движения мобильных роботов / В.Т. Чан, С.К. Киселев // В сборнике: Вузовская наука в современных условиях. сборник материалов 54-й научно-технической конференции. В 3 ч. - Ульяновск. - 2020. - С. 133-136.
132. Чернявский, Е. А. Измерительно-вычислительные средства автоматизации производственных процессов / Е. А. Чернявский, Д. Д. Недосекин, В. В. Алексеев // Л. : Энергоатомиздат : Ленингр. отдние. - 1989. - 271 с.
133. Черноножкин В.А., Половко С.А. Система локальной навигации для наземных мобильных роботов / В.А. Черноножкин, С.А. Половко. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2008. - № 57. – С. 13-21. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-lokalnoy-navigatsii-dlya-nazemnyh-mobilnyh-robotov/viewer>
134. Яценков В.С. Основы спутниковой навигации. Системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС / В.С. Яценков // М: Горячая линия-Телеком. - 2005. - 272 с. – С. 69-75.

Модель алгоритма определения координат пользователя СНС приемником в серде Simulink на Matlab

```

function GPS_kor_8(block)
    setup(block);
function setup(block)
    % Register number of ports
    block.NumInputPorts = 1;
    block.NumOutputPorts = 1;
    % Setup port properties to be inherited or dynamic
    block.SetPreCompInpPortInfoToDynamic;
    block.SetPreCompOutPortInfoToDynamic;
    % Override input port properties
    block.InputPort(1).Dimensions = 2;
    block.InputPort(1).DatatypeID = 0; % double
    block.InputPort(1).Complexity = 'Real';
    block.InputPort(1).DirectFeedthrough = true;
    % Override output port properties
    block.OutputPort(1).Dimensions = 2;
    block.OutputPort(1).DatatypeID = 0; % double
    block.OutputPort(1).Complexity = 'Real';
    % Register parameters
    block.NumDialogPrms = 0;
    % Register sample times
    % [0 offset] : Continuous sample time
    % [positive_num offset] : Discrete sample time
    %
    % [-1, 0] : Inherited sample time
    % [-2, 0] : Variable sample time
    block.SampleTimes = [0.1 0];
    block.SimStateCompliance = 'DefaultSimState';
    %block.RegBlockMethod('SetinputPortSamplingMode', @SetinputPortSamplingMode);
    block.RegBlockMethod('PostPropagationSetup', @DoPostPropSetup);
    block.RegBlockMethod('InitializeConditions', @InitializeConditions);
    block.RegBlockMethod('Start', @Start);
    block.RegBlockMethod('Outputs', @Outputs); % Required
    block.RegBlockMethod('Update', @Update);
    block.RegBlockMethod('Derivatives', @Derivatives);
    block.RegBlockMethod('Terminate', @Terminate); % Required
    block.RegBlockMethod('SetInputPortSamplingMode', @SetInpPortFrameData);
function SetInpPortFrameData(block, idx, fd)

```

```

block.InputPort(idx).SamplingMode = fd;
block.OutputPort(1).SamplingMode = fd;
function DoPostPropSetup(block)
block.NumDworks = 0;
function InitializeConditions(~)
function Start(~)
function Outputs(block)
x1dd = block.InputPort(1).Data;
c=299792458;
n=8;
%vect_of_errors=zeros(1,10);
%% Idialnai koordinati
x_rec = x1dd(1);
y_rec = x1dd(2);
z_rec = 0;
%tt = x1dd(3);
%% Sputnhikie koordinati
A(1,1) = -17622350;
A(1,2) = 14613860;
A(1,3) = 13529770;
A(2,1) = 18019150;
A(2,2) = -17116430;
A(2,3) = -7225548;
A(3,1) = 13729270;
A(3,2) = 22774770;
A(3,3) = 1857424;
A(4,1) = -13181380;
A(4,2) = 7701857;
A(4,3) = -21751190;
A(5,1) = -1983731;
A(5,2) = 26163650;
A(5,3) = -4802700;
A(6,1) = -18628070;
A(6,2) = -19119050;
A(6,3) = 1146756;
A(7,1) = 22219130;
A(7,2) = -14227320;
A(7,3) = -4121208;
A(8,1) = -25742390;
A(8,2) = -5592818;
A(8,3) = -7993.417;
%nest=[1e-12 1e-11 1e-10 1e-9 1e-8 1e-7 1e-6 1e-5 1e-4];

```

```

maxx=zeros(1,9);
minn=zeros(1,9);
summ=zeros(1,9);
average_value=zeros(1,9);
for q=1:9
for z=1:10
xo=0;yo=0;zo=0;t1=0;
vect=[xo yo zo t1];
eps=10;
epsilon = [1 1 1 1];
dR=[eps*10 eps*10 eps*10 eps*10];
da = dR;
R1 = zeros(1,4);
ER=zeros(1,8);
%dt1=-1.2+2.4*rand(1,100); ER1=dt1(((dt1<=1.5)&(dt1>=0.7))|((dt1<=-0.7)&(dt1>=-1.5)));
%if length(ER1)==8
%ER=ER1;
%elseif length(ER1)>8
%ER=ER1(1:8);
%end
for i=1:n
PR(i)=sqrt((A(i,1)-x_rec)^2+(A(i,2)-y_rec)^2+(A(i,3)-z_rec)^2);
dt(i)=PR(i)/c;
%P1(i)=PR(i);
P(i)=PR(i)+ER(i)*c*dt(i);
% P(i)=PR(i);
end
while da > epsilon
R=[xo yo zo t1];
for i=1:n
PR(i)=sqrt((A(i,1)-R(1))^2+(A(i,2)-R(2))^2+(A(i,3)-R(3))^2);
for j=1:3
S(i,j)=(A(i,j)-R(j))/PR(i);
end;
S(1:n,4)=1;
l(i)=PR(i)-P(i);
end
N=S'*S;
L=S'*l';
Dr=N\L;
R1=R + Dr';
xo = R1(1);

```

```
yo = R1(2);
zo = R1(3);
dR = abs(R1 - vect);
da = dR;
vect=R1;
COOR=R1';
end
vpa(COOR, 12);
X = COOR(1);
Y = COOR(2);
Z = COOR(3);
end
end
block.OutputPort(1).Data = [COOR(1);COOR(2)];
function Update(~)
function Derivatives(~)
function Terminate(~)
```

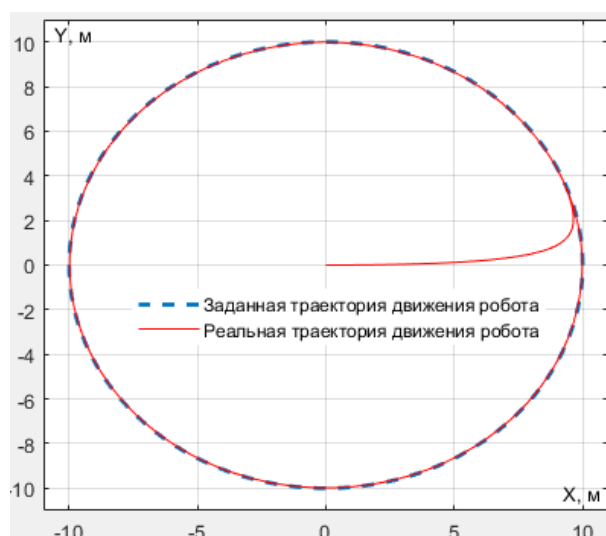
Дополнительные результаты моделирование движения робота по различным функционально заданным траекториям

1. Круговая траектория

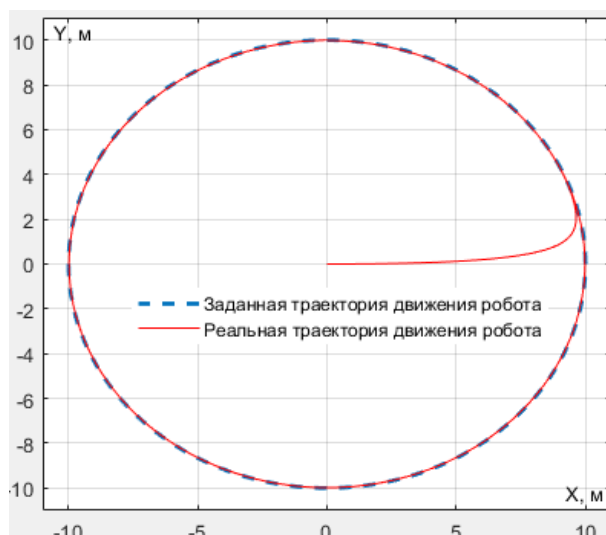
Результаты моделирования движения робота по круговой траектории при трех разных постоянных времени двигателя робота приведены на рисунках 1 - 3.



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$

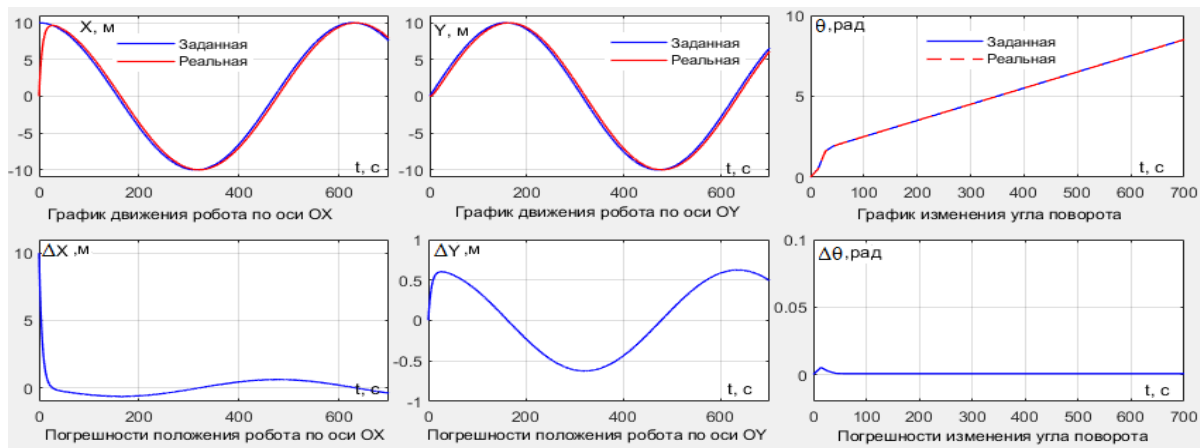


б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$

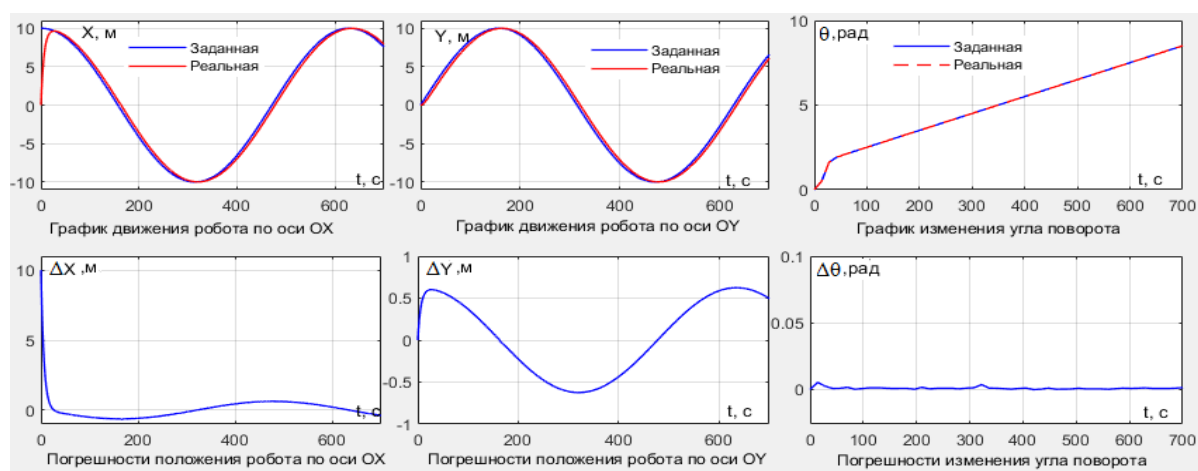


в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

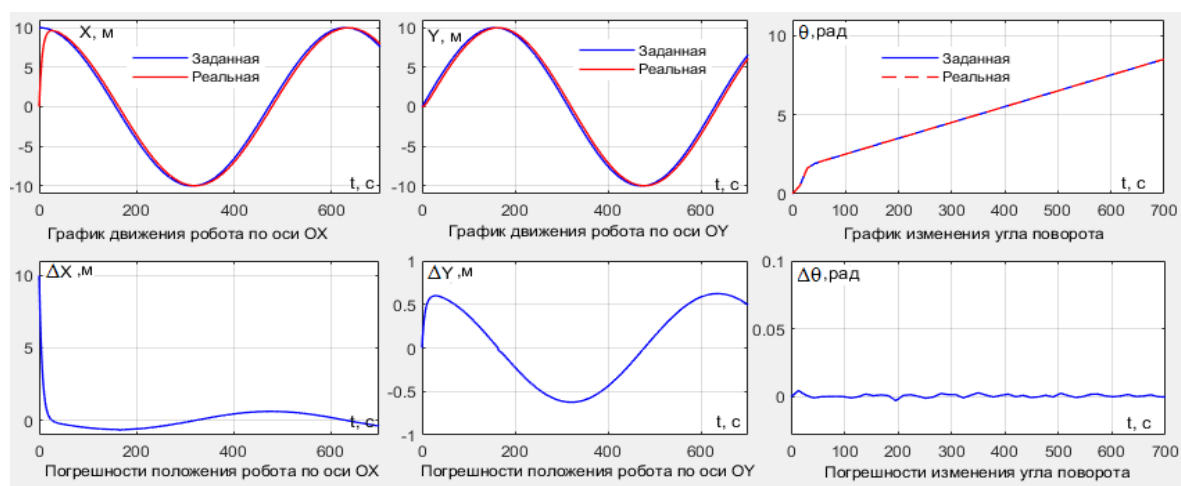
Рисунок 1. - Движение робота по круговой траектории



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$

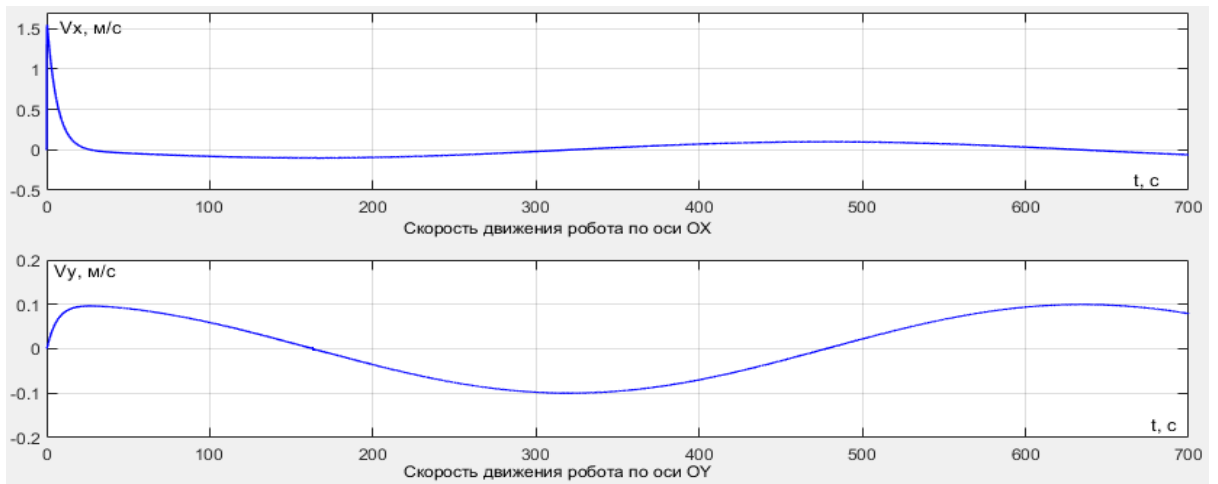


б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$

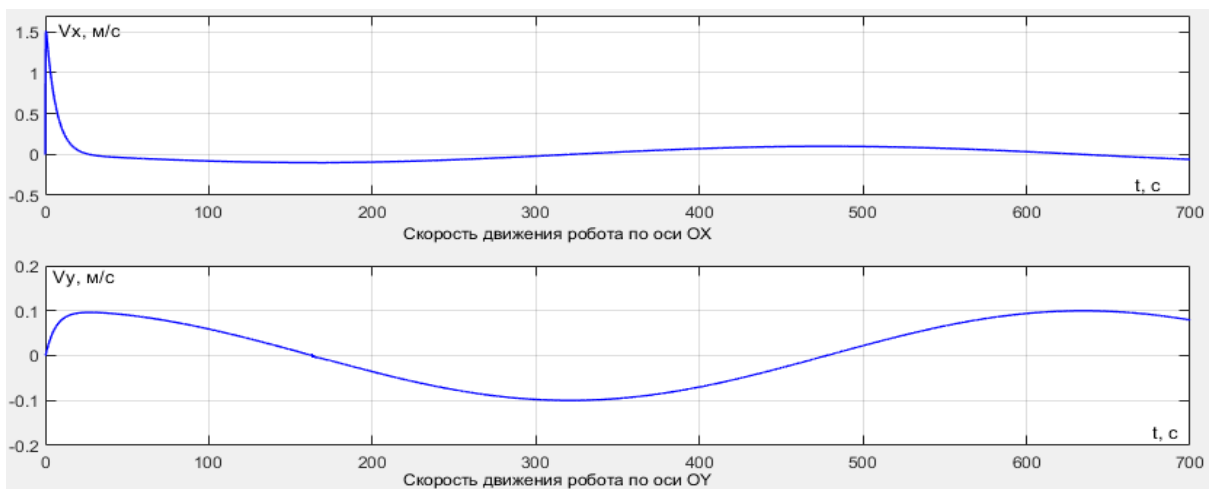


в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

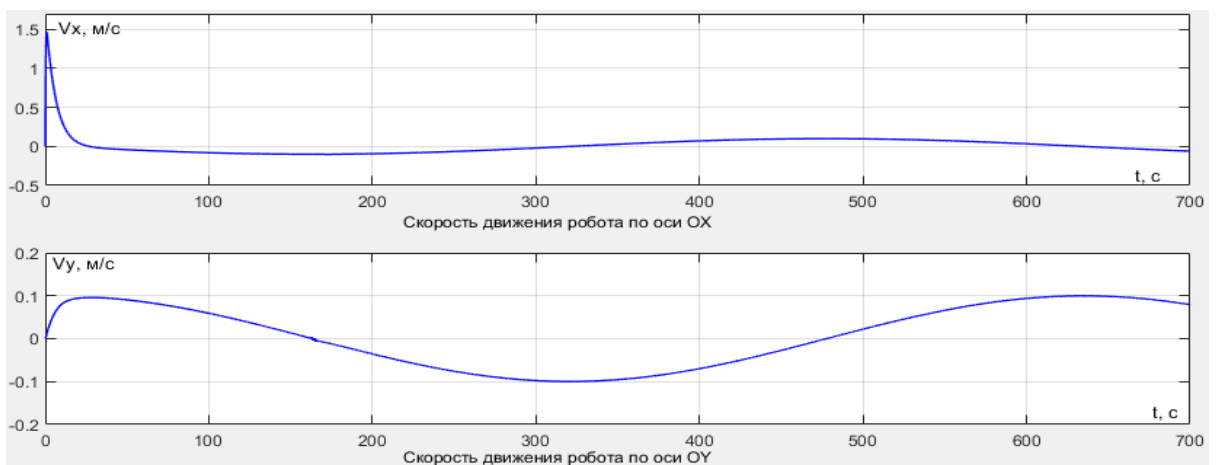
Рисунок 2. - Координаты робота и погрешности при движении по круговой траектории



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$



б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$

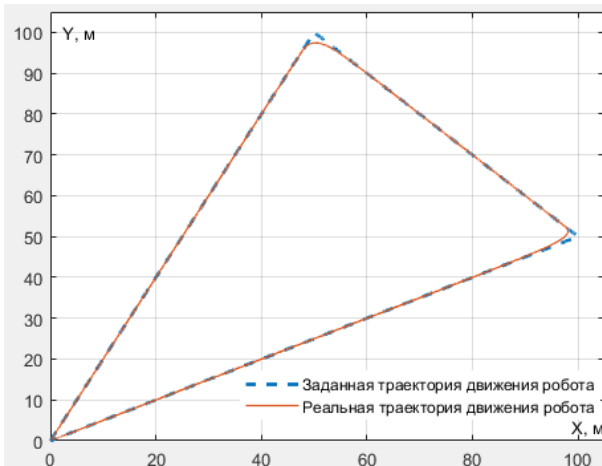


в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

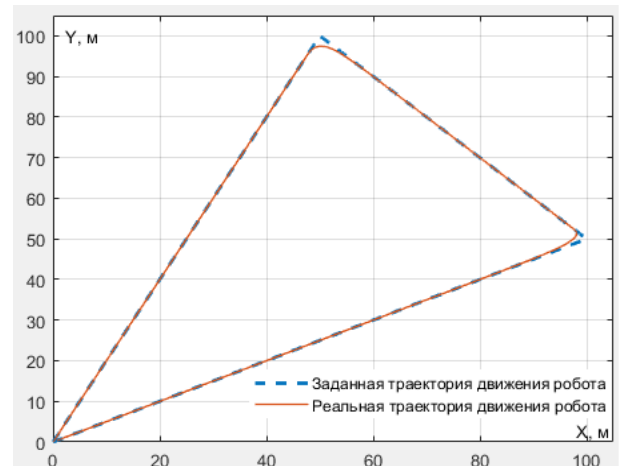
Рисунок 3. - Скорости движения робота по круговой траектории

2. Траектория треугольник

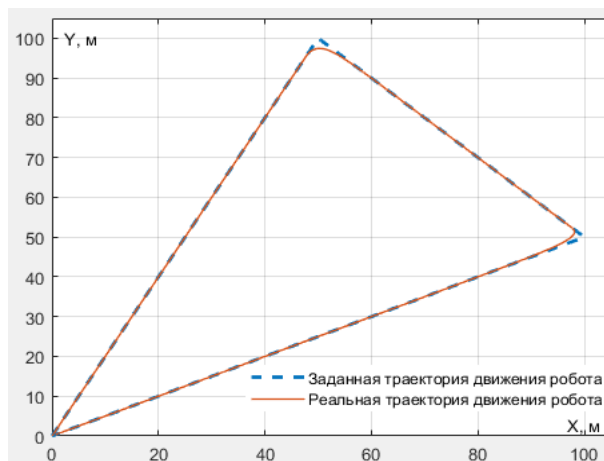
Результаты моделирования движения робота по траектории треугольник при трех разных постоянных времени двигателя робота приведены на рисунках 4 - 6.



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$

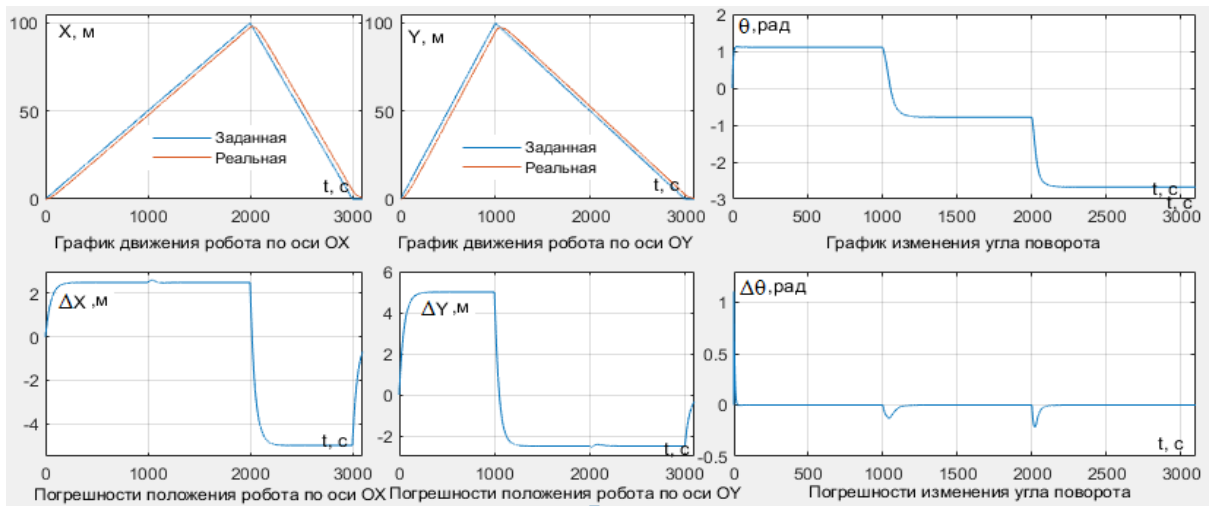


б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$

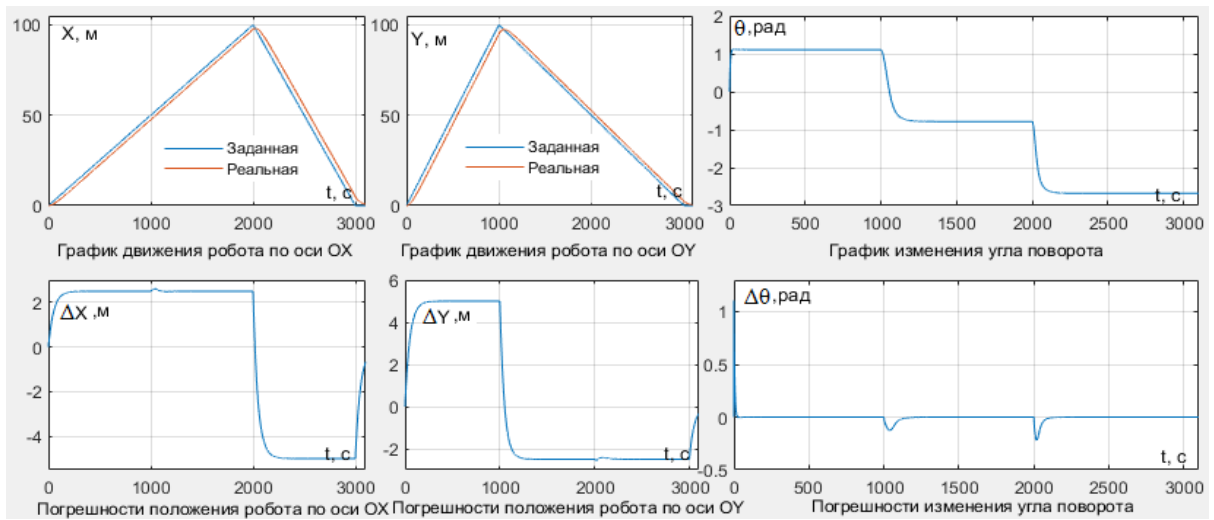


в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

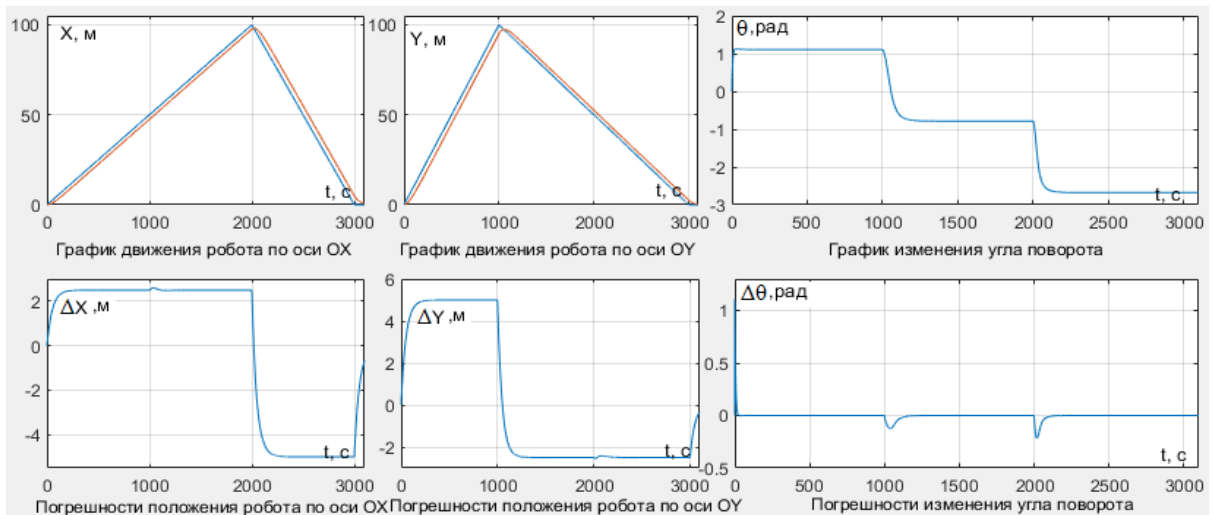
Рисунок 4. - Движение робота по траектории треугольник



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$



б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$



в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

Рисунок 5. - Координаты робота и погрешности при движении по траектории треугольник



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$



б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$

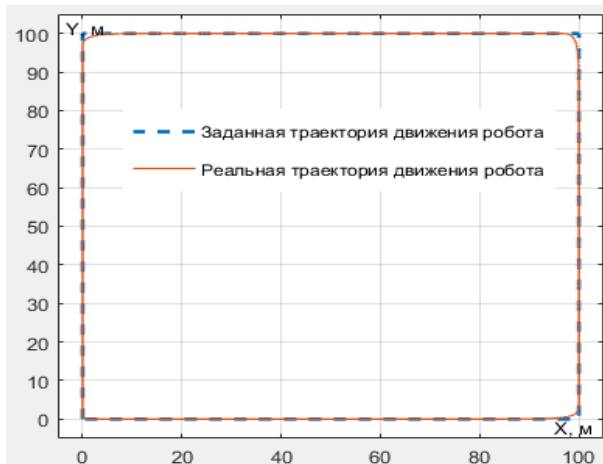


в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

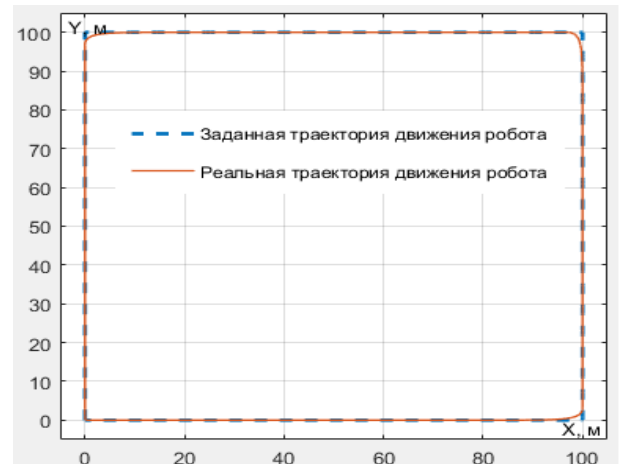
Рисунок 6. - Скорости движения робота по траектории треугольник

3. Траектория квадрат

Результаты моделирования движения робота по траектории квадрат при трех разных постоянных времени двигателя робота приведены на рисунках. 7 - 9.



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$

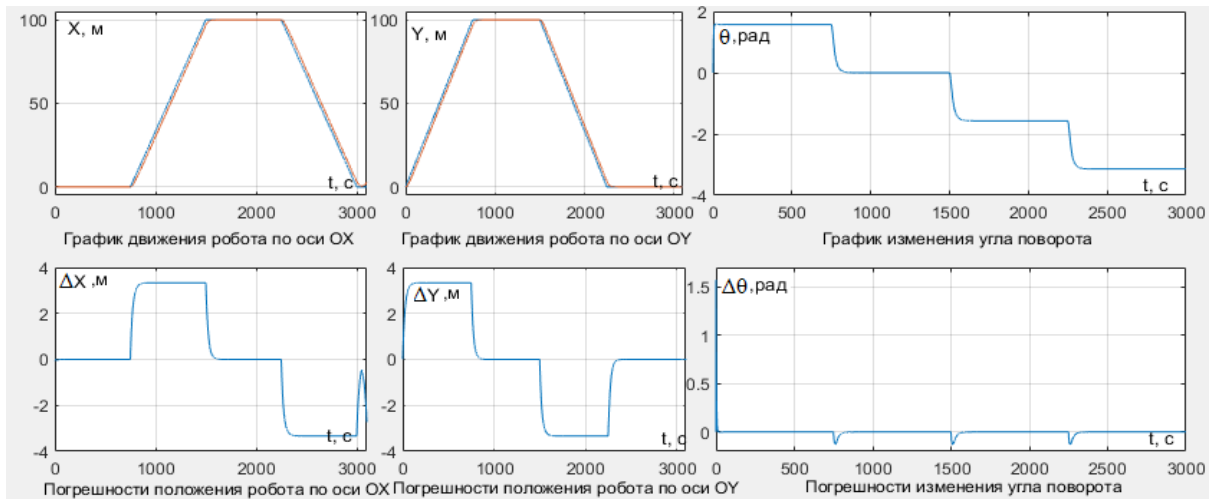


б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$

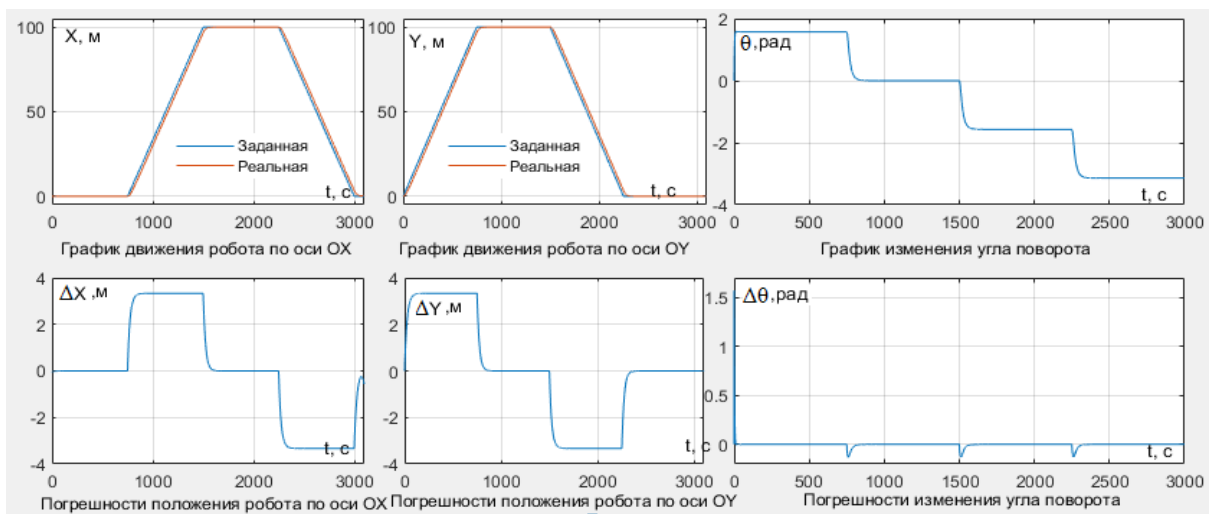


в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

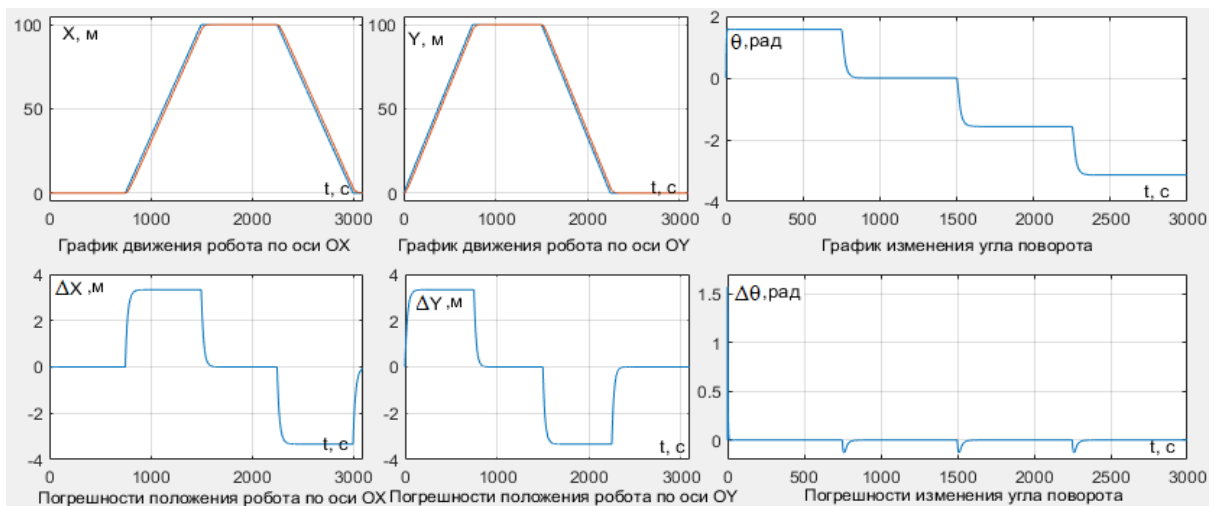
Рисунок 7. - Движение робота по траектории квадрат



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$

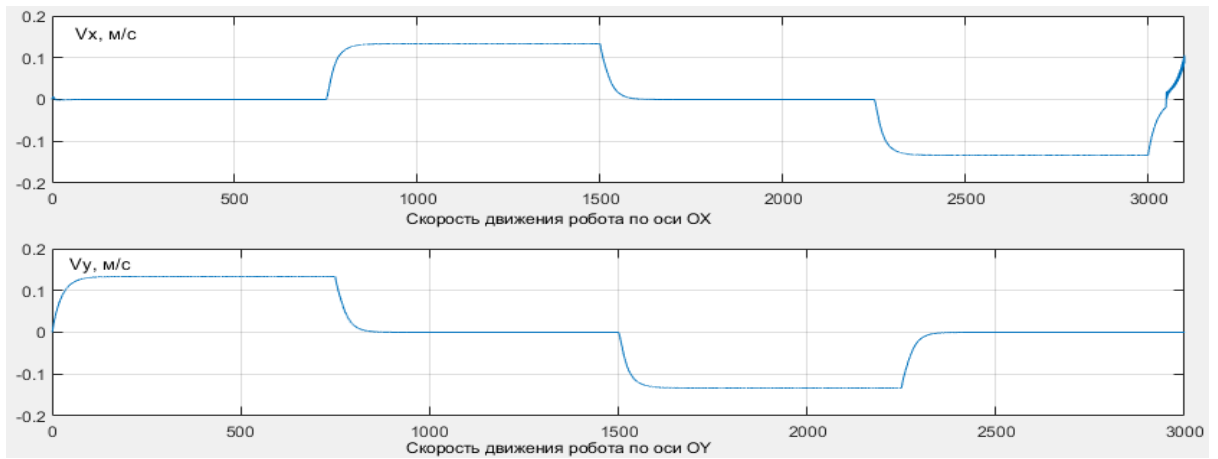


б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$

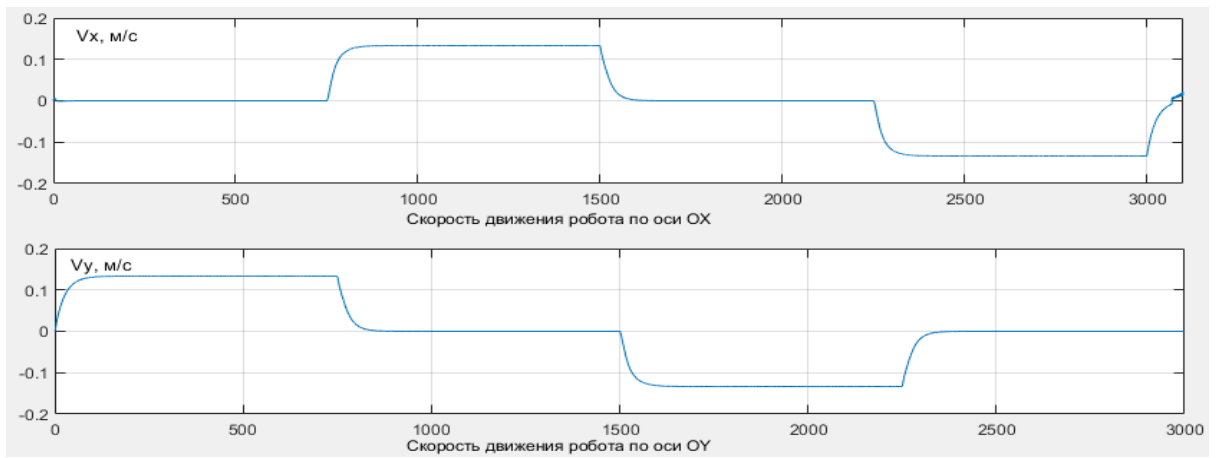


в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

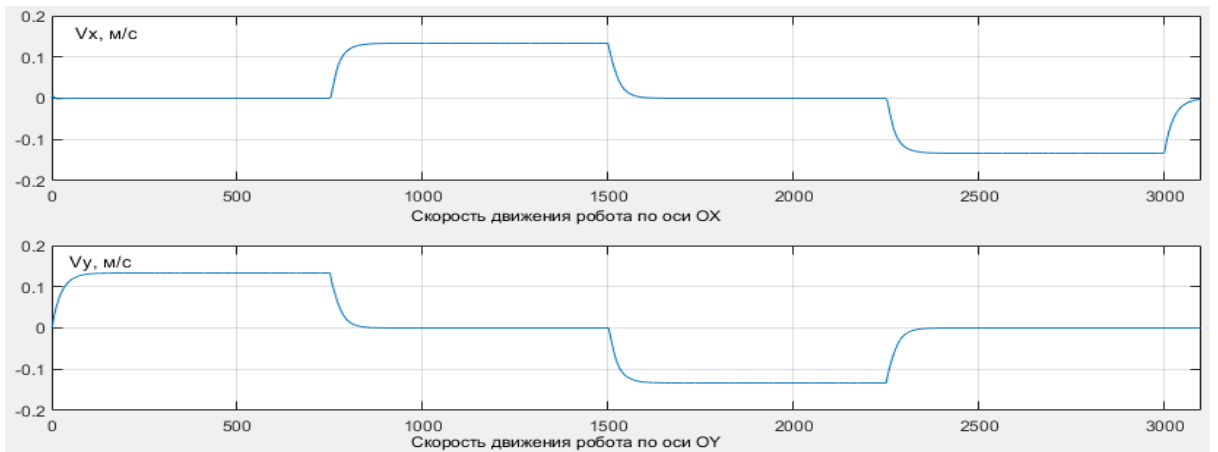
Рисунок 8. - Координаты робота и погрешности при движении по траектории квадрат



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$



б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$

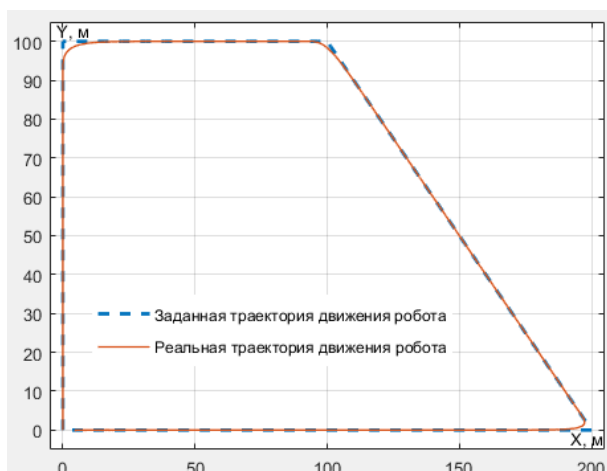


в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

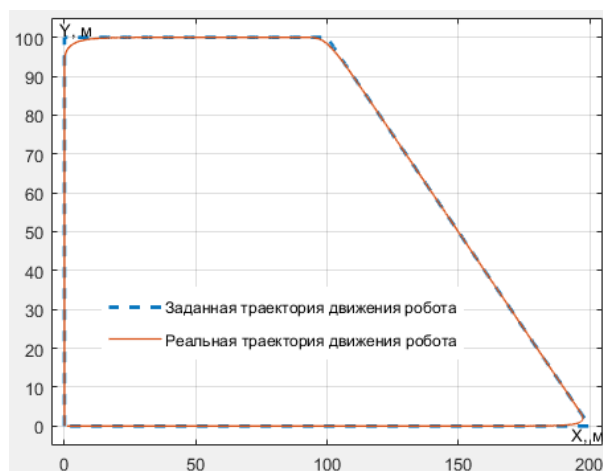
Рисунок 9.- Скорости движения робота по траектории квадрат

4. Траектория трапеция

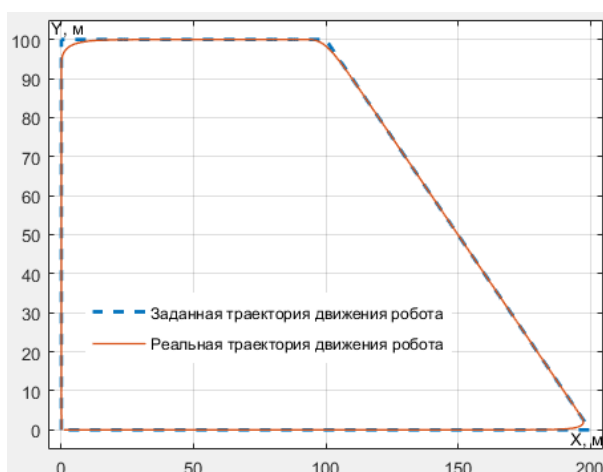
Результаты моделирования движения робота по траектории трапеция при трех разных постоянных времени двигателя робота приведены на рисунках 10 - 12.



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$

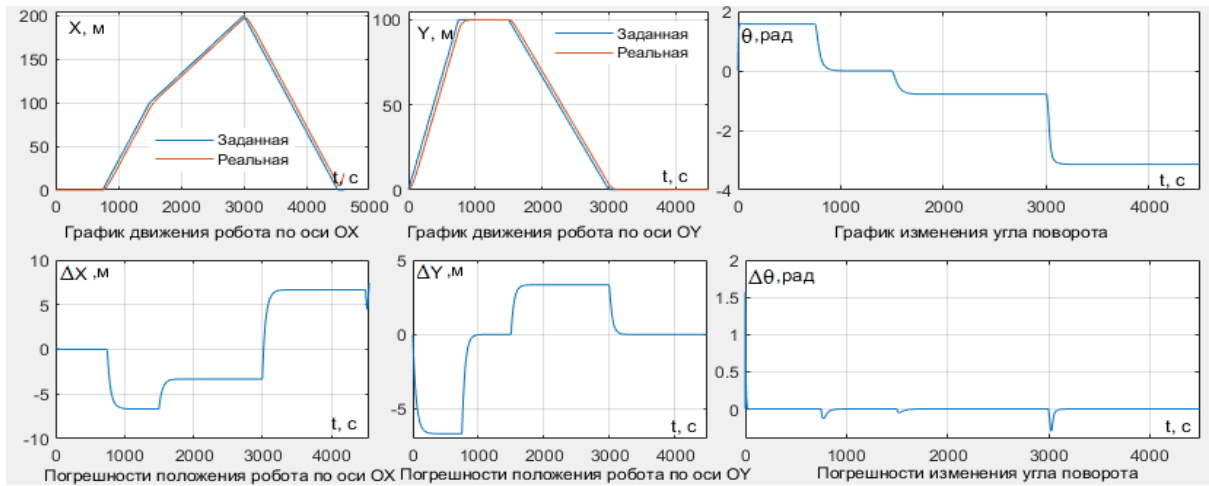


б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$

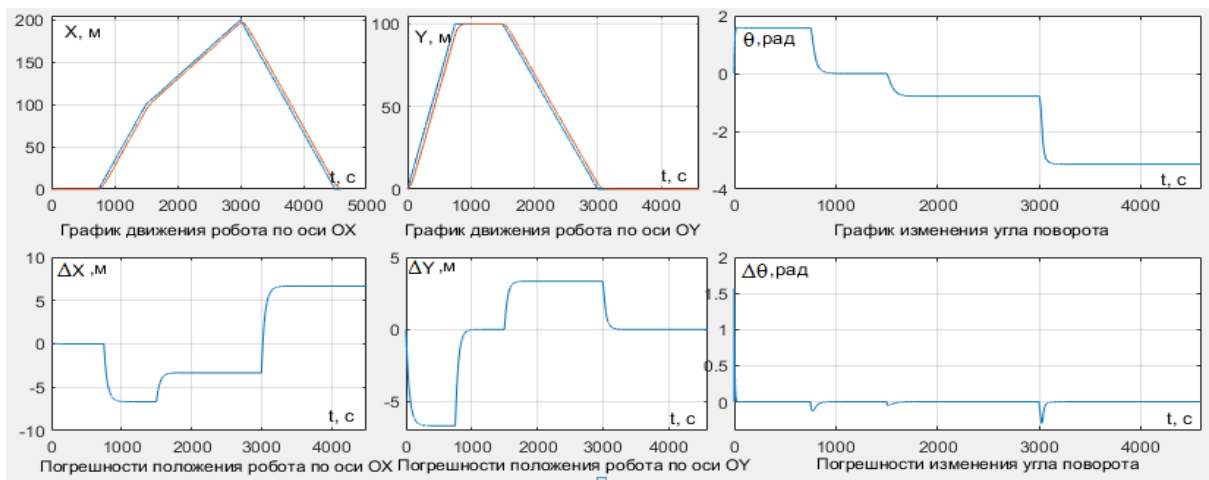


в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

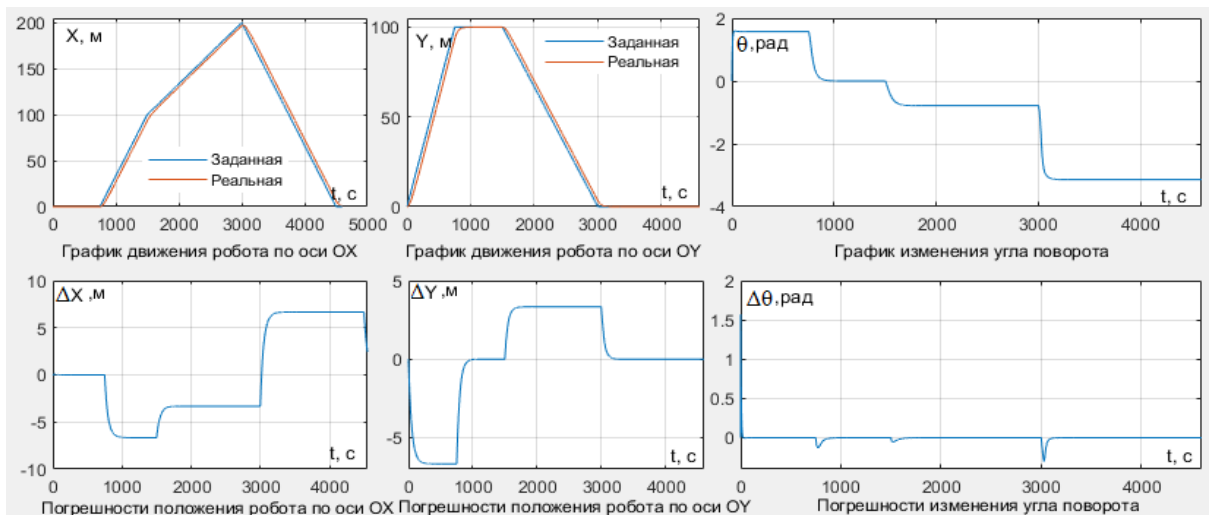
Рисунок 10. - Движение робота по траектории трапеция



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$

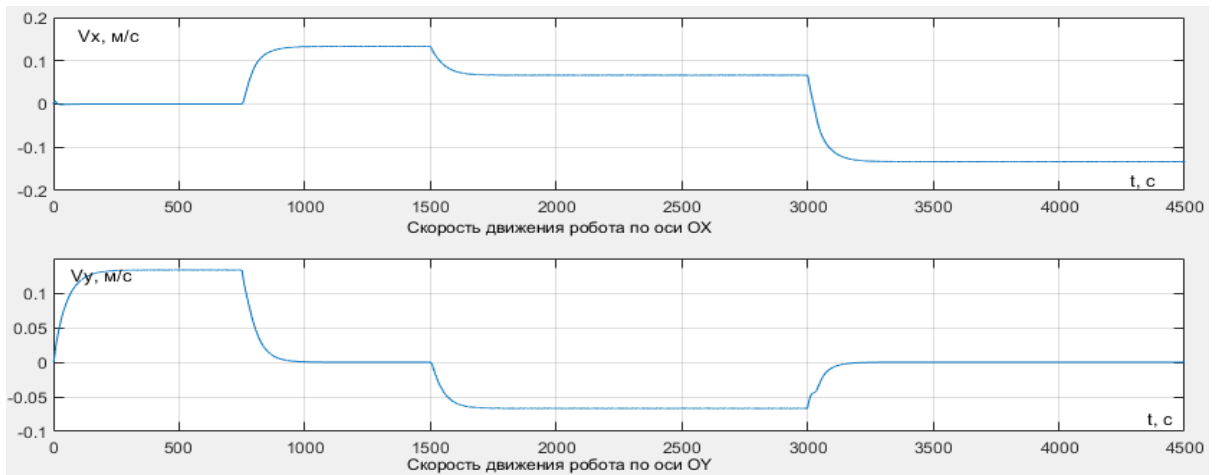


б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$

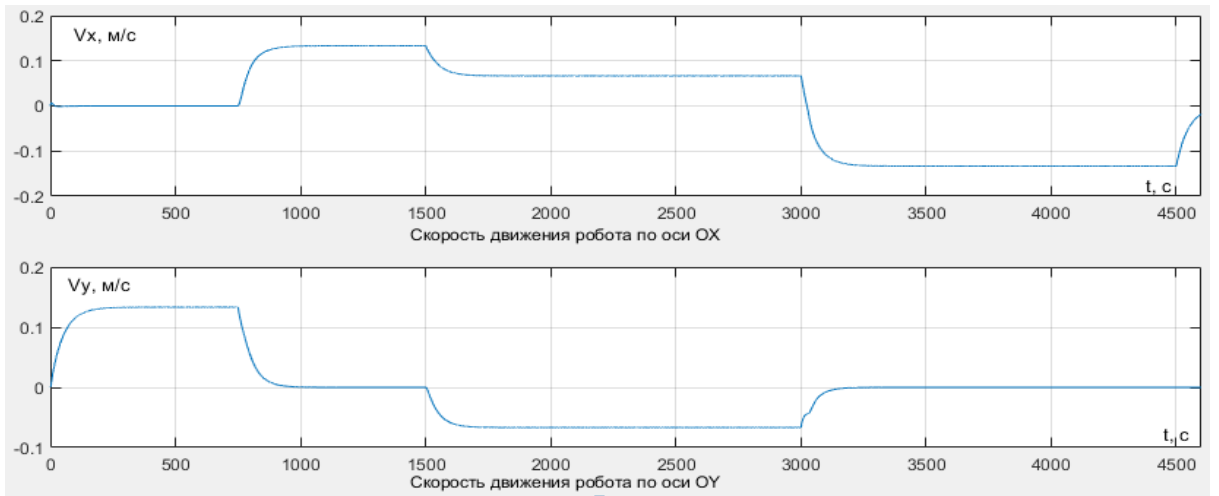


в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

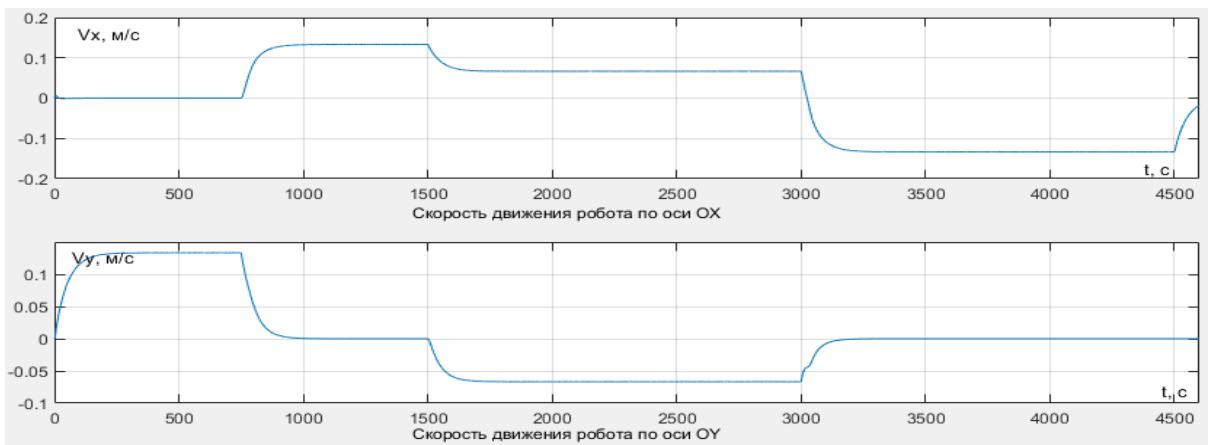
Рисунок 11. - Координаты робота и погрешности при движении по траектории трапеция



а) постоянная времени двигателя $t = 0.05$



б) постоянная времени двигателя $t = 0.1$



в) постоянная времени двигателя $t = 0.2$

Рисунок 12. - Скорости движения робота по траектории трапеция



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Утверждаю

Проректор

по научной работе

А.М. Наместников
«01» июня 2022 г.

АКТ

использования результатов диссертационной работы Чан В.Т. «Автономный контроль приемников спутниковых навигационных систем для повышения информационной надежности системы управления движением наземного робота»

Результаты диссертационной работы Чан В.Т. «Автономный контроль приемников спутниковых навигационных систем для повышения информационной надежности системы управления движением наземного робота», представленной на соискание степени кандидата технических наук, 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».

Использование полученных в работе основных результатов - алгоритма автономного контроля информационных отказов приемника СНС и способа управления мобильным наземным роботом с выбором режима управления на основе результатов контроля приемника СНС позволили повысить информационную надежность системы управления беспилотного автомобиля.

Директор Центра новых информационных технологий,
канд. техн. наук

К.В. Святлов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 209590

Устройство управления мобильным роботом

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ульяновский государственный технический университет" (RU)*

Авторы: *Киселев Сергей Константинович (RU), Туан Чан Ван (RU)*

Заявка № **2021122819**

Приоритет полезной модели **29 июля 2021 г.**

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации **17 марта 2022 г.**

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает **29 июля 2031 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 68b80077e14e40f0a94edbd24145d5c7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 26.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов