

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



**МЕЛЬНИКОВ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ  
БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ  
ИСКАЖЕНИЯ ИЛИ ПОДАВЛЕНИЯ НАВИГАЦИОННОГО ПОЛЯ  
GPS/ГЛОНАСС**

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка  
информации

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Линец Геннадий Иванович

Ставрополь – 2020

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ НАУЧНОЙ ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БЛА</b> .....	22
1.1. Анализ практических решений по достижению требуемой точности позиционирования БЛА.....	22
1.2. Анализ научно-методического аппарата повышения точности позиционирования БЛА.....	40
1.3. Выбор показателей и критериев, обеспечивающих требуемую точность позиционирования БЛА .....	44
1.4. Формализация и постановка общей научной задачи и частные задачи исследования .....	47
<b>ВЫВОДЫ</b> .....	52
<b>2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БЛА В РЕЖИМЕ АВТОНОМНОГО ПОЛЕТА</b> .....	55
2.1. Обоснование последовательности решения научной задачи и логической взаимосвязи научных результатов.....	55
2.2. Разработка способа определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС .....	60
2.2.1. Постановка частной задачи на исследование .....	61
2.2.2. Способ определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.....	62

<b>2.3. Разработка методики идентификации состояний трассы распространения СРНС .....</b>	<b>70</b>
<b>2.3.1. Постановка частной задачи на разработку методики .....</b>	<b>70</b>
<b>2.3.2. Методика идентификации состояний трассы распространения СРНС.....</b>	<b>71</b>
<b>2.4. Разработка метода оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС .....</b>	<b>78</b>
<b>2.4.1. Постановка частной задачи на разработку метода .....</b>	<b>79</b>
<b>2.4.2. Метод оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС .....</b>	<b>79</b>
<b>2.4.3. Методика оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС для нормального закона.....</b>	<b>82</b>
<b>2.4.4. Методика оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС для закона Релея .....</b>	<b>85</b>
<b>2.4.5. Методика оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС для закона Райса .....</b>	<b>87</b>
<b>2.4.6. Методика оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС для закона Накагами .....</b>	<b>92</b>
<b>2.5. Разработка способа управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС ...</b>	<b>95</b>
<b>2.5.1. Постановка частной задачи на исследование .....</b>	<b>95</b>
<b>2.5.2. Способ управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС .....</b>	<b>97</b>
<b>ВЫВОДЫ.....</b>	<b>102</b>
<b>3. МОДЕЛИ, АЛГОРИТМ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БЛА .....</b>	<b>107</b>

<b>3.1. Разработка практических рекомендаций по формированию устройства определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС и алгоритма его функционирования .....</b>	<b>107</b>
<b>3.2. Имитационная модель идентификации состояний трассы распространения СРНС .....</b>	<b>118</b>
<b>3.3.Имитационная модель оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС.....</b>	<b>121</b>
<b>3.4.Сравнительная оценка точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета, при искажении или подавлении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС и вывод о достижении цели исследования.....</b>	<b>125</b>
<b>ВЫВОДЫ.....</b>	<b>130</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>134</b>
<b>СПИСОК ЗАТЕКСТОВЫХ ССЫЛОК.....</b>	<b>139</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>157</b>
<b>Приложение А Акты внедрения результатов исследования .....</b>	<b>177</b>
<b>Приложение Б. Программа идентификации закона распределения трассы распространения СРНС .....</b>	<b>179</b>
<b>Приложение В Программа идентификации состояний трассы распространения СРНС .....</b>	<b>186</b>
<b>Приложение Г. Программа оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС для нормального закона распределения.....</b>	<b>188</b>
<b>Приложение Д Программа оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС для закона Релея .....</b>	<b>193</b>
<b>Приложение Е Программа оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС для закона Райса .....</b>	<b>194</b>

<b>Приложение Ж</b>	<b>Программа оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС Накагами .....</b>	<b>199</b>
<b>Приложение И</b>	<b>Алгоритм управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.....</b>	<b>205</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.** Использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА) легкого класса мультироторного типа в различных сферах деятельности, с каждым годом становится все более распространенным. Наибольший потенциал их использования заключается в полетах за пределами прямой видимости, в автономном режиме. Под автономным режимом будем понимать движение БЛА по заранее заданному маршруту, с использованием бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) и GPS/ГЛОНАСС при эпизодическом вмешательстве оператора, если это возможно. Однако, использование БЛА в данном режиме функционирования накладывает жесткие требования к навигационным характеристикам.

Точность позиционирования БЛА является важнейшей характеристикой, определяющей качество и возможность выполнения полетного задания, и зависит от множества факторов. В основе способа управления существующими БЛА лежит использование для навигации спутниковых навигационных систем (СНС), основными из которых являются системы GPS и ГЛОНАСС, а также их функциональные дополнения. Однако, при искажении навигационного поля (НП) возникают существенные ошибки определения местоположения, что затрудняет или делает невозможным использование БЛА в подобных условиях. Летательные аппараты вынуждены прерывать полет и выполнять аварийную посадку. Зачастую, в подобных условиях БЛА терпит аварию.

НП, создаваемое СНС, подвержено непреднамеренному искажению искусственными сооружениями, рельефом местности, средствами связи, имеющими большую мощность излучения, существенно превышающую НП создаваемой СНС, а также преднамеренному искажению специальными

устройствами для захвата управления БЛА или подавлению сигнала СНС. Величина искажений НП может меняться в больших пределах по траектории полета. Наиболее существенным естественным источником ошибок позиционирования являются ионосферные искажения сигнала.

Альтернативными методами позиционирования являются инерциальные навигационные системы, однако, они обладают высокой зашумленностью. Поэтому, на сегодняшний день их использование целесообразно только в случае отсутствия сигнала GPS/ГЛОНАСС.

Значительный вклад в развитие систем позиционирования и радионавигации внесли следующие ученые: Кловский Д.Д., Соيفер В.А., Тихонов В.И., Перов А.И, Харисов В.Н., Zhodzishsky M., Бакитько Р.В., Сосулин Ю.Г., Kaplan E., Moelker D-J., Зюко А.Г., Левин Б.Р., Ван Трис Г., Сипаров С.В., Шестаков И.Н., Рябов И.В., Вейзман А., Бен-Моше Б., Грувс П.Д., Корнилов И.Н., и другие.

Существующие методы определения состояний трассы распространения спутникового радионавигационного сигнала (СРНС). основываются, как правило, на прогнозных моделях. Однако данные модели не позволяют в полной мере учитывать влияние мелкомасштабных ионосферных неоднородностей и дают лишь приближенные значения по изменению параметров определяющих состояние трассы распространения СРНС.. Широко используемые методы повышения точности позиционирования БЛА, основанные на использовании системы дифференциальной коррекции GPS, обладают небольшим эффективным радиусом использования (до 25 км) и требуют дополнительного канала связи с навигационной аппаратурой потребителя. В данном случае, для обеспечения мобильности пользователя необходимо построение распределенной сети базовых станций, что является экономически нецелесообразным.

**Противоречие в практике** состоит в том, что существующие практические решения используемые для повышения точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета не обеспечивают требуемой точностью

позиционирования при искажении/подавлении НП. Ограничения на массогабаритные показатели БЛА легкого класса не позволяют использовать более высокоточное и дополнительное оборудование, обеспечивающее лучшие характеристики и показатели точности позиционирования БЛА.

**Противоречие в теории** состоит в том, что существующие теоретические подходы, не позволяют обеспечить допустимую ошибку навигационного положения БЛА в режиме автономного полета. Для разрешения данного противоречия необходимо разработать новый научно-методический аппарат, а именно – методы, модели и способы, позволяющий повысить точность позиционирования БЛА легкого класса в условиях искажения/подавления НП GPS/ГЛОНАСС.

**Объектом исследований** является беспилотный летательный аппарат легкого класса.

**Целью исследований** является повышение точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета, при искажении или подавлении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, на основе управления движением БЛА и разработки методов идентификации состояния навигационного поля.

**Предметом исследований** являются методы и способы, обеспечивающие требуемую точность позиционирования БЛА при обнаружении искажения/подавления навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.

**Научная задача диссертационных исследований** состоит в разработке научно-методического аппарата, обеспечивающего повышение точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета, по показателю ошибки определения навигационного положения БЛА в условиях подавления или искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.

Для решения общей научной задачи проведена её декомпозиция и определены частные задачи исследований:

1. Разработка способа определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.



2. Разработка методики идентификации состояний трассы распространения СРНС..

3. Разработка метода оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС..

4. Разработка способа автоматического управления беспилотным летательным аппаратом в условиях подавления или искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.

5. Разработка практических рекомендаций по повышению точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Способ определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.

2. Методика идентификации состояний трассы распространения СРНС..

3. Метод оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС.

4. Способ автоматического управления беспилотным летательным аппаратом в условиях подавления или искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.

5. Практические рекомендации по повышению точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета

#### **Методология и методы исследования.**

При решении частных задач исследования использованы методы системного анализа, теории вероятностей, теории случайных процессов, математического моделирования, статистической теории принятия решений.

#### **Соответствие шифру специальности.**

Настоящая работа соответствует шифру специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации (в технических системах)» следующим пунктам паспорта специальности:

1. Теоретические основы и методы системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

5. Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации.

7. Методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем.

**Научная новизна.** Полученные в работе новые результаты, а также их составные части обладают следующими отличительными признаками новизны.

1. Способ определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, отличающийся от известных тем, что в нем использована новая совокупность выполняемых в определенной последовательности действий, с соблюдением введенных правил принятия решений, а именно:

для определения факта искажения НП использована полиномиальная аппроксимация массива измерений местоопределения (МО) БЛА с дискретностью, равной периоду поступления навигационных параметров;

для вероятностной оценки состояния НП, с использованием совокупности признаков по полученной выборке МО, использован Байесовский подход;

определяется доверительная апостериорная вероятность оценки состояния НП с использованием способа максимизации апостериорной плотности;

для обнаружения факта искажения и идентификации видов помехового воздействия определено решающее правило использующее критерий минимизации СКП.

2. Для идентификации состояний трассы распространения СРНС, разработана методика, отличающаяся от известных тем, что впервые для решения

подобной задачи использован метод модовой декомпозиции и введено сравнение по выбранному критерию согласия текущего состояния трассы распространения СРНС с эталонными распределениями Релея, Райса, Накагами и нормального распределения.

3. Впервые разработан метод оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС, для законов распределения Райса, Накагами и нормального закона распределения. Получены численные решение оптимальных порогов классификации с точностью не хуже 0,01. Использование данного метода позволило обеспечить выбор оптимальных порогов классификации при обнаружении сигнала на фоне шума и минимизировать вероятности возникновения ошибок первого и второго рода.

4. С целью обеспечения безопасности полета и возможности выполнения полетного задания в условиях искажения/подавления НП, разработан способ автоматического управления БЛА при отсутствии командного радиоканала дистанционного управления, отличающийся от известных тем, что введены новые, выполняемые в определенной последовательности операции:

определение время автономного полета, при котором погрешность координат достигнет заданного значения;

на основании результатов выполнения способа определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, осуществляется совокупность типовых маневров управления БЛА, обеспечивающая возможность выполнения полетного задания;

при обнаружении ионосферных искажений осуществляется процедура идентификации состояний трассы распространения сигналов СРНС, основанная на разработанной методике;

на основании результатов методики идентификации состояний трассы распространения СРНС, осуществляется оптимизация порогов классификации состояний трассы распространения СРНС;

5. Разработаны практические рекомендации по повышению точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета:

для идентификации состояний НП GPS/ГЛОНАСС предложено использование следующих типовых состояний:

- $\Delta_1$  – нормальное (неискаженное) состояние НП при  $h_s \geq 45$  дБм/Гц;
- $\Delta_2$  – незначительно искаженное состояние НП при  $h_s = 40 \dots 33$  дБм/Гц, вызванное эффектом отражения навигационных сигналов и, как следствие, интерференционными замираниями;
- $\Delta_3$  – искаженное состояние НП при  $h_s = 33 \dots 28$  дБм/Гц, вызванное ионосферными возмущениями;
- $\Delta_4$  – нарастающая преднамеренная помеха при  $h_s = 28 \dots 15$  дБм/Гц;
- $\Delta_5$  – скачкообразное энергетическое подавление при  $h_s = 20 \dots 10$  дБм/Гц.

Таким образом, в работе получены новые результаты, которые позволяют разрешить научную задачу, имеющую важное значение для развития теории управления и теории помехоустойчивости, в частности – применительно к управлению БЛА по сигналам СРНС (соответствует п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней»).

**Теоретическая значимость** результатов работы заключается:

в развитии существующих методов определения факта искажения НП, позволяющих не только осуществлять определение факта, но и осуществлять идентификацию типа искажения НП

разработке методики идентификации состояния трассы СРНС, позволяющей обоснованно использовать процедуру оптимизации порогов классификации;

разработке метода оптимизации порогов классификации состояния трассы СРНС, позволяющей, в отличие от известных методов обеспечивать обнаружение сигнала на фоне шума при более низких соотношениях сигнал/шум;

в разработке способа автоматического управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении или искажении НП, позволяющего обеспечить безопасность полета и учитывающего факт и тип искажения НП.

**Практическая значимость результатов работы:**

Состоит в актуализации разработанных методов и способов к потребностям практики, заключающимся в учете типа искажения НП, а также повышению чувствительности навигационного приемника путем оптимизации порогов классификации. Разработанные методы и способы могут быть использованы в составе третьего уровня управления существующих БЛА. Использование полученных результатов диссертационной работы позволит на практике обеспечить точность позиционирования БЛА в 350 м, по показателю ошибки определения навигационного положения БЛА в условиях подавления или искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.

**Достоверность и обоснованность** полученных автором научных и практических результатов определяется: использованием основных принципов системного подхода; ясной трактовкой физического смысла полученных результатов и непротиворечивостью известным научным данным; обоснованностью выбора исходных данных, основных допущений и ограничений при постановке частных научных задач; согласованностью полученных результатов с данными, полученными другими авторами и опубликованных в научно-технической литературе; практическим внедрением предложенных методов; соответствием расчетных результатов с результатами практических исследований, проведенных автором.

Достоверность полученных теоретических положений и выводов подтверждается результатами имитационного моделирования, натурального эксперимента, апробации и внедрения предложенных методов и способов.

**Реализация и внедрение результатов работы.**

1. Представленная работа является частью научных исследований проводимых СКФУ в рамках проекта «Разработка роботизированного

беспилотного летательного аппарата мультироторного типа с использованием бесплатформенной инерциальной навигационной системы» Федеральной Целевой Программы на 2014-2020 годы (уникальный идентификатор RFMEFI57818X0222) при финансовой поддержке Министерства Науки и Высшего Образования России, при непосредственном участии автора.

2. Результаты диссертационной работы использованы в ООО «Стилсофт» г. Ставрополь в процессе разработки навигационной аппаратуры РБЛА (приложение А).

3. Научные результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры инфокоммуникаций Северо-Кавказского Федерального Университета в рамках лабораторного практикума дисциплины «Спутниковая связь и навигация» направления подготовки 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, направленность/профиль «Системы и устройства радиотехники и связи» (приложение А).

#### **Апробация результатов исследования.**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая наука для развития информационного общества» (Ставрополь, 2018 г.), Информационные технологии в промышленности и производстве (Томск, 2017), REMS 2018, Russian Federation & Europe Multidisciplinary Symposium on Computer Science and ICT (Stavropol 2018), VII Всероссийская научная конференция с международным участием «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений» (Ставрополь-Уфа, 2019), Young Scientist's Third International Workshop on Trends in Information Processing (Ставрополь-Архыз, 2019), Национальный СуперКомпьютерный Форум (Переславль-Залесский, 2019 г.), Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая наука для развития информационного общества» SDIS -2019 (Ставрополь, 2019), XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых -

пионеров освоения космического пространства (Москва, 2020), 9th Computer Science On-line Conference (Злин, 2020).

**Публикации.** Основные результаты диссертации отражены в 30 печатных работах [1-30], среди которых: 5 статей опубликовано в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований по специальности 05.13.01 (Современная наука и инновации, Системы управления связи и безопасности, Известия инженерного института физики)[1-5]; 2 статьи опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований по группе специальностей 05.13.00 (Инфокоммуникационные технологии)[6, 7]; 5 статей в научных изданиях, входящих в систему индексирования научных работ Scopus [8-12]; 2 статьи в научных изданиях, входящих в систему индексирования научных работ Web of Science[13,14].

Получен патент ФИПС на полезную модель «Устройство определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия на приемник роботизированного беспилотного летательного аппарата» [15] и 7 свидетельств государственной регистрации программ для ЭВМ [16-22], которые, в соответствии с п. 13 «Положения о присуждении ученых степеней» приравниваются к публикациям в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК.

#### **Личное участие соискателя в получении результатов.**

Все изложенные в работе результаты исследований получены при непосредственном участии автора.

В работах в соавторстве соискателю принадлежит ведущая роль в формировании идей, разработки методов и способов, алгоритмов по тематике исследований. В работах, результаты которых опубликованы совместно с Линцом Г.И., авторский вклад составляет обоснование, математическое решение и разработка имитационных моделей на их основе. В работах, результаты которых опубликованы совместно с Линцом Г.И., Исаевым А.М., Исаевым М.А., и

Никулиным В.И., авторским вкладом является обоснование актуальности исследований, математическое решение и разработка имитационных моделей на их основе. В работах, результаты которых опубликованы совместно с Сагдеевым К.М., Исаевым А.М., Исаевым М.А., Линцом Г.И., авторским вкладом является обоснование целесообразности идентификации факта искажения/подавления навигационного поля GPS/ГЛОНАСС на борту БЛА, разработка имитационных моделей, устройства определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия на приемник роботизированного БЛА.

### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, обозначений и сокращений, списка затекстовых ссылок, списка литературы, включающего 129 источников, 8 приложений и изложена на 209 страницах машинописного текста.

В **первой главе** показано, что, несмотря на актуальность данной темы и продолжительный период её изучения, до сих пор остается ряд нерешенных проблем, являющихся исключительно важными для проектирования и практического применения БЛА в условиях искажения/подавления НП GPS/ГЛОНАСС.

Проведен анализ точностных характеристик существующих БЛА легкого класса. Показано, что при искажении или подавлении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС большинство БЛА не могут выполнять полетное задание с требуемым качеством позиционирования. По этой причине, в диссертационной работе в качестве объекта исследования выбраны беспилотные летательные аппараты легкого класса.

Рассмотрена навигационная система БЛА легкого класса. Определены источники навигационной информации и способы контроля целостности НП, выявлены их недостатки.

Проведен анализ исследований и разработок в области БИНС. Показано, что БИНС обладает существенным недостатком – зашумленностью,



увеличивающейся во времени, что не позволяет использовать их самостоятельно, без СНС. Сделан вывод о необходимости идентификации факта и типа искажения НП GPS/ГЛОНАСС с целью своевременного перехода к навигационным данным БИНС при искажении/глушении сигнала GPS/ГЛОНАСС для продолжения полетного задания с допустимой ошибкой местоопределения БЛА.

Проведен системный анализ факторов, влияющих на сигнал СНС, определены естественные и искусственные источники ошибок позиционирования. Показано, что наиболее существенным источником естественных ошибок является ионосфера и возникающие флуктуации сигналов СНС. Среди искусственных помех выделены спуфинг и энергетическое подавление СНС.

Определены требования к точности позиционирования БЛА легкого класса. Ошибка определения навигационного положения в пространстве не должна превышать 500 м, в течение 5 минут полета после обнаружения факта подавления/искажения навигационного сигнала.

Проведен анализ существующего научно-методического аппарата повышения точности позиционирования в условиях ионосферных возмущений и подавления НП. Показано, что использование прогнозных моделей ионосферы не способно обеспечить описание и учет всех изменений в реальном времени, что негативным образом сказывается на точности прогноза оценок в реальном времени. Использование коррекции принимаемого сигнала требует наличия дополнительного канала связи с БЛА для передачи корректирующих компонент, что требует использования дополнительного приемника в составе БЛА, имеющего ограничения на массогабаритные показатели. При этом, при неточном определении местоположения базового приемника вся навигационная система оказывается смещенной за счет наличия ошибки координат базового приемника.

Проведен анализ научно-методического аппарата повышения точности БЛА

**Вторая глава** диссертации посвящена решению четырех частных задач исследований. **Первая частная задача** исследований посвящена разработке способа определения факта и типа искажения навигационного поля

GPS/ГЛОНАСС. Показано, что БЛА могут функционировать в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки. Проведена постановка **первой частной научной задачи исследований**, определены исходные данные для ее решения и ограничения.

Для определения факта искажения НП использован подход, суть которого заключается в полиномиальной аппроксимации некоторого массива из  $N$  достоверных измерений  $R = (R_1, R_2, \dots, R_j, \dots, R_N)$  в виде оценок местоопределения (МО) БЛА на интервале времени  $t \in [t_o, t_a]$  с шагом  $\tau$ , равным периоду поступления навигационных параметров. Для вероятностной оценки состояния НП, при использовании совокупности признаков по полученной выборке МО, использован Байесовский подход. Получена доверительная апостериорная вероятность с использованием способа максимизации апостериорной плотности. Определено решающее правило по критерию минимизации СКП, на основании которого определены неравенства для обнаружения факта искажения и идентификации видов помехового воздействия. Описана процедура идентификации активной подмены координат СРНС.

Произведена постановка **второй частной задачи исследований**. С целью выбора оптимального критерия, проведено сравнение критериев согласия с использованием эталонных распределений Релея, Райса, Накагами и нормального распределения на одинаковых выборках. Лучшим критерием является критерий Колмогорова-Смирнова, имеющий точность идентификации более 95% при меньшем времени вычислений. Выделение огибающей сигнала осуществлялось с использованием эмпирической модовой декомпозиции сигнала. Разработана методика идентификации состояний трассы распространения СРНС.

Произведена постановка **третьей частной задачи исследований**, посвященная оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС. В качестве решающего правила, обеспечивающего наивысшую точность системы идентификации, использован критерий Неймана-Пирсона. Показано, что оптимизация порогов классификации  $(x_0, y_0)$  сводится к

решению общей системы уравнений. На основании общей системы уравнений, получена система уравнений, для случаев, когда состояние канала связи описывается нормальным законом распределения, распределением Райса и Накагами.

Произведена постановка **четвертой частной задачи** исследований. Разработан способ управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС. Время автономного полета, при котором погрешность координат достигнет заданной  $\Delta\sigma_k$ , определяют из уравнения, составленного на основе формулы экспресс-оценки погрешностей. На основании реализованной в БЛА процедуры управления и поддерживаемых типовых маневров, с использованием способа определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, разработан способ управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС. При обнаружении факта искажения навигационного поля, осуществляется процедура идентификации состояний спутниковых каналов связи. На основании полученных результатов производится оптимизация порогов классификации состояний спутниковых каналов связи.

В третьей главе представлены практические рекомендации (**пятая научная задача**) по повышению точности позиционирования БЛА в условиях искажения/подавления НП GPS/ГЛОНАСС и проведен сравнительный анализ полученных результатов.

Реализована имитационная модель устройства определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия. Разработан алгоритм управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, позволяющий обеспечить возможность выполнения полетного задания в автономном режиме полета при отсутствии радиоканала дистанционного управления и искаженном или подавленном НП.

Адекватность разработанной модели подтверждена данными, полученными с использованием трека навигационного приемника БЛА u-blox 8

Для определения состояний трассы распространения СРНС разработана имитационная модель идентификации состояний трассы распространения СРНС, позволяющая осуществлять идентификацию закона распределения огибающей навигационного сигнала. Данная модель актуальна для применения в навигационных приемниках, у которых отсутствует возможность анализа квадратурных компонент сигнала, при эксплуатации в условиях повышенной вероятности возникновения ионосферных флуктуаций.

Для оптимизации порогов классификации состояний спутниковых каналов разработаны имитационные модели, с целью повышения чувствительности навигационного оборудования БЛА. На основании полученных решений, проведено сравнение реализованного метода с существующими методами определения порогов классификации. Результаты анализа показали, что предложенный метод позволяет обеспечить выигрыш помехоустойчивости в 1-3 дБ/Гц. Проведен сравнительный анализ методов решения задачи оптимизации порогов классификации. При сравнении алгоритмов решений методами Ньютона, Пауэлла, Бройдена и Ньютона-Крылова выявлено, что все они обладают точностью не хуже  $10^{-3}$ . Определено, что для закона Накагами наиболее предпочтительно использовать метод Ньютона-Крылова, для закона Райса – метод Пауэлла, а для нормального распределения – метод Ньютона по критерию наименьшего времени вычисления.

Сравнительный анализ точности позиционирования БЛА в условиях искажения/подавления НП показал, что своевременная идентификация факта искажения НП позволяет избежать суммарной ошибки искаженного НП и собственных ошибок БИНС.

Показано, что в случае использования процедуры оптимизации порогов классификации, связь сохранялась с большим количеством спутниковых аппаратов. Проведение летных испытаний при различных состояниях НП

позволило определить, что в течении 5 минут после факта искажения/подавления НП, разработанный НМА обеспечивает среднюю ошибку местоопределения в 350 м для БЛА легкого класса.

**В заключении** подведены итоги диссертационного исследования, сделаны выводы по работе в целом, обозначены направления дальнейших исследований.

# 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ НАУЧНОЙ ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БЛА

## 1.1. Анализ практических решений по достижению требуемой точности позиционирования БЛА

На сегодняшний день основным показателем качества функционирования БЛА легкого класса мультироторного типа является точность его позиционирования. Определение требуемых точностных характеристик обусловлено сферой эксплуатации БЛА, его типом и классом решаемых задач.

Наиболее востребованной сферой применения является картография и аэрофотосъемка. (Рисунок 1.1 [31, 32, 33]).

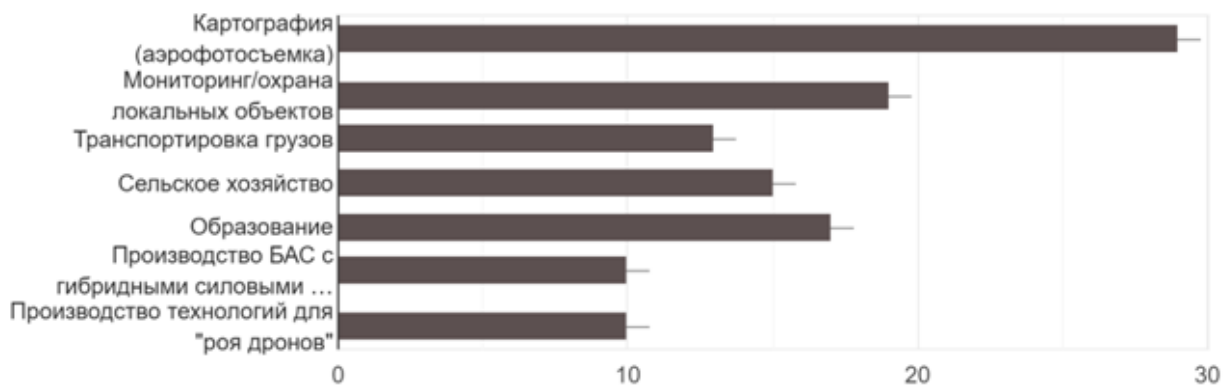


Рисунок 1.1 – Сферы применения БЛА

При этом наибольшее распространение получили мультироторные БЛА, основными представителями которых являются квадрокоптеры [31, 32, 33].

Используемая в составе БЛА полезная нагрузка [33] представлена на рисунке 1.2. Широкое распространение получили камеры оптического диапазона, что является следствием наиболее частого применения БЛА в области картографии.

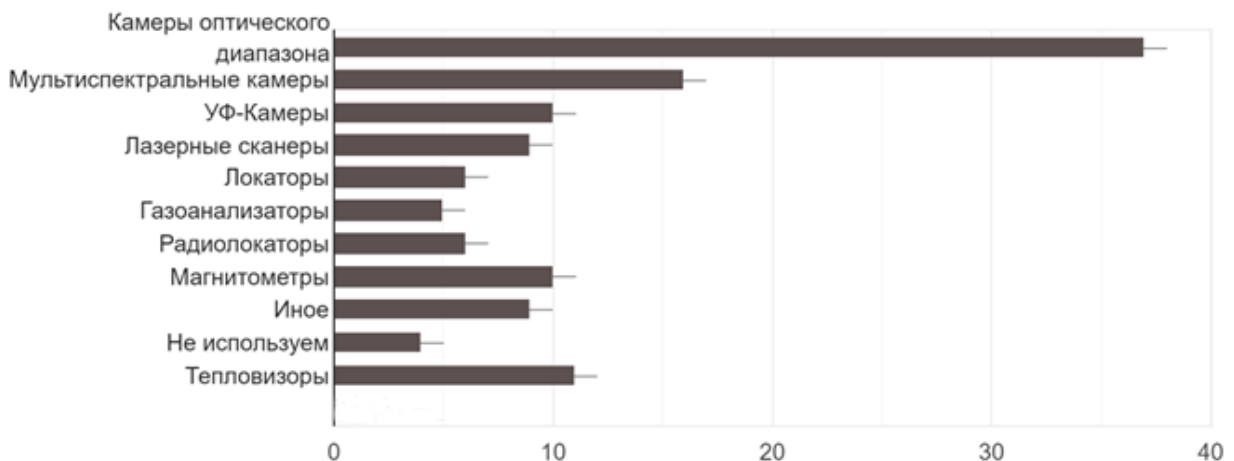


Рисунок 1.2 – Используемая полезная нагрузка БЛА

По уровню функциональной самостоятельности БЛА можно выделить следующие группы беспилотных авиационных систем [34]:

1. Дистанционно пилотируемые БЛА (все функции управления параметрами и функциональным поведением летательного аппарата отданы оператору).
2. Автоматический БЛА (свои функции летательный аппарат выполняет в автоматическом режиме без связи с оператором, по заложенным в систему управления алгоритмам и программам функционирования).
3. Роботизированный БЛА. В данном случае допускается эпизодическое вмешательство оператора в процесс управления (для коррекции полетного задания или в аварийных ситуациях).

Наибольший потенциал использования БЛА заключается в полетах за пределами прямой видимости в автономном режиме [31, 34]. При автономном режиме движение БЛА осуществляется по заранее заданному маршруту с использованием БИНС и GPS/ГЛОНАСС при эпизодическом вмешательстве

оператора, если это возможно, что соответствует 3 и 2 (если вмешательство оператора невозможно) уровням самостоятельности БЛА. Одним из ключевых требования для безопасной интеграции такого БЛА в воздушное пространство является обеспечение возможности его функционирования при отсутствии связи с оператором и искажении/подавлении НП.

Проведенный анализ международного рынка БЛА выявил страны, занимающие доминирующее положение в области разработки и производства беспилотных летательных аппаратов и систем, к ним относятся: Израиль, США и Канада [35]. Российская Федерация также является достаточно крупным производителем беспилотных летательных аппаратов [35]. Достигнутые точностные характеристики БЛА легкого класса основных производителей представлены в таблице 1.1 [36-45]:

Таблица 1.1 – Анализ точностных характеристик навигационных систем БЛА легкого класса.

Производитель	Максимальная точность позиционирования	DGPS	ИНС	Корректировка камерой
БГ Оптикс	±4 м по горизонтали ±4 м по вертикали	-	-	-
DRONESTROY	±2.5 м по горизонтали ±0.8 м по вертикали	-	-	-
Коптер Экспресс	В режиме RTK ± 0.1 м	+	-	+
Геоскан	± 0.1 м	+	-	-
Стилсофт	±3 м по горизонтали ±1 м по вертикали	-	+	-
Aeraccess	±2 м по горизонтали ±1 м по вертикали	-	+	-
Azur Drones	В режиме RTK ± 0.1 м	+	+	+



Продолжение таблицы 1.1.

ICAROS	В режиме RTK ± 0.1 м	+	-	-
DJI	В режиме RTK ± 0.5 м Визуальное позиционирование ± 0.1 м	+	+	+

Анализ показал, что основным используемым методом позиционирования навигационных систем БЛА является метод Real Time Kinematic (RTK), включающий совокупность приёмов получения плановых координат и высот точек местности сантиметровой точности с помощью спутниковой системы навигации, который является одним из методов DGPS GPS/ГЛОНАСС. Однако точность DGPS уменьшается, при удалении приемника от опорного пункта или в случае, когда пользовательскому оборудованию не хватает общего «созвездия» спутников с опорной станцией.

Известно, что RTK не работает при видимости менее 5 одних и тех же GPS-спутников одновременно на базовой станции и БЛА [45], что является распространенной ситуацией для функционирования вне зоны прямой видимости БЛА. При этом погрешности определения координат опорного пункта полностью войдут в координаты потребителя. В работе [46] показано, что ионосферные возмущения оказывают влияние и на работу систем DGPS.

Квадрокоптеры компании «ГЕОСКАН» позволяют осуществлять точность позиционирования до 10 см, за счет использования двухчастотных приемников в составе бортового оборудования. Однако, стоимость данных БЛА гораздо выше, минимум в 4 раза, чем стоимость остальных представленных БЛА легкого класса. При этом данные приемники также подвержены подавлению и искажению навигационного сигнала от преднамеренных помех. Методы улучшения точности позиционирования в случае искажения/подавления НП производителем не предусмотрены.

В некоторых моделях, корректировка точности позиционирования производится за счет обработки информации, поступающей с камеры (Коптер Экспресс, Azur Drones). Так, инженеры Коптер Экспресс модернизировали БЛА и добавили возможность «интеллектуальной» посадки – устройство ориентируется по координатам, а при приближении к месту доставки с помощью камеры «ищет» на земле специальную метку. Благодаря этому точность доставки увеличилась: оператору не нужно «вести» БЛА в ручном режиме – он может через сеть Интернет указать пункт назначения, вложить груз и нажать кнопку «запуск». БЛА ориентирован на выполнение функций курьерской доставки. Однако, в случае искажения/подавления НП, эффективных решений производитель не предусмотрел.

Azur Drones из Франции разрабатывает БЛА для безопасности и патрулирования объектов с воздуха и является одним из европейских лидеров в этой технологии. Основные проблемы, которые решают БЛА Azur Drones [47]: обнаружение факта незаконного проникновения на объект, вредоносные действия, возмещение и утечка опасных материалов. БЛА могут управляться сотрудниками службы безопасности со стандартного интерфейса управления (VMS/Гипервизор), но при этом они могут работать и в 100% автономном режиме. Однако каким образом решается вопрос определения точности позиционирования БЛА в случае искажения/подавления НП, производитель не указывает.

Для задач картографии используется аэрофотосъемка, в то время как основные методы коррекции предусматривают использование видеокамеры [48].

У некоторых моделей БЛА присутствуют датчики инерциальной навигации. Однако, на сегодняшний день, реализованные решения не используются в качестве навигационного аппарата, а применяются для коррекции сигнала ГНСС [49, 50].

Отметим, что всеми производителями умалчиваются точностные характеристики представленных БЛА при искажении/подавлении НП

GPS/ГЛОНАСС. Предоставляемая информация о точности позиционирования относится исключительно к идеальным условиям.

Таким образом, при искажении или подавлении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС большинство БЛА не могут выполнять полетное задание с требуемым качеством позиционирования. По этой причине, в диссертационной работе в качестве **объекта исследования** выбраны беспилотные летательные аппараты легкого класса.

В общем виде навигационная система БЛА легкого класса представлена на рисунке 1.3.

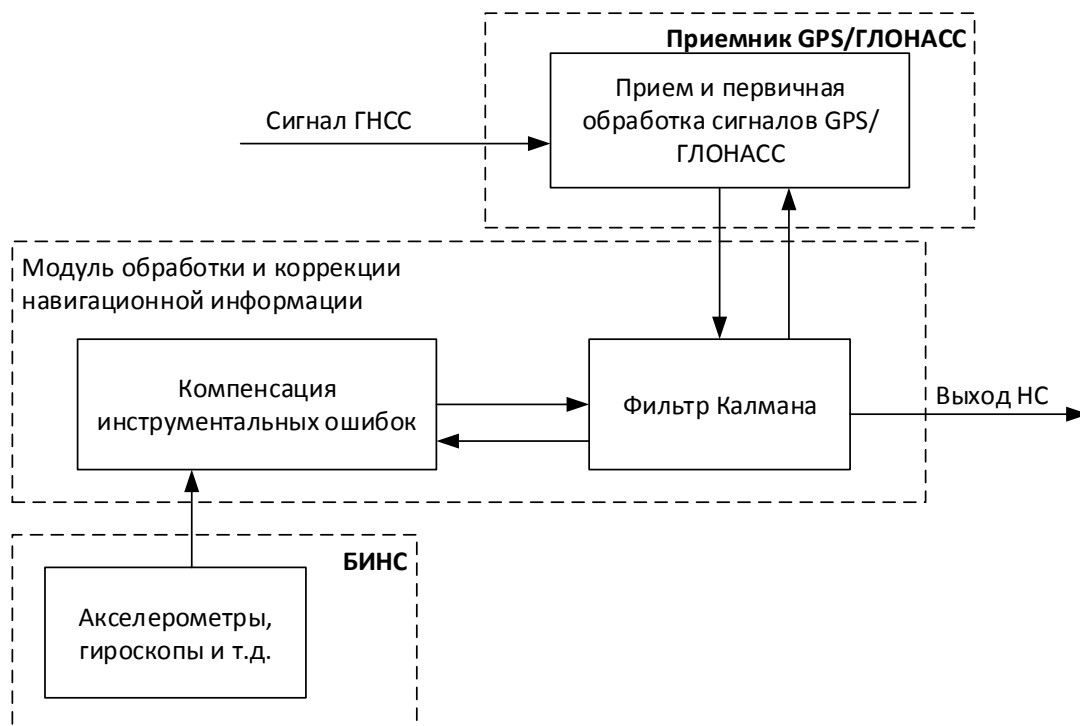


Рисунок 1.3 – Навигационная система БЛА легкого класса

Основным источником навигационной информации, в большинстве практических реализаций, является бортовой приемник СНС GPS/ГЛОНАСС. В данной работе рассматриваются навигационные системы БЛА с навигационной системой только на основе СНС GPS и ГЛОНАСС, в варианте совместной обработки поступающих сигналов. При этом, рассматриваются исключительно

доступные для широкого потребителя частоты и сигналы, не включающие в себя частоты и сигналы, доступные для Министерств Обороны. Для определения целостности НП используются внешний и автономный контроль целостности. Внешний контроль целостности НП на практике реализован только в составе DGPS и его модернизаций, который был рассмотрен выше.

Практической реализацией автономного контроля целостности НП является алгоритм Receiver Autonomous Integrity Monitoring (RAIM). Данный алгоритм реализован во всех современных приемниках СНС воздушных средств по требованию Международной Организации Гражданской Авиации (ICAO) [51].

Основные функции RAIM заключаются в следующем [52]:

- осуществлять обнаружение и исключение нестабильно функционирующих спутников из решения навигационной задачи;
- производить расчет ошибки местоопределения и сигнализировать о превышении допустимых значений ошибки;
- определять геометрию спутников и предупреждать, что требуемые параметры навигации по СНС в этой точке не соответствуют требуемым;
- выдавать сообщение об отказе СНС для навигации.

RAIM решает две основные задачи: обнаружение отказа (Failure Detection) и исключение аномального измерения псевдодальности (Failure Identification). При обнаружении спутника негативным образом влияющего на решение навигационной задачи, он исключается из решения, что позволяет повысить точность местоопределения БЛА. Осуществляется выбор наиболее удачного «созвездия» спутников с наилучшими характеристиками. Однако для обеспечения автономного контроля целостности необходимо, чтобы приемник СНС наблюдал, как минимум 6 спутников. При наблюдении 4 спутников контроль целостности не производится, а при 5 – возможно только обнаружение сбоев. При этом идентификации типа искажения НП не производится.

Ввиду обязательного наличия данного алгоритма в составе навигационного оборудования потребителя, представляется возможным повысить качество его работы путем обеспечения различения сигнала на фоне естественных помех.

Известно устройство контроля целостности в реальном времени спутниковой навигационной системы [53]. Однако, его невозможно использовать в БЛА легкого класса ввиду наличия сложной системы, состоящей из космических, наземных и автономных функциональных дополнений. В данном устройстве идентификация видов помехового воздействия не предусмотрена.

Дополнительной системой позиционирования БЛА, является использование БИНС, основанной на микроэлектромеханических системах (МЭМС). Анализ исследований и разработок в области БИНС показал, что их развитие идет в направлении улучшения точностных и временных характеристик [53]. Показано [54, 55], что БИНС обладает существенным недостатком – зашумленностью, увеличивающейся во времени, что не позволяет использовать их самостоятельно, без СНС.

Рассчитать величину погрешности координат БИНС в некоторый момент времени автономного полета БЛА (при ограничении на вычислительную мощность системы управления) возможно с помощью формул быстрой экспресс-оценки, полученных в работе [56]. Формулы и результаты расчетов погрешностей, вносимых гироскопами и акселерометрами, в погрешности БИНС представлены в таблицах 1.2 и 1.3.

Формулы таблиц 1.2 и 1.3 справедливы на коротком интервале времени (до 10 минут) [56]. Анализ показал, что в процедуре оценки возможности автономного полета БЛА с использованием навигационных параметров БИНС достаточно учитывать только среднеквадратические погрешности, вносимые гироскопами. Тогда как погрешностями акселерометров можно пренебречь, поскольку они примерно в 20 раз меньше (таблица 1.3).

Точность решения задачи ориентации и навигации БЛА в автономном полете существенным образом зависит от случайных погрешностей. К ним

относятся случайные блуждания угла (шумовой дрейф нуля) и фликкер-шумы, возникающие в электронных компонентах, подверженных случайному «мерцанию» [57]. Эти погрешности со временем возрастают, что приводит к накоплению ошибок при работе алгоритмов БИНС, и тем самым препятствуют длительному автономному полету по навигационным данным от БИНС.

Таблица 1.2 – Вклад погрешностей гироскопов в ошибку БИНС по перемещению в момент времени  $t_{\text{зад}} = 300$  с

Вид погрешности гироскопа	Погрешность координаты $\sigma_{\Delta X}^{gyro}$ , м
Систематическая составляющая, $\sigma_{syst}^{gyro} = 4$ , град/ч	$\frac{g \cdot \sigma_{syst}^{gyro} t^3}{6} = 856$
Погрешность масштабного коэффициента $\sigma_{syst}^{gyro} = 4$ , % (при угловой скорости $v = 15$ м/с)	$\frac{g \cdot \sigma_{\Delta k}^{gyro} v t^3}{600} = 11,6$
Шум (случайное блуждание угла), $ARW = 0.2$ , град/ $\sqrt{ч}$	$\frac{ARW}{2\sqrt{5}} t^{5/2} = 190$
Нестабильность нуля (фликкер-шум), $\sigma_{BI}^{\Delta\omega} = 10$ , град/ч, (при времени корреляции $T_c^{\Delta\omega} > 1000$ с)	$\frac{3}{\sqrt{126}} \frac{g \cdot \sigma_{BI}^{\Delta\omega}}{\sqrt{T_c^{\Delta\omega}}} t^{5/2} = 359$

Таблица 1.3 – Вклад погрешностей акселерометров в ошибку БИНС по перемещению в момент времени  $t_{\text{зад}} = 300$  с

Вид погрешности акселерометра	Погрешность координаты $\sigma_{\Delta V_{Xg}}^{acc}$ , м
Систематическая составляющая, $\sigma_{syst}^{acc} = 10^{-3}$ , м/с <sup>2</sup>	$\frac{\sigma_{syst}^{acc} \cdot t^2}{2} = 45$

Продолжение таблицы 1.3.

<p>Погрешность масштабного коэффициента,  <math>\sigma_{\Delta k}^{acc} = 0,01, \%</math>          (при горизонтальной скорости полета <math>V_x = 10</math>          м/с)</p>	$\frac{\sigma_{syst}^{acc} \dot{V}_x t^2}{200} = 0,45$
<p>Шум (случайное блуждание угла), <math>VRW =</math>  <math>1,1 \cdot 10^{-3}, \text{м/с}^2 / \sqrt{\text{Гц}}</math></p>	$\frac{1}{\sqrt{3}} VRW \cdot t^{3/2} = 3,3$
<p>Нестабильность нуля (фликкер-шум),  <math>\sigma_{BI}^{\Delta a} = 10^{-4} \text{ м/с}^2</math>          (при времени корреляции <math>T_c^{\Delta a} &gt; 1000 \text{ с}</math>)</p>	$\frac{1}{\sqrt{10}} \sigma_{BI}^{\Delta a} \frac{1}{\sqrt{T_c^{\Delta a}}} t^{5/2} = 15,3$

Так, при идеальных условиях эксплуатации, погрешность координаты МО БЛА в течение 5 мин автономного полета может составлять 550 м и более. На рисунке 1.4 представлен график зависимости погрешности БИНС по координате местоопределения мультироторного БЛА «Альбатрос П2» компании ООО «Стилсофт» г. Ставрополь. При переходе к навигационным данным БИНС произойдет смещение погрешности определения местоположения БЛА на величину погрешности систем GPS/ГЛОНАСС. Очевидно, что эти точностные показатели являются недостаточными для многих практических задач БЛА, при использовании исключительно навигационных данных БИНС.

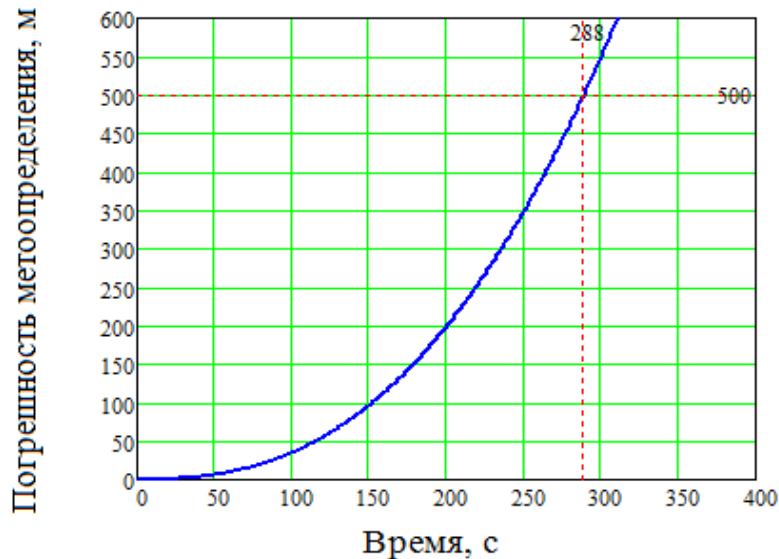


Рисунок 1.4 – График зависимости погрешности БИНС по координате местоопределения от времени

Таким образом, необходимо обеспечить идентификацию факта и типа искажения НП GPS/ГЛОНАСС с целью своевременного перехода к навигационным данным БИНС, при искажении/глушении сигнала GPS/ГЛОНАСС для продолжения полетного задания с допустимой ошибкой местоопределения БЛА.

Проведем анализ факторов, влияющих на сигнал СНС. Естественными источниками ошибки позиционирования являются [58-60]:

- данные эфемериса: возникновение ошибки позиционирования БЛА обусловлено тем, что местоположение спутника во время передачи сигнала известно с точностью от 1 до 5 метров;

- часы спутника: каждый спутник имеет на борту атомные часы, ошибка времени которых в 10 нс влечет за собой ошибку расстояния до 3 метров;

- влияние ионосферы: при прохождении сигнала через ионосферные образования возникают замирания сигнала. Уровень ионизации может варьироваться в зависимости от времени и места наблюдения. Как правило, наблюдается усиление ионизации днем, а также на экваторе и в районах северного сияния. Погрешность, вносимая ионосферой, может составлять от 2 до 50 метров;



– эффект тропосферы: наибольшее влияние на передаваемый навигационный сигнал в тропосфере оказывают погодные условия – температура, давление и влажность. Погрешности, вносимые тропосферой, составляют около 1 метра;

– отражение сигналов: данные ошибки обусловлены переотражением сигналов от крупных объектов – зданий, деревьев, гор и т.д. Данные погрешности составляют около 1 метра;

– измерения приемника: ошибки позиционирования, вносимые приемником не превышают 0,5 метров;

– помехи радиорелейных станций. Излучения радиорелейных станций, в том числе сотовых операторов, искажают навигационное поле. В результате в полосе частот навигационных сигналов формируется наиболее опасная для НП полигармоническая помеха, увеличивающаяся при приближении к источнику помехи.

Отдельно выделим преднамеренные помехи, такие как помехи, навязывающие ложное местоположение приемнику СРНС и подавление сигнала ГНСС [61]. Возможность осуществления навязывания ложного местоположение приемнику СРНС обусловлена тем, что шифрование кодов ГНСС в гражданских целях допускается только с разрешения Министерства обороны РФ [62].

Уязвимость СНС к воздействию активных подавляющих помех обусловлена следующими фактами [63]:

– большой дальностью передачи сигналов (~20 000 км);  
 – ограниченной мощностью радиосигнала спутника (10...50 Вт);  
 – малым коэффициентом усиления антенны спутникового передатчика (не превышающего 10-15 дБ).

Известно, что спектральная плотность шума определяется формулой [64]:

$$N_0 = FkT, \quad (1.1)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-23}$ ),  $T$  – температура в Кельвинах  $F$  – шум-фактор.

В зависимости от используемого приемника, значение спектральной плотности аддитивного шума наблюдений изменяется в диапазоне от -200 до -210 ДБВт. В соответствии с интерфейсными контрольными документами [64], мощность сигнала на входе антенны составляет -155 ДБВт, что соответствует 45 дБГц. Данное значение является типовым и обеспечивает нормальную связь навигационного приемника с навигационным спутником. Однако, при возникновении искажений, данное значение будет падать, что в свою очередь, приводит к ошибкам решения навигационной задачи, и исключению спутника из наблюдения, приема и обработки сигнала. Минимальное соотношение сигнал/шум, при котором обеспечивается работоспособность приемника, составляет 20...22 дБГц [64]. Пример функционирования приемника в сложной помеховой обстановке (затенение спутников зданиями), полученных с помощью приемника u-blox 8, находящемся на борту БЛА легкого класса «Альбатрос П2» представлен на рисунке 1.5. Красной линией обозначено минимальное соотношение сигнал/шум.

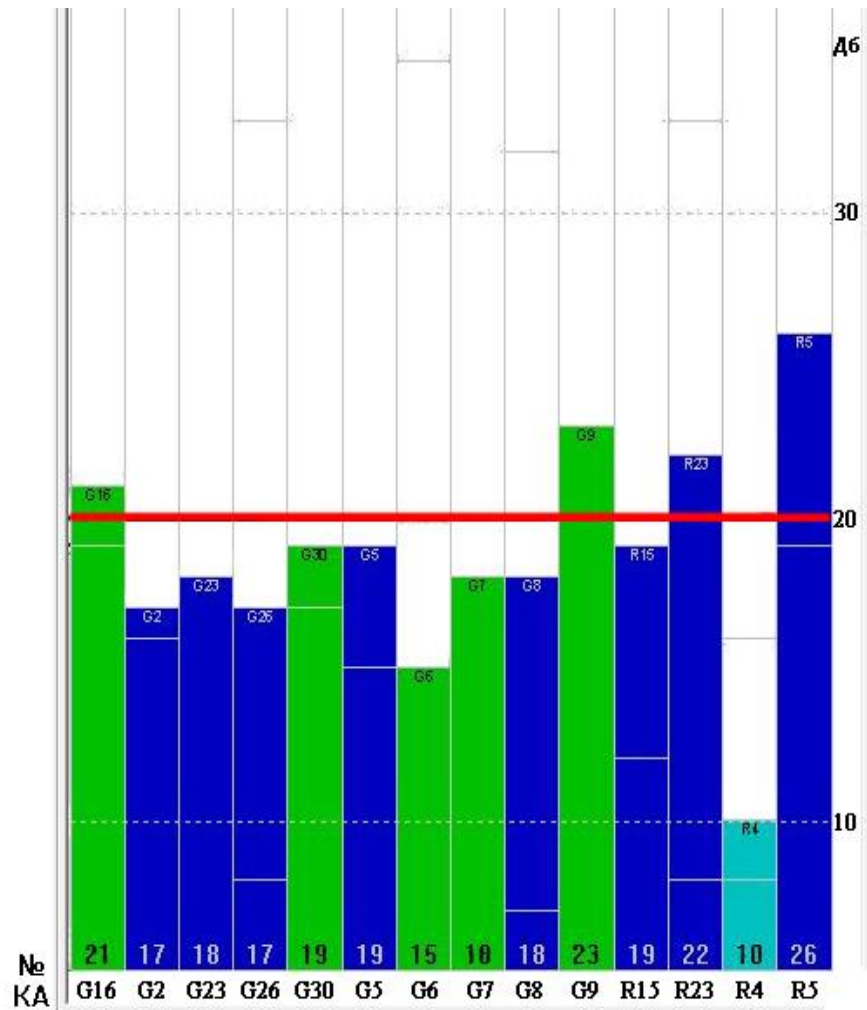


Рисунок 1.5 – Связь приемника со спутниками в условиях затенения зданиями.

Как видно из рисунка 1.5, в подобной помеховой обстановке невозможно обеспечение полноценной работы алгоритма RAIM. При этом, вычисление PDOP не может осуществляться путем выбора наиболее удачной геометрии спутникового «созвездия».

Известно большое количество доступных средств различной стоимости, позволяющих обеспечить эффективное подавление СНС на расстоянии до нескольких километров [65].

Источники ошибок, влияющие на точность позиционирования БЛА, представлены на рисунке 1.6.

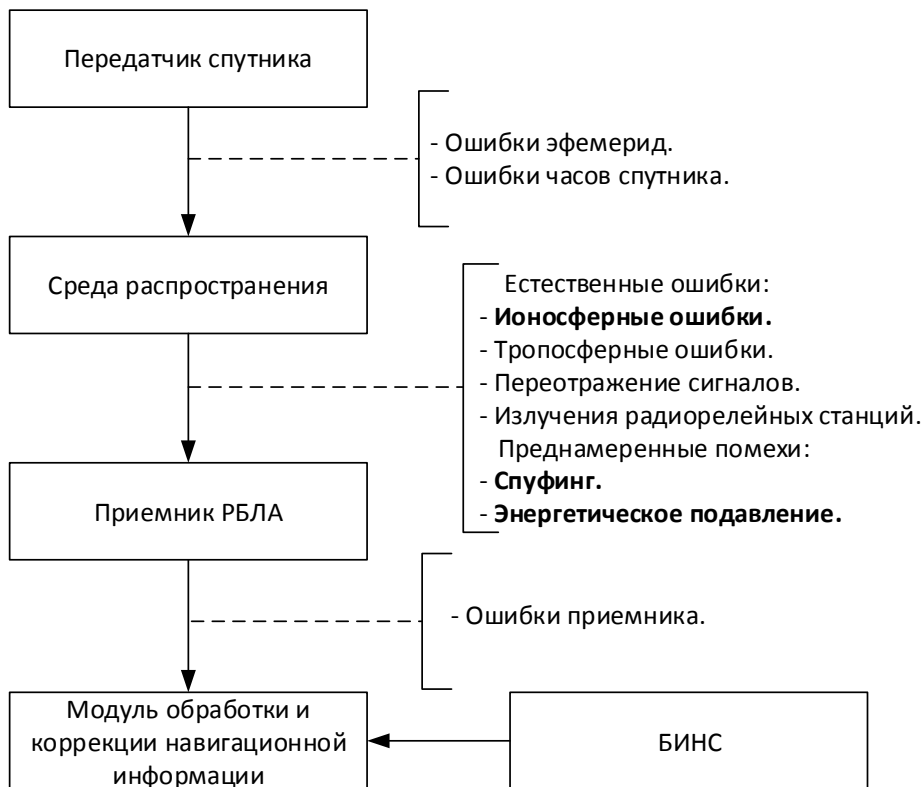


Рисунок 1.6 – Источники ошибок в спутниковом канале связи.

Требования к точности позиционирования для авиационных потребителей различны, они изложены в [66]. Важным является этап захода БЛА на посадку.

Согласно [66] сформулированы основные требования к точности позиционирования для воздушных объектов при заходе на посадку по категориям (таблица 1.4):

Рассматриваемый класс БЛА относится к III категории. При этом для БЛА содержащегося в контейнере и осуществляющего взлёт непосредственно из контейнера, с последующей посадкой в точку взлета, данные точностные характеристики таблицы 1.4 являются недостаточными.

Согласно [67], при полной доступности всех спутников GPS+ГЛОНАСС, средние ошибки навигационных значений составляют: 4,2 м по широте, 4,5 м по долготе и 10,49 м по высоте, при идеальных условиях функционирования.

Таблица 1.4 – Требования к точности позиционирования воздушных объектов при заходе на посадку.

Категория посадки	Высота над взлетно-посадочной полосой, для проверки (м)	Требования к точности (СКО), м	
		Горизонтальная плоскость	Вертикальная плоскость
I	30	4,5-8,5	1,5-2
II	15	2,3-2,6	0,7-0,85
III	2,4	2,0	0,2-0,3

В Техническом Задании (ТЗ) на проведение прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по теме: «Разработка роботизированного беспилотного летательного аппарата мультироторного типа с использованием бесплатформенной инерциальной навигационной системы», сформулированы требования к точностным характеристикам экспериментального образца БЛА при искажении/подавлении НП GPS/ГЛОНАСС [68]. Согласно ТЗ, ошибка определения навигационного положения в пространстве не должна превышать 500 м, в течение 5 минут после подавления/искажения навигационного сигнала.

В ходе натурного эксперимента БЛА «Альбатрос П2» с навигационным приемником u-blox 8 на борту установлено, что при наличии искажения НП, ошибка определения местоположения БЛА в течение 10 секунд достигает 30 метров и продолжает стремительно расти. Зафиксировано превышение ошибки позиционирования более 500 метров в течение 5 минут полета (рисунок 1.7). При выполнении полетного задания БЛА приближался к источнику искажения НП (радиорелейной вышке).

В настоящее время задача управления БЛА в условиях искажения/подавления НП GPS/ГЛОНАСС на практике в полном объеме не реализуется. Существующие решения [69-74] направлены не на управление логикой движения БЛА, а на использование различных средств для поддержания

ориентации аппарата относительно нормальной системы координат (крена, тангажа, рысканья).

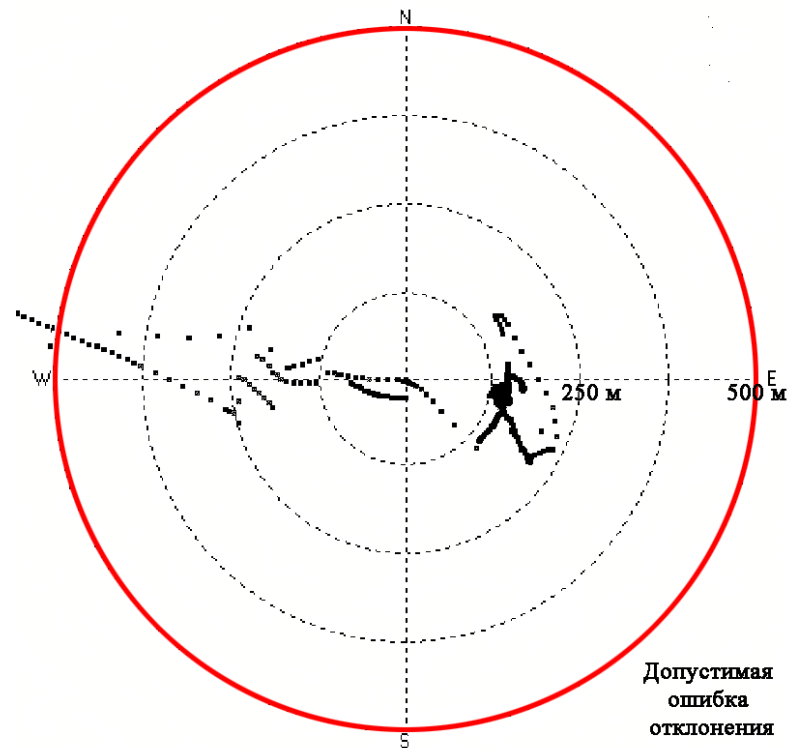


Рисунок 1.7 – Превышение допустимой ошибки позиционирования БЛА

Оценка состояния НП при движении БЛА по заданному маршруту не производится. При возникновении сильного искажения или подавления НП БЛА, либо совершает аварийную посадку, либо осуществляет разворот с использованием навигационных параметров БИНС в зону удовлетворительного функционирования СНС с последующей попыткой выхода из зоны искажения/подавления, либо терпит аварию [49].

Проведенные натурные испытания с использованием БЛА легкого класса «Альбатрос П2», позволили определить значения отклонения от заданного курса при подавлении НП GPS/ГЛОНАСС (рисунок 1.8). БЛА осуществил переход на БИНС и продолжил выполнение полетного задания.

При несвоевременном обнаружении подавления НП, ошибка местоопределения GPS/ГЛОНАСС суммируется с ошибкой местоопределения

БИНС и быстро нарастает в течение времени полета БЛА (рисунок 1.9). Использование БЛА в этих условиях не позволяет осуществлять полет по заданному маршруту с необходимой точностью позиционирования.

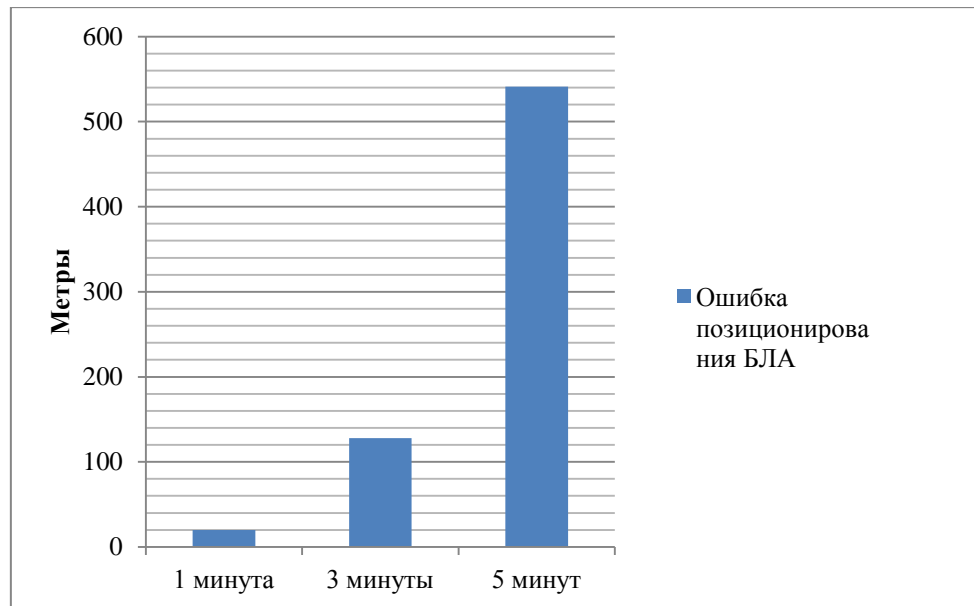


Рисунок 1.8 – Увеличение ошибки позиционирования БЛА во времени

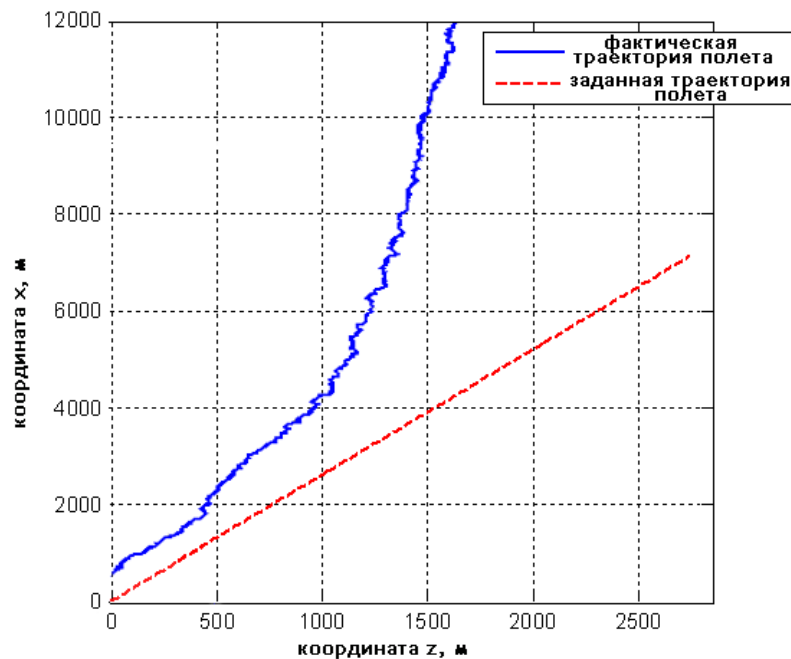


Рисунок 1.9 – Отклонение от заданного маршрута автономного полета БЛА при подавлении НП

Таким образом, **противоречие в практике** заключается в том, что существующие способы обеспечения точности позиционирования в условиях искажения/подавления НП GPS/ГЛОНАСС не позволяют обеспечить допустимую ошибку местоопределения БЛА.

## 1.2. Анализ научно-методического аппарата повышения точности позиционирования БЛА.

Известно [75], что замирания при транссионсферной передаче данных описываются законами распределения случайных величин: нормальным, Райса, Релея и Накагами [76, 77]. Для анализа замираний исследуется амплитуда квадратурных компонент, возникающая вследствие интерференции сигналов с одинаковой частотой, но с разными фазами, и его функция распределения. Замирания, присутствующие в спутниковых радиосигналах, делятся на два типа: медленные и быстрые замирания [76, 77].

В существующих гражданских приемниках ГНСС реализована процедура компенсации ионосферных возмущений. В [78] приведены погрешности измерений координат при учете ионосферных и тропосферных искажений, которые представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Составляющие погрешности измерения координат.

Составляющая погрешности	СКО без учета ионосферы и тропосферы $\sigma_1$ , м	СКО с учетом ионосферы и тропосферы $\sigma_2$ , м
По широте X	5,38	3,9
По высоте Y	12,91	5,14
По долготе Z	5,23	4,74



В основе данного метода лежит однослойная модель ионосферы, которая предполагает одинаковую вертикальную задержку для каждого наблюдаемого спутника [79]. В работах [80, 81] показано, что в ионосфере образуются также и мелкомасштабные неоднородности, что противоречит используемым методам коррекции.

С целью уменьшения ошибок позиционирования, вызванных ионосферными возмущениями, могут использоваться две группы методов, основанные на прогнозных моделях и коррекции принимаемого сигнала [82, 83].

Прогнозные модели основаны на получении прогноза флуктуаций и параметров ионосферы, использующих статистику, полученную при зондировании ионосферного слоя Земли. Известны три основных типа моделей ионосферы: эмпирические, теоретические и гибридные. Достоинством моделей является удовлетворительная оценка на большом временном отрезке, а также высокие точностные показатели учета тропосферного воздействия [84, 85]. Однако, использование подобных моделей не способно обеспечить описание и учет всех изменений в реальном времени [86], что негативным образом сказывается на точности прогноза оценок в реальном времени.

Известны работы [87], обосновывающие проведение локальной коррекции результатов моделирования. Прогноз составляется на определенный период (для экстренных случаев возможно получение прогноза на ближайшие 16 часов), при этом точность детализации прогноза составляет 1 час, что является недостаточным для движущегося объекта, такого как БЛА. Для функционирования теоретических и гибридных моделей необходимы большие вычислительные мощности, что накладывает ограничение на ресурсы и время расчета [88].

В системах функциональных дополнений (ФД) выделяют псевдоспутниковые и ассистирующие ФД. Псевдоспутник – это контрольно–корректирующая станция, излучающая сигнал, аналогичный сигналу НКА, и геодезически точно привязанная к принятой системе координат. Псевдоспутники

дополняют радионавигационное поле СРНС (ГНСС) в заданном районе и обычно имеют локальную рабочую зону [66].

Ассистирующие ФД – системы, реализующие режим "assisted GNSS" (вспомогательная ГНСС) и формирующие не корректирующие поправки, а дополнительную вспомогательную информацию для ускорения вхождения в связь с навигационным космическим аппаратом и повышения надежности местоопределения потребителей.

Дифференциальный режим предполагает использование одного или более базовых приёмников, размещённых в точках с известными координатами, которые одновременно с приёмником потребителя осуществляют приём сигналов одних и тех же спутников.

Известен способ обнаружения преднамеренного воздействия на точностные характеристики спутниковых радионавигационных систем (СРНС) в навигационной аппаратуре потребителя (НАП), установленной на борту движущегося объекта [89]. Достоинство данного способа заключается в обнаружении несанкционированного искажения навигационного сигнала космических аппаратов ГНСС, которое не может быть автономно обнаружено алгоритмами контроля достоверности, имеющимися в навигационной аппаратуре. Вместе с тем, данный способ обладает функциональной ограниченностью, поскольку не обеспечивает возможности достоверного определения факта искажения НП и идентификации видов помехового воздействия.

В [90] представлен способ обнаружения преднамеренных помех навигационной аппаратурой потребителя ГНСС. Недостатком данного способа является необходимость наличия сложной антенной системы для определения пространственных направлений на источники принятых сигналов и помех, что не реализуемо в БЛА легкого класса. При этом, он не обеспечивает обнаружения преднамеренных помех в реальном времени, что является крайне актуальным для исследуемого БЛА.

В [91] приведены методы контроля целостности НП Airborne Autonomous Integrity Monitoring (AAIM), бортовой автономный мониторинг целостности НП. AAIM использует информационную избыточность, т. е. наличие дополнительной информации от бортовых датчиков БИНС. Основным недостатком AAIM является отсутствие идентификации типа искажения НП, осуществляется только контроль целостности и коррекция СНС за счет информации датчиков БИНС.

В [92-94] описаны методы, основанные на использовании одновременно локализации и картографирования Simultaneous localization and mapping (SLAM). Они позволяют повысить точность позиционирования БЛА за счет обработки информации, поступающей с камер оптического диапазона. Однако БЛА легкого класса имеют жесткие массогабаритные ограничения, что является достаточно существенным ограничивающим фактором для их применения.

Для обеспечения обнаружения сигнала на фоне помех известны методы на основе критерия наивного наблюдателя, критериев Байеса и Неймана-Пирсона [95]. Ввиду того, что при использовании критерия Неймана-Пирсона можно задавать требуемую вероятность ошибочного приема сигналов, данный критерий в задачах радионавигации нашел большее применение, чем остальные критерии. В работе [96] данный критерий использован для определения оптимальных порогов классификации случайных величин, распределенных по закону Рэлея, однако, для нормального закона, законов Райса и Накагами определение оптимальных значений порогов классификации получено не было.

В [77] показана необходимость и возможные пути увеличения надежности радиоканала. При этом, увеличение мощности радиопередатчика или уменьшение скорости передачи данных является неприемлемым в случае обеспечения решения навигационной задачи БЛА легкого класса, т.к. это приведет к снижению частоты местоопределения. БЛА легкого класса характеризуются повышенной мобильностью и способны осуществлять движение по маршруту со скоростью до 12 м/с. Альтернативным путем является уменьшение минимального соотношения сигнал/шум, позволяющего осуществить обнаружение сигнала на фоне помехи,

при обеспечении помехоустойчивости на уровне  $10^{-3}$ . Одновременно с этим, данный путь позволит обеспечить алгоритм RAIM необходимым для функционирования количеством спутников, что позволит повысить качество его функционирования. На сегодняшний день считается, что минимальное соотношение сигнал/шум, гарантирующее требуемую помехоустойчивость составляет 20..22 дБ/Гц.

Таким образом, необходимо разработать НМА, обеспечивающий требуемую точность позиционирования БЛА за счет определения факта и типа искажения НП, идентификации законов распределения огибающей радиосигналов и определения оптимальных порогов классификации состояний трассы распространения СРНС.

### **1.3. Выбор показателей и критериев, обеспечивающих требуемую точность позиционирования БЛА**

С целью обеспечения допустимой точности позиционирования БЛА выберем показатели и критерии для их использования при постановке общей научной задачи и частных задач исследования.

Для осуществления возможности идентификации факта искажения НП используем выборку из  $N$  достоверных измерений. Для БЛА квадрокоптерного типа выборка должна быть не менее  $N \geq 30$ .

В качестве показателей качества функционирования СНС используем: отношение сигнал/помеха  $h$ ; время получения пакета GPS/ГЛОНАСС  $t$ ; ошибку времени получения пакета  $\sigma t$ . При этом, необходимо учитывать расположение «созвездия» спутников, использующихся для решения навигационной задачи. Для

этого вычисляется геометрический фактор  $P_{DOP}$  - снижение точности по местоположению.

Данные показатели качества позволяют вычислить предельную СКП  $\Delta_k$ . Величины погрешностей местоопределения БЛА будем использовать для установления факта искажения НП  $R_j$  и оценки состояния НП  $\theta_k$ .

С целью обеспечения требуемой чувствительности и достоверности обнаружения помехового воздействия используем байесовский подход. Это позволит осуществить вероятностную оценку состояния НП по совокупности признаков полученной выборки достоверных измерений.

Осуществление идентификации состояния спутникового канала связи при использовании приемника на борту БЛА невозможно классическими методами в связи с тем, что производители приемников не предоставляют возможности низкоуровневой обработки получаемой информации [97]. Однако, возможен альтернативный подход, заключающийся в выделении и анализе огибающей сигнала. С целью выделения огибающей сигнала  $y(k)$  используем метод эмпирической модовой декомпозиции, позволяющий выполнить разложение исходного сигнала на семейство функций.

Известно, что замирания в транссионосферных каналах связи описываются законами распределения случайных величин, такими как закон Райса, Релея, Накагами и нормальным законом распределения. Для осуществления идентификации эмпирического распределения, полученного с помощью метода модовой декомпозиции сигнала, используем один из критериев согласия, приведенные в работах [98-103]. Названия и вид используемой статистики критериев представлены в таблице 1.6.

Необходимо выбрать критерий из представленных в таблице 1.6, обеспечивающий точность идентификации не менее 95%.

Для решения задачи оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС используем критерий Неймана-Пирсона, получивший широкое применение в подобных задачах. Его преимуществом является

возможность задавать требуемую вероятность ошибочного приема сигналов. Требуется обеспечить точность решения оптимизационной задачи не хуже 0,01.

Для управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении НП GPS/ГЛОНАСС необходимо осуществлять контроль состояния НП (*GNSS\_status*), радиоканала дистанционного управления (*RCC\_Status*), уровня заряда батареи (*Bat\_charge*).

Таблица 1.6 – Критерии согласия, используемые для идентификации вида распределения по эмпирической выборке

Название	Вид используемой статистики
Крамера-Мизеса-Смирнова (Омега-квадрат)	$\omega^2 = \left( \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n (F(x_i) - W)^2 - \frac{0,4}{n} + \frac{0,6}{n^2} \right) \left( 1 + \frac{1}{2n} \right)$
Колмогорова-Смирнова	$D_n = \sup_x  F_n(x) - F(x) $
Пирсона (критерий Хи-квадрат)	$\chi^2 = N \sum \frac{(P_i^{th} - P_i^{emp})^2}{P_i^{th}}$
Андерсона-Дарлингга	$S_\Omega = -n - 2 \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{2 \cdot i - 1}{2 \cdot n} \cdot \ln(F(x_i, \theta)) + \left( 1 - \frac{2 \cdot i - 1}{2 \cdot n} \cdot \ln(1 - F(x_i, \theta)) \right) \right)$
Купера	$D_n^+ = \max \left( \frac{i}{n} - F(x_i, \theta) - \frac{i-1}{n} \right), D_n^- = \max \left( F(x_i, \theta) - \frac{i-1}{n} \right)$
Ватсона	$U_n^2 = \sum_{i=1}^n \left( F(x_i, \theta) - \frac{i-0,5}{n} \right)^2 - n \cdot \left( \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n F(x_i, \theta) - 0,5 \right)^2 + \frac{1}{12 \cdot n}$

При переходе на БИНС расчет максимально допустимого времени полета возможен по методике, описанной в [55]. Это позволит рассчитать максимально допустимое время полета  $t_{\max, \text{avt}}$ , в течение которого погрешность координат, определенных БИНС, достигнет предельно допустимой величины  $\Delta \sigma_k$ .

Таким образом, определены основные показатели и критерии, необходимые для решения общей научной задачи исследования.

#### 1.4. Формализация и постановка общей научной задачи и частные задачи исследования

Предположим, что БЛА совершает полет по заранее заданному маршруту. При наличии СНС GPS/ГЛОНАСС, коррекция поступающей информации ГНСС осуществляется с использованием БИНС. Будем считать, что доступными для измерения параметров НП являются:

$$N, h, t, \sigma t, P_{DOP}, y(k), \quad (1.2)$$

где  $N$  – выборка из достоверных координат местоопределения БЛА;  $h$  – отношение сигнал/помеха;  $t$  – время получения пакетов GPS/ГЛОНАСС;  $\sigma t$  – ошибка времени получения пакетов GPS/ГЛОНАСС;  $P_{DOP}$  – геометрический фактор снижения точности по местоположению БЛА;  $y(k)$  – исходный сигнал на входе приемника GPS/ГЛОНАСС.

При осуществлении выполнения полетного задания в автономном режиме, возможно искажение НП при изменении характеристик ионосферы, которые обусловлены образованием мелкомасштабных и крупномасштабных неоднородностей, вызывающих задержку навигационного сигнала. Также, возможно осуществление навязывания ложного местоположение приемнику СРНС или подавления НП преднамеренными помехами. Требуется установить факт искажения НП  $R_j$  и идентифицировать факт искажения навигационного поля  $\theta_k$ .

При обнаружении и идентификации естественных помех, вызванных ионосферными изменениями, необходимо идентифицировать закон распределения случайных величин, описывающий состояния спутникового канала связи. С использованием статистических методов осуществляется выбор гипотезы

о принадлежности эмпирического к статистическим законам распределения по максимальному коэффициенту правдоподобия  $G_n$ .

При функционировании БЛА в условия искажения НП ионосферными изменениями при известном законе распределения, описывающего состояние ионосферы, требуется обеспечить надежность радиоканала, путем снижения минимально допустимого соотношения сигнал/шум.

При полете БЛА в зоне сложной помеховой обстановки, требуется определение эффективного автоматического управления движением БЛА  $C_{ynp}$ .

Требуется:

1. Идентифицировать факт и тип искажения НП.
2. При полете БЛА в условиях искажения навигационного поля, вызванного ионосферными флуктуациями, идентифицировать закон распределения, описывающий состояние трассы распространения СРНС..
3. Определить оптимальные пороги классификации состояния трассы распространения СРНС  $x_0$  и  $y_0$  при обнаружения сигнала на фоне помех.
4. Обеспечить управление БЛА с требуемой ошибкой позиционирования в автономном режиме полета при подавлении или искажении НП GPS/ГЛОНАСС.

Постановка научной задачи формулируется следующим образом:

При известных параметрах измерения НП GPS/ГЛОНАСС требуемой точности позиционирования БЛА в условиях искажения/подавления НП требуется разработать НМА, обеспечивающий повышение точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета, на основе управления его движением и разработки методов идентификации состояния навигационного поля. Таким образом, математическая постановка общей задачи исследования:

Дано:  $N, h, t, \sigma, P_{DOP}, y(k)$ .

Найти:

$$A\{\theta_k \in \theta_k^*; G_n \in G_n^*; x_0, y_0; C_{ynp}\} \rightarrow \max A(\theta_k^*; G_n^*; x_0, y_0; C_{ynp}) \quad (1.3)$$

При ограничениях:



$$N \geq 30; \theta_k \in \{\theta_1 \dots \theta_5\}; G_n \in \{G_1 \dots G_4\}; P_{л.т.} \leq 10^{-5}; p_1 = const; p_1 + p_2 = 1; \quad (1.4)$$

где  $N$  – выборка из достоверных координат местоопределения БЛА;  $\theta_k$  – множество состояний НП;

$G_n$  – множество состояний входного сигнала GPS/ГЛОНАСС  $y(k)$ ;  $P_{л.т.}$  – вероятность ложной тревоги;  $p_1$  – вероятность появления нормальной ситуации;  $p_2$  – вероятность появления аномальной ситуации.

С целью решения общей научной задачи, путем декомпозиции общей научной задачи, выделены частные научные задачи:

1. Разработка способа определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.

2. Разработка методики идентификации состояний трассы распространения СРНС..

3. Разработка метода оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС..

4. Разработка способа автоматического управления беспилотным летательным аппаратом в условиях подавления или искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.

5. Разработка практических рекомендаций по повышению точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета

Полученные в работе новые результаты, а также их составные части обладают следующими отличительными признаками новизны.

Способ определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, отличающийся от известных тем, что для введения новой совокупности выполняемых в определенной последовательности действий, с соблюдением введенных правил принятия решений. А именно:

для определения факта искажения НП использован подход, суть которого заключается в полиномиальной аппроксимации некоторого массива из  $N$  достоверных измерений  $R = (R_1, R_2, \dots, R_j, \dots, R_N)$  в виде оценок местоопределения

(МО) БЛА на интервале времени  $t \in [t_o, t_a]$  с шагом  $\tau$ , равным периоду поступления навигационных параметров;

для вероятностной оценки состояния НП, при использовании совокупности признаков по полученной выборке МО, использован Байесовский подход;

получена доверительная апостериорная вероятность с использованием способа максимизации апостериорной плотности;

определено решающее правило по критерию минимизации СКП, на основании которого определены неравенства для обнаружения факта искажения и идентификации видов помехового воздействия;

2. Для идентификации состояний трассы распространения СРНС, разработана методика, отличающаяся от известных тем, что впервые для решения подобной задачи использован метод модовой декомпозиции и проведено сравнение критериев согласия с использованием эталонных распределений Релея, Райса, Накагами и нормального распределения. Использование данной методики позволило:

обеспечить требуемую точность идентификации закона распределения, описывающего огибающую сигнала;

обоснованно использовать метод оптимизации порогов классификации состояния трассы распространения СРНС.

3. Разработан метод оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС, отличающийся от известных тем, что для решения задачи минимизации вероятности возникновения ошибок первого и второго рода, введена процедура поэтапного контроля, выраженная в общую систему уравнений, на основании которой получены решения для случаев, когда состояние трассы распространения СРНС описывается нормальным законом распределения, распределением Райса и Накагами.. Использование данного метода позволило:

обеспечить выбор оптимальных порогов классификации при обнаружении сигнала на фоне шума с минимизацией вероятности возникновения ошибок первого и второго рода;

обеспечить выигрыш в 1..3 дБ/Гц относительно известных методов с требуемой вероятностью ошибочного приема сигналов GPS/ГЛОНАСС при худшем отношении сигнал/шум.

4. С целью обеспечения безопасности полета и возможности выполнения полетного задания в условиях искажения/подавления НП, разработан способ автоматического управления БЛА при отсутствии командного радиоканала дистанционного управления, отличающийся от известных тем, что введены новые выполняемые в определенной последовательности действия:

из уравнения, составленного на основе формулы экспресс-оценки погрешностей, определяется время автономного полета, при котором погрешность координат достигнет заданной  $\Delta\sigma_k$ ;

на основании результатов выполнения способа определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, осуществляется совокупность типовых маневров управления БЛА;

при идентификации ионосферных искажений осуществляется процедура идентификации состояний трассы распространения СРНС, основанная на разработанной ранее методике;

на основании результатов методики идентификации состояний трассы распространения СРНС, осуществляется оптимизация порогов классификации состояний спутниковых каналов связи;

Использование данного способа позволило:

расширить функциональные возможности навигационного приемника СРНС, используемого в составе БЛА в режиме автономного полета;

обеспечить ошибку позиционирования БЛА в условиях искажения/подавления НП GPS/ГЛОНАСС в автономном режиме полета в среднем, в 350 м, после факта искажения/подавления НП GPS/ГЛОНАСС.

## ВЫВОДЫ

1) Анализ существующих БЛА и методов навигации показал, что в их составе основным навигационным устройством являются спутниковые приемники GPS/ГЛОНАСС. При этом, данные приемники подвержены как естественным, так и преднамеренным помехам.

2) Развитие навигационных приемников на сегодняшний день позволило добиться высокой точности позиционирования. Для этого используются различные методы DGPS, компенсация ионосферных возмущений методами коррекции или прогнозные модели. Также в составе некоторых БЛА используются БИНС. При этом наиболее эффективным направлением является использование БИНС, т.к. в условиях полного подавления НП остается возможность продолжать полетное задание, а реализация гироскопов и акселерометров на МЭМС позволяет учесть массо-габаритные ограничения БЛА легкого класса.

3) Важным фактором является своевременное обнаружение факта и идентификация типа искажения НП, т.к. при полном подавлении радионавигационного сигнала или при приближении к источнику помехи значительно возрастает ошибка местоопределения, впоследствии приводящая к суммированию ошибки местоопределения БИНС и СНС.

4) Выявлено противоречие в практике: существующие способы обеспечения точности позиционирования в условиях искажения/подавления НП GPS/ГЛОНАСС не позволяют обеспечить допустимую ошибку местоопределения БЛА.

5) Анализ показал, что существующие теоретические подходы используют методы и способы, не позволяющие идентифицировать тип искажения НП, а большинство методов невозможно реализовать в составе БЛА легкого класса,

ввиду существующих массогабаритных ограничений. Также необходимо повысить чувствительность навигационного приемника с целью повышения надежности радиоканала.

6) Противоречие в теории состоит в том, что существующие теоретические подходы, не позволяют обеспечить допустимую ошибку навигационного положения БЛА в режиме автономного полета. Для решения данного противоречия необходимо разработать новый научно-методический аппарат.

7) С учетом выявленных противоречий в науке и практике сформулированы цель, предмет, объект и научная задача диссертационного исследования. Объектом исследований является беспилотный летательный аппарат легкого класса. Целью исследований является повышение точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета, при искажении или подавлении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, на основе управления движением БЛА и разработки методов идентификации состояния навигационного поля. Предметом исследований являются методы и способы, обеспечивающие требуемую точность позиционирования БЛА при обнаружении искажения/подавления навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.

8) Проведена формализация научной задачи и декомпозиция на взаимоувязанный комплекс частных научных задач:

1. Разработка способа определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.

2. Разработка методики идентификации состояний трассы распространения СРНС.

3. Разработка метода оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС.

4. Разработка способа автоматического управления беспилотным летательным аппаратом в условиях подавления или искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.

## 5. Разработка практических рекомендаций по повышению точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета

Материалы и результаты, представленные в данном разделе диссертации были предварительно опубликованы в статьях [1-5], опубликованных в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований по специальности 05.13.01, в статьях [5-7] в рецензируемом издании, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований по группе специальностей 05.13.00. В работах [1-14] материалы данного раздела были использованы для обоснования направлений исследований.

## 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БЛА В РЕЖИМЕ АВТОНОМНОГО ПОЛЕТА

### 2.1. Обоснование последовательности решения научной задачи и логической взаимосвязи научных результатов

В общем виде, связь частных задач исследования представлена на рисунке 2.1 и включает в себя:

1) Разработку способа, позволяющего определить факт искажения и идентифицировать тип искажения НП.

2) Разработку методики идентификации состояния трассы распространения навигационных сигналов.

3) Разработку метода оптимизации порогов классификации состояния трассы распространения навигационных сигналов, при обнаружения сигнала на фоне помех.

4) Разработку способа управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении НП GPS/ГЛОНАСС.

5) Разработка практических рекомендаций по повышению точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета.

Вторая глава диссертации посвящена решению первых четырех частных задач исследований. Проведена постановка **первой частной научной** задачи исследований, определены исходные данные для ее решения и ограничения.

Для определения факта искажения НП использован подход, суть которого заключается в полиномиальной аппроксимации некоторого массива из  $N$  достоверных измерений в виде оценок МО БЛА на интервале времени  $t \in [t_o, t_a]$  с

шагом  $\tau$ , равным периоду поступления навигационных параметров. Для получения непосредственно доверительной апостериорной вероятности  $P(D_k/R_j)$  используется способ максимизации апостериорной плотности. Использование данных подходов позволило определить основные решающие правила для определения факта и типа искажения НП.

Произведена постановка **второй частной задачи** исследований. С целью выбора оптимального критерия, проведено сравнение критериев согласия с использованием эталонных распределений Релея, Райса, Накагами и нормального распределения на одинаковых выборках. Лучшим критерием является критерий Колмогорова-Смирнова, имеющий точность идентификации более 95% при меньшем времени вычислений.

Выделение огибающей сигнала осуществлялось с использованием эмпирической модовой декомпозиции сигнала, на основании которого разработан алгоритм методики идентификации состояния спутниковых каналов связи, позволяющий с точностью не хуже 95% классифицировать выборку законов распределения случайных величин (нормального, Релея, Райса и Накагами).

Произведена постановка **третьей частной задачи** исследований, посвященная оптимизации порогов классификации состояний трасс распространения СРНС. В качестве решающего правила, обеспечивающего наивысшую точность системы идентификации, использован критерий Неймана-Пирсона. Изложена общая постановка метода, которая в частных условиях, а именно – при конкретизации условий распространения радиоволн, сводится к частным методикам.

Произведена постановка **четвертой частной задачи** исследований. Разработан способ управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС. На основании реализованной в БЛА процедуры управления и поддерживаемых типовых маневров, с использованием способа определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, разработан способ управления БЛА в



режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС. При обнаружении факта искажения навигационного поля, осуществляется процедура идентификации состояний спутниковых каналов связи. На основании полученных результатов производится оптимизация порогов классификации состояний спутниковых каналов связи.

В третьей главе представлена **пятая научная задача** – практические рекомендации по повышению точности позиционирования БЛА с использованием разработанных методов и способов.

Разработан алгоритм управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, позволяющий обеспечить возможность выполнения полетного задания в автономном режиме полета при отсутствии радиоканала дистанционного управления и искаженном или подавленном НП. Достоверность работы алгоритма проверена путем реализации имитационной модели устройства определения факта и типа искажения НП GPS/ГЛОНАСС.

Для определения состояний спутниковых каналов связи разработана имитационная модель идентификации состояний страссы распространения СРНС, позволяющая осуществлять идентификацию закона распределения огибающей навигационного сигнала. Данная модель актуальна для применения в навигационных приемниках, у которых отсутствует возможность анализа квадратурных компонент сигнала, при эксплуатации в условиях повышенной вероятности возникновения ионосферных флуктуаций.

Для оптимизации порогов классификации состояний спутниковых каналов разработаны имитационные модели, с целью повышения чувствительности навигационного оборудования БЛА. Проведен сравнительный анализ методов третьей научной задачи. Выявлено, что все они обладают точностью не хуже  $10^{-3}$ . Определено, что для закона Накагами наиболее предпочтительно использовать метод Ньютона-Крылова, для закона Райса – метод Пауэлла, а для нормального

распределения – метод Ньютона по критерию времени решения системы уравнений.

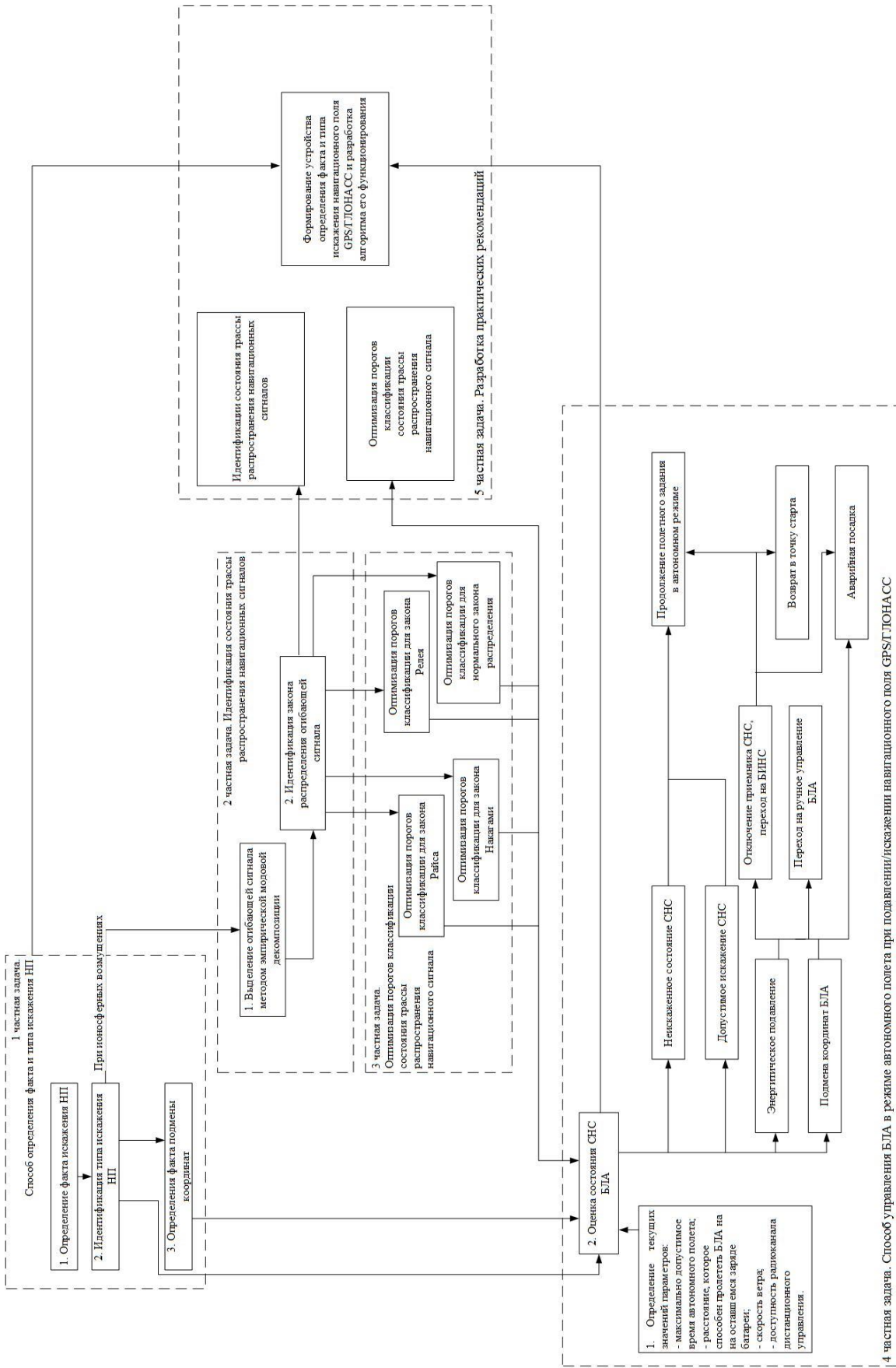


Рисунок 2.1 Связь частных задач исследования

## **2.2. Разработка способа определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС**

БЛА могут функционировать в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки, а именно:

- при движении вне зоны прямой радиовидимости от наземной станции управления, например на удаленных расстояниях, в местах с горным рельефом местности или с высотной городской застройкой;

- при возникновении искажений сигналов спутниковых навигационных систем (СНС) за счет возмущений в ионосфере или тропосфере, или в результате многолучевых переотражений от окружающих объектов естественного или искусственного происхождения, а также за счет сигналов радиорелейных станций операторов сотовой связи, то есть когда на навигационное поле (НП) воздействуют естественные или непреднамеренные помехи;

- при энергетическом подавлении сигналов СНС помехами, создаваемыми средствами прерывания полета БЛА, или при активном навязывания ложного местоположение приемнику СРНС, то есть когда на НП воздействуют преднамеренные помехи.

Для обеспечения возможности функционирования БЛА в данных условиях, необходимо своевременно и достоверно определять факт искажения/подавления НП GPS/ГЛОНАСС.

### 2.2.1. Постановка частной задачи на исследование

Для оценки состояния НП GPS/ГЛОНАСС доступны для измерения и вычисления, следующие данные:

- выборка из  $N \geq 30$  достоверных измерений координат местоопределения (МО) БЛА;
- отношение сигнал/помеха  $h$  в измерительных каналах;
- время получения пакетов GPS/ГЛОНАСС  $t$ ;
- ошибка времени получения пакетов GPS/ГЛОНАСС  $\sigma t$ ;
- геометрический фактор снижения точности по местоположению БЛА  $P_{DOP}$ ;

Необходимо разработать способ, позволяющий:

1. Определять факт искажения навигационного поля.
2. Идентифицировать вид помехового воздействия.
3. Определять факт изменения текущего состояния навигационного поля.

В качестве ограничений будем считать, что состояния навигационного поля описываются ограниченным множеством, состоящим из пяти классов:

- нормальное (неискаженное) состояние;
- аномальное состояние, когда скачкообразно возникают аномально высокие ошибки в оценке местоопределения (МО) БЛА;
- незначительно искаженное состояние, приводящее к медленному накоплению ошибки МО БЛА;
- активное навязывание ложного местоположение приемнику СРНС, проявляющийся в преднамеренной подмене координат МО для плавного увода БЛА с заданного маршрута движения;
- энергетическое подавление, при котором отношение сигнал/помеха резко уменьшается до величины, меньшей порога чувствительности навигационного приемника (НПР).

### 2.2.2. Способ определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС

Известно, что навигационные сигналы, поступающие на вход НПП совместно с шумами и помехами различного вида, являются случайными величинами, распределенными по случайному закону [104]. Поэтому, полученная в процессе приема радионавигационных сигналов последовательность оценок погрешностей местоопределения (МО) БЛА, также имеет случайное распределение.

В условиях, когда отношение сигнал/помеха ( $h = S/J$ ) на входе измерительных каналов НПП превышает предусмотренную интерфейсными контрольными документами ГНСС нормативную величину, равную 45 дБм/Гц, фактором, влияющим на точность оценки навигационных параметров, является только аддитивный шум на входе НПП [105, 106]. В этом случае средние значения оценок МО приблизительно совпадают с их истинными значениями, а незначительные погрешности попадают в заданный доверительный интервал. Данный факт является признаком, по которому определяется, что НП находится в нормальном (неискаженном) состоянии.

При наличии дополнительных преднамеренных или непреднамеренных возмущающих воздействий средние значения оценок МО оказываются отличными от истинных значений, и превышение их модулей некоторых пороговых значений интерпретируется как факт нарушения целостности НП. Выбор порогов должен производиться с учетом необходимости обеспечения требуемого значения доверительной вероятности и позволять идентифицировать классы помехового воздействия.

Для определения факта искажения НП использован подход, изложенный в работах [107-109]. Его суть заключается в полиномиальной аппроксимации

некоторого массива из  $N$  достоверных измерений  $R = (R_1, R_2, \dots, R_j, \dots, R_N)$  в виде оценок МО БЛА на интервале времени  $t \in [t_o, t_a]$  с шагом  $\tau$ , равным периоду поступления навигационных параметров. Аппроксимация осуществляется полиномом  $m$ -й степени. Исследования показали [108, 109], что для аппроксимации траектории движения БЛА с заданной точностью достаточно использовать полиномы 5 или 6-й степени.

Для массива оцениваемых координат МО БЛА, представленного в виде матрицы-столбца  $R$ , получим следующую систему уравнений [104]:

$$\mathbf{V}^T \times \mathbf{V} \times \mathbf{C} = \mathbf{V}^T \times \mathbf{R}, \quad (2.1)$$

где:  $\mathbf{V}$  – матрица Вандермонда размером  $N \times (m+1)$ , элементы которой задаются следующим образом:  $V_{i,j} = t_i^j$  ( $i = 0, N-1$ ;  $j = 0, m$ ).

Вектор  $\mathbf{C}$  искомых коэффициентов полинома размерности  $(m+1) \times 1$  определяется из решения уравнения:

$$\mathbf{C} = (\mathbf{V}^T \times \mathbf{V})^{-1} \times \mathbf{V}^T \times \mathbf{R}. \quad (2.2)$$

В результате аппроксимирующая функция, совпадающая в  $N+1$  точках с распределением достоверных измерений координат МО, имеет вид:

$$F(t) = \sum_{j=0}^m C_j \cdot t^j. \quad (2.3)$$

Для расчета следующей координаты МО производится процедура экстраполяции. Подставляя в аппроксимирующий полином значения полученных коэффициентов и значение времени  $t_9 = t_a + \tau$ , получаем значение экстраполируемой функции для следующего отсчета координат на заданном временном интервале, т.е.

$$F(t_9) = \sum_{j=0}^m C_j \cdot t_9^j. \quad (2.4)$$

Если измерения  $R$  в матрице-столбце  $\mathbf{R}$  некоррелированные и имеют дисперсию, описываемую вектором  $\sigma_{\mathbf{R}}^2$ , то корреляционная матрица ошибок коэффициентов полинома равна

$$\mathbf{K}_C = (\mathbf{V}^T \times \mathbf{V})^{-1} \times \sigma_{\mathbf{R}}^2. \quad (2.5)$$

В результате задача определения факта искажения НП сводится к различению двух гипотез: а) является ли отклонение оцениваемой координаты МО от расчетной координаты результатом ошибок измерений; б) имеется ли аномальное измерение, которое необходимо исключить из обработки.

Наиболее сложно обнаружить факт искажения НП, когда отношение сигнал/помеха  $h = S/J$  на входе измерительных каналов НПР уменьшается незначительно на 10...20 дБм/Гц. Здесь возможны два случая. Первый случай характеризуется активным навязыванием ложных координат МО для увода БЛА с маршрута полета или его принудительной посадки. Второй случай характерен тем, что из-за возмущений в ионосфере могут происходить замирания, вызванные многолучевыми переотражениями от окружающих объектов.

В обоих случаях точностные характеристики МО будут искажены незначительно, что не позволяет их легко обнаружить, поскольку средние значения оценок МО оказываются близкими к истинным. Это накладывает высокие требования на чувствительность и достоверность алгоритмов обнаружения помехового воздействия.

Для устранения данного недостатка в предлагаемом способе используется байесовский вероятностный подход к решению задачи обнаружения факта искажения НП и идентификации помехового воздействия [110, 111]. При этом переменными, характеризующими состояние НП, являются оценки МО, то есть пространственные координаты местоположения БЛА, входящие в вектор состояния потребителя ГНСС. Применение этого подхода основано на вычислении условной вероятности появления такого события, как текущее состояние  $D_k$  НП при условии, что в результате измерений получен конкретный



набор значений признаков  $R$ . В качестве идентификационных признаков выступают оценки МО  $R = (R_1, R_2, \dots, R_j, \dots, R_N)$ , при этом учитываются их среднее значение  $\mu_R$  и  $\sigma_R$  среднеквадратические погрешности (СКП). Поскольку данные признаки являются случайными величинами, возможность появления конкретной реализации случайной величины  $R_j$  характеризуется вероятностью  $P(R_j)$ .

Исходя из ограничений постановки задачи, НП в процессе полета БЛА может находиться в одном из  $K$  состояний  $D = (D_1, D_2, \dots, D_k, \dots, D_K)$ , которые определяются типовыми классами: нормальное (неискаженное) состояние; аномальное состояние, когда скачкообразно возникают аномально высокие ошибки в оценке МО по отдельным измерительным каналам НПП; незначительно искаженное состояние, приводящее к медленному изменению МО, при этом возможна их оценка с допустимой погрешностью; активное навязывания ложного местоположение приемнику СРНС, проявляющийся в подмене координат МО для плавного увода БЛА с заданного маршрута движения или его принудительной посадки; энергетическое подавление, при котором отношение сигнал/помеха по всем каналам НПП резко уменьшается до величины, меньшей порога чувствительности – 13...15 дБм/Гц [112], что приводит к скачкообразному и быстрому изменению координат МО.

Для вероятностной оценки состояния НП, при использовании совокупности признаков по полученной выборке МО, воспользуемся формулой Байеса [110, 111]:

$$p(D_k/R_j) = \frac{p(D_k) \cdot p(R_j/D_k)}{P(R)} = \frac{p(D_k) \cdot p(R_j/D_k)}{\int_D p(D) \cdot p(R_j/D) dD} \quad (2.6)$$

где:  $p(D_k/R_j)$  – апостериорная плотность распределения нахождения НП в состоянии  $D_k$  при получении комплекса признаков  $R_j$  т.е. величина, которая определяется для решения задачи распознавания классов (в данном случае различения состояний НП);

$p(R_j/D_k)$  – априорная плотность распределения случайной величины  $R_j$  при условии, что НП находится в состоянии  $D_k$ . Она имеет смысл функции правдоподобия и определяется путем статистической обработки выборки из  $N$  оцениваемых измерений координат МО, погрешности которых распределены по нормальному закону. Для определения функции правдоподобия в заданном доверительном интервале ( $\pm 2$ -сигма) необходимо для конкретной реализации совокупности признаков  $R_j$  рассчитать их выборочное среднее  $\mu_R$  и выборочную среднеквадратическую погрешность (СКП)  $\sigma_R$ ;

$p(D_k)$  – априорная плотность распределения конкретного состояния  $D_k$  НП определяется путем статистической обработки выборки из  $N$  оцениваемых измерений координат МО, как частота такого события  $N_k$ , при котором оцениваемое МО входит в установленный доверительный интервал, соответствующий состоянию НП  $D_k$ , т.е.  $P(D_k) = N_k/N$ ;

$P(R)$  – априорная вероятность появления конкретной реализации совокупности признаков  $R$  для всех возможных состояний НП, носит смысл масштабирующего множителя, который для генеральной выборки равен 1.

Рассчитанная статистическим образом функция правдоподобия  $p(R_j/D_k)$  позволяет оценить, насколько корректно получены значения конкретной реализации признаков  $R_j$ , содержащиеся в выборке из  $N$  элементов, при известном априорном состоянии навигационного поля  $D_k$ .

С целью обеспечения нормальности распределения, объем выборки устанавливается равным  $N \geq 30$ . Время ее формирования при поступлении навигационных параметров с периодом 0,1...0,5 сек, составляет от 3 до 15 сек. Это достаточно большое время, однако такой объем приемлем для БЛА мультироторного типа, имеющих возможность зависать в одной точке.

Таким образом, применение байесовского подхода позволяет после статистической обработки признаков получить апостериорную плотность

распределения возможных значений вероятности нахождения НП в одном из классов его состояний. Действительно, за счет применения формулы Байеса, априорная плотность распределения, установленная до анализа данных из принятой выборки признаков, превращается в апостериорную. Это позволяет оценить достоверность попадания состояния НП в зону, относящуюся к какому-либо определенному классу. При этом следует учитывать, что формулу (2.6) необходимо применять итерационно после поступления каждой новой порции данных. Тогда текущее распределение считается априорным, а с поступлением новых данных получается апостериорное распределение, становящееся априорным для следующей итерации. Применение байесовского подхода требует дополнительного времени, которое расходуется на машинное обучение вычислителя НПР статистически оценивать текущее состояние НП по полученным признакам в виде эмпирического распределения координат МО БЛА.

Для получения непосредственно доверительной апостериорной вероятности  $P(D_k/R_j)$  воспользуемся способом максимизации апостериорной плотности (МАП), позволяющим найти точку, в которой она максимальна. Для этого, прологарифмировав формулу Байеса, получим

$$\ln(p(D_k/R_j^*)) = \ln(p(D_k)) + \ln(p(R_j/D_k)) - \ln(P(R)) \quad (2.7)$$

Тогда задача максимизации выражения (2.6) по параметру  $D_k$  примет вид:

$$L = \ln(p(R_j/D_k)) + \ln(p(D_k)) \rightarrow \max \quad (2.8)$$

Из выражения (2.8) видно, что данный способ максимизирует логарифмы правдоподобия и априорного распределения вероятности конкретного состояния НП. Второе слагаемое выступает в роли регулятора машинного обучения, поскольку, чем больше вероятность  $P(D_k)$ , тем при меньшем объеме выборки можно получить более точное значение доверительной вероятности.

Применим способ МАП для решения задачи обнаружения факта искажения НП, тогда оценка погрешности текущего МО БЛА находится из уравнения

$$\Delta R_j = R_j - F(t_s), \quad (2.9)$$

где  $F(t_s)$  – экстраполированное значение текущей координаты МО.

Будем считать, что погрешности МО распределены по нормальному закону, тогда

$$\begin{aligned} \ln(p(R_j/D_k)) &= \ln\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma_k^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(R_j - F(t_s))^2}{2\sigma_k^2}\right)\right) = \\ &= -\frac{1}{2} \ln(2\pi \cdot \sigma_k^2) - \frac{(R_j - F(t_s))^2}{2\sigma_k^2} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Первое слагаемое в формуле (2.10) есть величина постоянная для текущего распределения, следовательно, максимизация логарифма правдоподобия осуществляется за счет минимизации второго слагаемого. В результате задача максимизации логарифма правдоподобия обучающей выборки сводится к минимизации квадратичной погрешности, т.е.

$$(R_j - F(t_s))^2 \rightarrow \min. \quad (2.11)$$

Величины погрешностей МО БЛА можно использовать для оценки состояния НП, поскольку они существенно возрастают под воздействием помех. В результате между максимумами априорных и апостериорных плотностей вероятностей появляется существенное различие, позволяющее ввести пороговое значение, по которому можно устанавливать принадлежность состояния НП к одному из классов.

Следовательно, для принятия решения о наличии факта искажения НП и идентификации видов помехового воздействия необходимо определить пороговые значения. С учетом нормальности распределения оценок МО, опираясь на способ максимального правдоподобия, установим предельную среднюю квадратическую погрешность (СКП) для доверительного интервала  $\pm 2$ -сигма, как удвоенное минимально возможное отклонение для текущего состояния НП.

Предельная СКП, зависящая от отношения сигнал/шум  $h_k$  на входе измерительных каналов НПП, равно [104]:

$$\Delta_k = 2 \cdot P_{dop} \sqrt{(\delta t \cdot c)^2 + \frac{(c)^2}{2h_k \cdot F^2}}, \quad (2.12)$$

где:  $P_{dop}$  – геометрический фактор снижения точности координаты по местоположению;

$F$  – эффективная (среднеквадратическая) ширина спектра навигационного сигнала;

$\delta t$  – ошибка времени НПП;  $c$  – скорость света.

Для построения решающего правила по критерию минимизации СКП, воспользуемся следующим неравенством

$$\frac{1}{2} \ln(2\pi \cdot \sigma_k^2) + \frac{(R_j - F(t_j))^2}{2\sigma_k^2} \leq \Delta_k \quad (2.13)$$

Тогда, согласно этому критерию, для обнаружения факта искажения НП необходима проверка неравенства (2.14), а для идентификации видов помехового воздействия – проверка неравенств (2.15), т.е.

$$\Delta R_j \leq \theta_1 = \sqrt{2\sigma_k^2 (\Delta_1 - 0,5 \ln(2\pi\sigma_k^2))} \quad (2.14)$$

$$\Delta R_j > \theta_k = \sqrt{2\sigma_k^2 (\Delta_k - 0,5 \ln(2\pi\sigma_k^2))}, \quad (2.15)$$

где  $k = \overline{2, K}$ .

Таким образом, если погрешность МО превосходит минимальное пороговое значение  $\theta_1$ , то имеем факт искажения НП. Дальнейшее сравнение погрешности МО с другими пороговыми значениями  $\theta_k$  ( $k = 2 \dots K$ ) позволит идентифицировать вид помехового воздействия по принадлежности состояния НП к тому или иному классу.

Идентификацию активного навязывания ложного местоположение приемнику СРНС предлагается осуществлять в процессе полета БЛА путем зависания БЛА в одной точке пространства (при обнаружении состояния НП

$D_k \in D_{sp}$ ). Если при контроле  $h_k \geq h_n = 45$  дБм/Гц имеем факт нормального состояния НП, но при этом не будет выполняться неравенство (2.14), но выполняется одно из неравенств (2.15), такую ситуацию следует идентифицировать как активное навязывание неправильных координат МО.

Математически условие факта активного навязывания неправильных координат МО запишем в виде:

$$D_k \in D_{sp} \text{ if } h_k \geq h_n \cap \exists k = 2 \dots 5, \Delta R_j > \sqrt{2\sigma_k^2 \left( \Delta_k - 0,5 \ln(2\pi\sigma_k^2) \right)}. \quad (2.16)$$

Таким образом, разработан способ позволяющий достоверно определять факт искажения НП и идентифицировать его состояние с использованием типовых классов. Разработанный способ позволяет:

1. Определять факт искажения навигационного поля.
2. Идентифицировать вид помехового воздействия.
3. Определять факт изменения текущего состояния навигационного поля.

## **2.3. Разработка методики идентификации состояний трассы распространения СРНС**

### **2.3.1. Постановка частной задачи на разработку методики**

В связи с тем, что навигационные приемники, используемые на борту БЛА легкого класса, не позволяют осуществлять анализ квадратурных компонент принимаемого сигнала, требуется:

1. Исследовать критерии по соответствующим статистикам на заранее известных тестовых выборках законов распределения случайных величин и определить критерий, обладающий точностью идентификации не хуже 95 %.

2. Разработать метод обеспечивающий классификацию выборки законов распределения случайных величин (нормального, Релея, Райса и Накагами) с точностью не менее 95%.

3. Адекватность выбранного критерия проверить на статистических выборках, полученных с использованием оборудования «Аппаратно-программный комплекс пассивного мониторинга ионосферы NovAtel GPStation-6».

### **2.3.2. Методика идентификации состояний трассы распространения СРНС**

Для получения оптимального критерия проведено сравнение предложенных критериев с использованием эталонных распределений на предмет идентификации формы заведомо известного исходного закона распределения. При этом проведены измерения времени вычисления используемых критериев и подсчет количества правильных результатов идентификации. Реализация алгоритма сравнения критериев в виде программы на языке Python приведена в приложении Б.

Сравнение критериев производилось на одинаковых выборках. Размеры и количества выборок для исходных распределений представлены в таблице 2.1.

Результатом работы алгоритма является коэффициент правдоподобия, сопоставленный с каждой из статистических гипотез, при этом предпочтение

отдается той гипотезе, которая имеет максимальный коэффициент правдоподобия.

Проведено исследование с целью выбора критерия идентификации по сформированным выборкам. На заданном множестве выборок определялось число верных identifications эмпирического распределения. Результаты тестирования сформированных выборок для исследуемых критериев представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.1 – Размеры выборок для тестирования критериев идентификации

Количество измерений в выборке	Количество тестов для закона распределения			
	Нормальный	Рэля	Райса	Накагами
1 000	100	100	100	100
10 000	100	100	100	100
100 000	100	100	100	100
1 000 000	100	100	100	100

Анализ таблицы 2.2 показал, что критерий Омега-квадрат имеет худший результат. Стандартная реализация критерия, взятая за основу, способна качественно определять только нормальное распределение. При этом критерии Колмогорова-Смирнова, Купера и Ватсона показывают достаточно хороший результат. Приемлемым для них является выборка размером 1000 элементов, что позволяет использовать данные критерии для идентификации законов распределений случайных величин при практическом применении.

На рисунке 2.2 в качестве примера представлены графики вероятностей верной идентификации для нормального закона распределения при различных значениях выборок. Аналогичные графики получены для законов Рэля, Райса, Накагами.

С помощью библиотеки Timeit проведены измерения времени работы алгоритмов исследуемых критериев в зависимости от размера выборки для исследуемых законов распределений. Результаты измерений среднего времени работы алгоритмов идентификации эмпирических выборок и исследуемых



критериев при определении закона Райса, приведены в таблице 2.3 и на рисунке 2.3.

Таблица 2.2 – Значения вероятностей верной идентификации эмпирических распределений

Нормальный закон				
Критерий	Размер выборки			
	1000	10 000	100 000	1 000 000
Колмогорова-Смирнова	96 %	97%	98 %	98 %
Купера	95 %	96 %	96 %	96 %
Хи-квадрат	75 %	75 %	78 %	79 %
Омега-квадрат	86 %	88 %	90 %	90 %
Андерсона-Дарлингга	80 %	85 %	87 %	88 %
Ватсона	94 %	95 %	95 %	95 %
Закон Накагами				
Колмогорова-Смирнова	97 %	97%	97 %	97 %
Купера	95 %	95 %	95 %	96 %
Хи-квадрат	70 %	72 %	74 %	75 %
Омега-квадрат	0 %	0 %	0 %	0 %
Андерсона-Дарлингга	80 %	81 %	82 %	84 %
Ватсона	95 %	95 %	95 %	95 %
Закон Райса				
Колмогорова-Смирнова	95 %	95%	95 %	95 %
Купера	94 %	95 %	95 %	95 %
Хи-квадрат	75 %	75 %	78 %	79 %
Омега-квадрат	0 %	0 %	0 %	0 %
Андерсона-Дарлингга	80 %	85 %	87 %	88 %
Ватсона	95 %	95 %	95 %	95 %
Закон Релея				
Колмогорова-Смирнова	97 %	97%	98 %	98 %
Купера	95 %	95 %	96 %	96 %
Хи-квадрат	72 %	74 %	74 %	75 %
Омега-квадрат	0 %	0 %	0 %	0 %
Андерсона-Дарлингга	65 %	71 %	72 %	72 %
Ватсона	95 %	95 %	95 %	95 %

Анализ показал, что критерий Хи-квадрат имеет наибольшее среднее время работы алгоритма. Остальные алгоритмы имеют сопоставимое среднее время

работы алгоритмов. По совокупности исследуемых характеристик определения законов, лучшие показатели по вероятности верной идентификации и среднего времени имеет критерий Колмогорова-Смирнова.

Таблица 2.3 – Среднее время работы алгоритмов идентификации критериев при распределении эмпирических выборок по закону Райса

Критерий	Размер выборки			
	1000	10 000	100 000	1 000 000
Колмогорова-Смирнова	0,2688 с.	0,688 с.	1,596 с.	1,76 с.
Купера	0,328 с.	0,67 с.	1,75 с.	1,83 с.
Хи-квадрат	0,479 с.	0,848 с.	2,72 с.	5,09 с.
Андерсона-Дарлингга	0,578 с.	0,823 с.	1,654 с.	1,896 с.
Ватсона	0,487 с.	0,563 с.	1,647 с.	1,913 с.

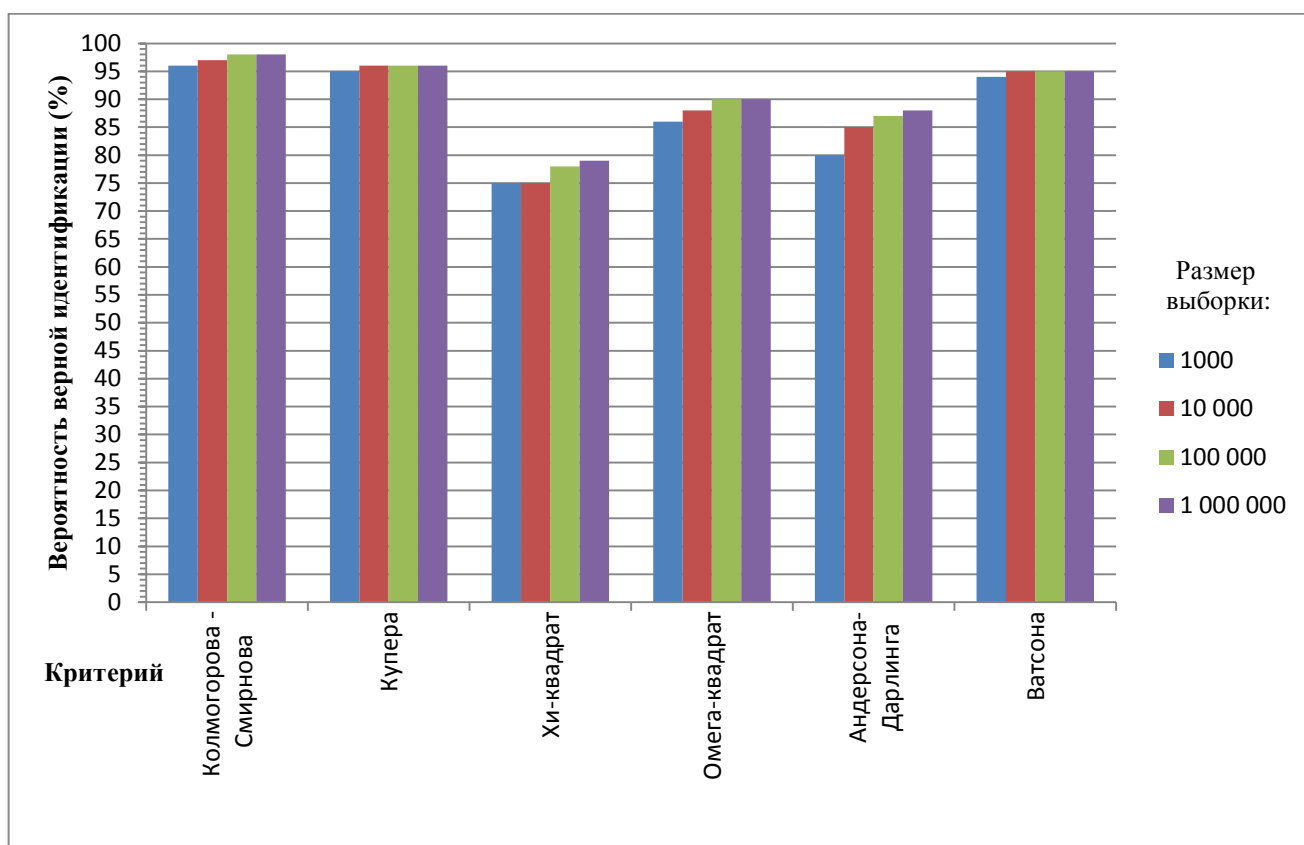


Рисунок 2.2 – Графики вероятностей верной идентификации для нормального закона распределения

С целью проверки адекватности результатов исследований, произведено тестирование эмпирических распределений, полученных с использованием оборудования «Аппаратно-программный комплекс пассивного мониторинга ионосферы NovAtel GPStation-6».

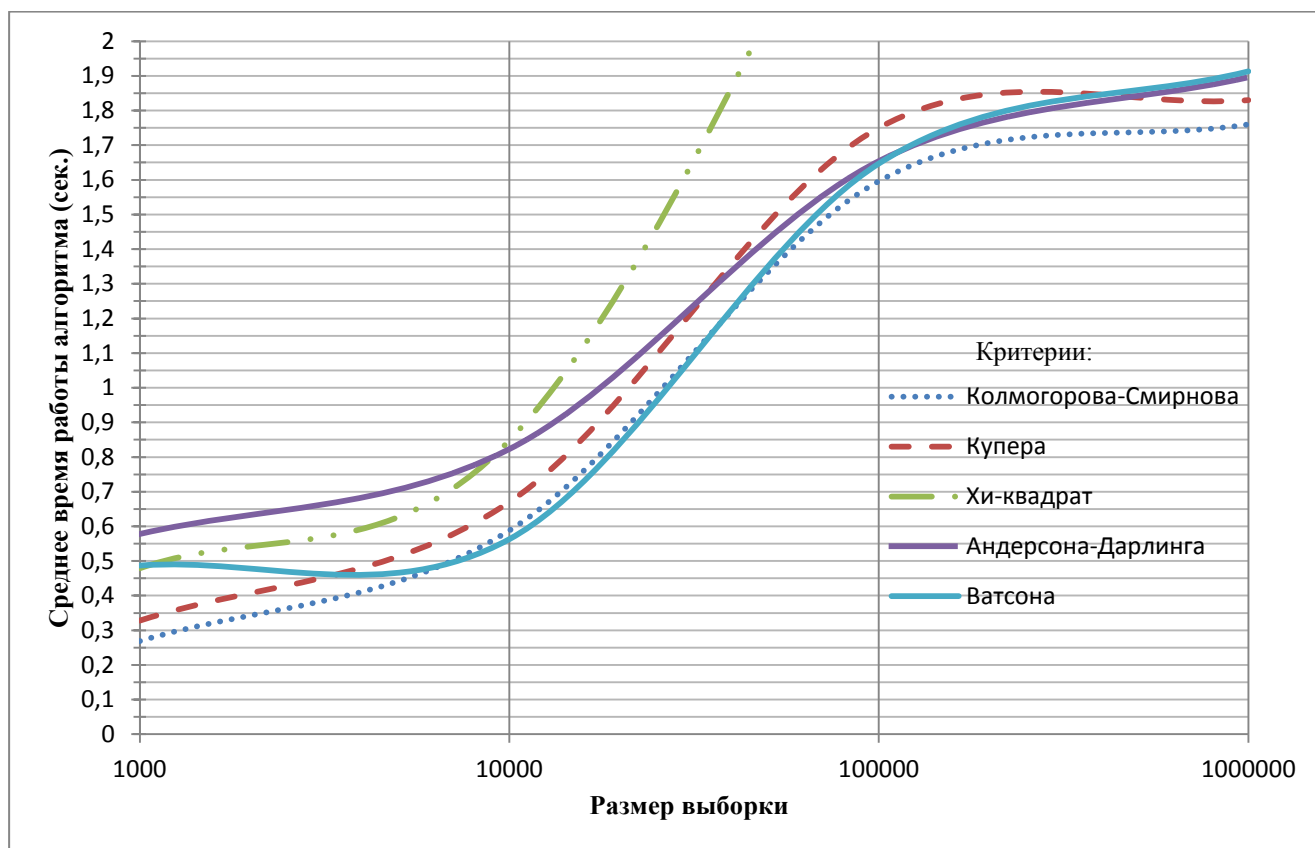


Рисунок 2.3 – График зависимости среднего времени идентификации эмпирических выборок распределенных по закону Райса.

Для тестирования использовались критерии Колмогорова-Смирнова, Купера и Ватсона. Данные, полученные с приемника GPStation-6, обрабатывались вручную. Исследовались 100 выборок с заранее определенным распределением размером 10 000 элементов. Анализ показал, близость результатов полученных исследований. Лучшим критерием оказался критерий Колмогорова-Смирнова, имеющий точность идентификации более 95%. Критерии Купера и Ватсона соответственно идентифицировали эмпирическое распределение с точностью 90 и 93 процента.

Таким образом, в разрабатываемом методе целесообразно использовать критерий Колмогорова-Смирнова.

Модовая декомпозиция сигналов основана на предположении, что любые данные состоят из различных внутренних колебаний (intrinsic mode functions, IMF) [113]. Каждое колебание, линейное или нелинейное, представляет собой модовую функцию, которая имеет экстремумы и нулевые пересечения [114].

Разделяя входной сигнал приемника GPS/ГЛОНАСС на семейство функций IMF и остаточный тренд получим представление сигнала в виде суммы модовых функций и конечного остатка:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t), r_0 = N(t), \quad (2.17)$$

где  $n$  – количество эмпирических мод, которое устанавливается в ходе вычислений,  $r_0$  – конечный остаток.

Эмпирическая модовая декомпозиция осуществляется следующим способом:

1. В сигнале  $y(k)$  находится положение всех локальных экстремумов, максимумов  $k_{i,max}$  и минимумов  $k_{i,min}$  исследуемого процесса, и значения в этих точках;

2. Кубическим сплайном вычисляются верхняя  $u_i(k)$  и нижняя  $u_b(k)$  огибающие процесса соответственно, по максимумам  $y(k_{i,max})$  и минимумам  $y(k_{i,min})$ ;

3. Определяем функцию средних значений  $m_i(k)$  между огибающими на  $i$ -й итерации алгоритма:

$$m_i(k) = \frac{(u_t(k) + u_b(k))}{2} \quad (2.18)$$

4. Разность между сигналом  $y(k)$  и функцией  $m_1(k)$  является первой компонентой отсеивания  $c_1(k)$ . Общая формула компоненты имеет вид:

$$c_i(k) = c_{i-1}(k) - m_i(k), \quad (2.19)$$

при этом компонент  $c_0$  равен исходному сигналу.

Последующие итерации выполняются аналогично. Критерием остановки является:

$$\delta = \frac{\sum_{t=0}^r |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_{t=0}^r h_{k-1}^2(t)} \quad (2.20)$$

Результирующий сигнал представляется в виде:

$$x_p(t) = \sum_{j=1}^{n-4} c_j(t) + r_n(t), \quad r_0 = N(t) \quad (2.21)$$

Последовательность этапов методики идентификации состояния трассы распространения СРНС:

1. Сбор экспериментальной статистики эмпирического распределения.
2. Эмпирическая модовая декомпозиция сигнала.
3. Формирование результирующей функции.
4. Построение дифференциальной функции эмпирического распределения.
5. Построение дифференциальных функций распределений для каждого из теоритических распределений с параметрами эмпирического распределения:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i \cdot x_{pi})}{K}; \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2 n_i}{K - 1}};$$

$$Z_i = \left| \frac{X_i - \bar{X}}{S} \right|; \quad \varphi(Z_i) = D_i; \quad n_i = \frac{K \cdot \varphi(Z_i) \cdot h}{S}. \quad (2.22)$$

6. Определение коэффициента правдоподобия исследуемой выборки по критерию согласия:

$$G_n = \sup |F_n(x) - D_n(x)| \quad (2.23)$$

7. Выбор гипотезы по максимальному значению коэффициента правдоподобия:

$$\text{if } G_n = \max(G_n) \rightarrow F(t) \in D_n \quad (2.24)$$

На основе предложенной методики реализована программа идентификации состояния трассы распространения СРНС на языке Python, которая приведена в приложении В.

Таким образом, разработана методика идентификаций состояния трассы распространения СРНС, позволяющий выделить и проанализировать огибающую сигнала для определения закона распределения с точностью 95%.

#### **2.4. Разработка метода оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС**

Для анализа замираний в трансионосферных сигналах связи исследуется амплитуда квадратурных компонент, возникающая вследствие интерференции сигналов с одинаковой частотой, но с разными фазами, и его функция распределения.

Появление искажений в тракте приемника приводит к насыщению спектра гармоника помехами, что приводит к срыву слежения за спутниками и увеличению ошибки при декодировании сигналов, фазовых и кодовых измерений, что снижает точность определения характеристик глобальных навигационных спутниковых систем и увеличивает время обработки информации.

Известно, что определение порогов классификации обнаружения сигналов может решаться различными методами с использованием различных критериев [115]. Наиболее широкое распространение в подобных задачах получил критерий Неймана-Пирсона, т.к. его использование позволяет зафиксировать вероятность ложной тревоги [116].

### 2.4.1. Постановка частной задачи на разработку метода

Требуется:

1. Определить значения оптимальных порогов классификации  $x_0$  и  $y_0$ , при распределениях Райса, Накагами и нормальном законе, с точностью не хуже  $10^{-3}$ .
2. Обеспечить вероятность ложной тревоги  $P_f$  не менее чем  $10^{-5}$ .

При ограничениях:

$$p_1 = const; p_1 + p_2 = 1.$$

### 2.4.2. Метод оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС

Используем подход выбора оптимальных порогов классификации, изложенный в [96]. Системой идентификации по заданным характеристикам осуществляется поиск и распознавание объектов. Устройством обнаружения совершается выборка объектов по заданному признаку  $x$ , устройством распознавания устанавливается принадлежность выбранного объекта, согласно предъявляемому признаку  $y$ , к соответствующему классу. При этом закон распределения признаков  $x$  и  $y$  описывается нормальным законом распределения, законом Райса, Релея или Накагами. В процессе функционирования обнаружитель сигнала неизбежно совершает ошибки первого и второго рода. Необходимо минимизировать вероятность возникновения ошибок первого и второго рода.

Для этого, задачу распознавания объектов в общем случае формально сведем к проверке многих гипотез  $B_1, B_2, \dots, B_i, \dots, B_k$  где  $B_i$  - гипотеза, предполагающая принадлежность объекта классу  $A_i$ . Будем считать, что априорные распределения вероятностей этих гипотез заданы, т.е. известно, с какой вероятностью  $P(B_i)$  объект может принадлежать классу  $A_i$ . Причем,  $\sum_{i=1}^k P(B_i) = 1$ , поскольку объект должен принадлежать определенному классу. При этом условии плотность распределения имеет вид  $p_i(x) = p(x_i / B_i)$ . В системе идентификации используются две гипотезы  $B_1 = N$  и  $B_2 = \bar{N}$  при соответствующих им априорных вероятностях появления нормальной  $p_1 = p(B_1) = p(N)$  и аномальной  $p_2 = p(B_2) = p(\bar{N})$  ситуации в системе. Причем,  $p_1 + p_2 = 1$ .

В качестве решающего правила, обеспечивающего наивысшую точность системы идентификации, используем критерий Неймана-Пирсона. Зафиксируем вероятность ложной тревоги  $P_{л.м.}$  на постоянном уровне  $C$  и потребуем минимума ошибки пропуска  $P_{np}^{\min}$  нарушения режима работы системы. Тогда

$$P_{np}^{\min} = \min p_2 \beta(x_0) \quad (2.25)$$

при ограничении

$$P_{л.м.} = p_1 \alpha(x_0) = C = const, \quad (2.26)$$

где  $\alpha(x_0)$  - ошибки первого рода;  $\beta(x_0)$  - ошибки второго рода.

Определим ошибки первого рода (ошибка «ложной тревоги» рис. 1а) и второго рода (ошибка «наличие аномальной ситуации» рис. 1б):

$$\alpha(x_0) = \int_{x_0}^{\infty} f(x / N) dx, \quad (2.27)$$

$$\beta(x_0) = \int_{-\infty}^{x_0} f(x / \bar{N}) dx. \quad (2.28)$$



Запишем функции плотностей распределения признака  $x$  при исправном функционировании системы  $f(x/N) = f_1(x)$  и неисправном -  $f(x/\bar{N}) = f_2(x)$ . Тогда ошибки первого и второго рода первого этапа будут соответственно равны:

$$\alpha_{обн} = \int_{x_0}^{\infty} f_1(x)dx; \beta_{обн} = \int_{-\infty}^{x_0} f_2(x)dx \quad (2.29)$$

Аналогично определяются ошибки первого и второго рода для второго этапа:

$$\alpha_{пас} = \int_{y_0}^{\infty} f_1(y)dy; \beta_{пас} = \int_{-\infty}^{y_0} f_2(y)dy. \quad (2.30)$$

Необходимо найти оптимальные пороги классификации  $x_0$  и  $y_0$ .

С учетом формул (2.29) и (2.30), формулы (2.25) и (2.26) принимают вид:

$$P_{л.м.} = p_1 \int_{x_0}^{\infty} f_1(x)dx \int_{y_0}^{\infty} f_1(y)dy = C = const; \quad (2.31)$$

$$P_{np}^{\min} = \min p_2 (1 - \int_{x_0}^{\infty} f_2(x)dx \int_{y_0}^{\infty} f_2(y)dy). \quad (2.32)$$

Так как в выражении (2.31) пороги  $x_0$  и  $y_0$  связаны одной функциональной зависимостью  $x_0 = \varphi(y_0)$ , продифференцировав (2.32) по  $y_0$  и приравняв его нулю, получим

$$\frac{dx_0}{dy_0} \cdot f_2(x_0) \cdot \int_{y_0}^{\infty} f_2(y)dy + f_2(y_0) \cdot \int_{x_0}^{\infty} f_2(x)dx = 0. \quad (2.33)$$

Общая постановка задачи оптимизации порогов классификации  $(x_0, y_0)$  сводится к решению системы уравнений:

$$\begin{cases} \int_{x_0}^{\infty} f_1(x)dx \cdot \int_{y_0}^{\infty} f_1(y)dy = C / p_1 \\ \frac{dx_0}{dy_0} \cdot f_2(x_0) \cdot \int_{y_0}^{\infty} f_2(y)dy + f_2(y_0) \cdot \int_{x_0}^{\infty} f_2(x)dx = 0 \end{cases}, \quad (2.34)$$

при ограничениях:  $p_1 = const$  при  $p_1 + p_2 = 1$ .

Требуется, из решения системы уравнений (2.34) определить оптимальные пороги классификации  $x_0$  и  $y_0$  для нормального закона распределения случайных величин, а также для законов Райса и Накагами.

Решение будем искать в виде [117-119]:

$$\bar{X}_{(n+1)} = \bar{X}_{(n)} - W^{-1}(\bar{X}_{(n)}) * \bar{F}(X_{(n)}), \quad (2.35)$$

$$\text{где } \bar{X}_{(n)} = \begin{pmatrix} x_{(n)}^0 \\ y_{(n)}^0 \end{pmatrix}, \quad \bar{F}(X_{(n)}) = \begin{pmatrix} F_1(x_{(n)}^0, y_{(n)}^0) \\ F_2(x_{(n)}^0, y_{(n)}^0) \end{pmatrix},$$

$$W(x_{(n)}^0, y_{(n)}^0) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_0} & \frac{\partial F_1}{\partial y_0} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_0} & \frac{\partial F_2}{\partial y_0} \end{pmatrix} \Bigg|_{\substack{x_0=x_{(n)}^0 \\ y_0=y_{(n)}^0}} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}.$$

Тогда

$$W^{-1}(x_{(n)}^0, y_{(n)}^0) = \frac{1}{|W(x_{(n)}^0, y_{(n)}^0)|} * \begin{pmatrix} D & -B \\ -C & A \end{pmatrix}, \quad (2.36)$$

$$\text{где } A = \frac{\partial F_1}{\partial x_0} \Bigg|_{\substack{x_0=x_{(n)}^0 \\ y_0=y_{(n)}^0}}, \quad B = \frac{\partial F_1}{\partial y_0} \Bigg|_{\substack{x_0=x_{(n)}^0 \\ y_0=y_{(n)}^0}}, \quad C = \frac{\partial F_2}{\partial x_0} \Bigg|_{\substack{x_0=x_{(n)}^0 \\ y_0=y_{(n)}^0}}, \quad D = \frac{\partial F_2}{\partial y_0} \Bigg|_{\substack{x_0=x_{(n)}^0 \\ y_0=y_{(n)}^0}}.$$

### 2.4.3. Методика оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС для нормального закона

Для решения системы уравнений (2.34) используем функцию нормального распределения в следующей форме [120]:

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_x^{\infty} e^{-u^2/2} du . \quad (2.37)$$

Установим для нее соотношения [120]:

$$\varphi(x) = \frac{1}{2} - \varphi_0(x) , \quad (2.38)$$

где  $\varphi_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^x e^{-u^2/2} du$  - функция Лапласа.

Для данной функции определим следующие соотношения:

$$\int_x^{\infty} f_2(u) du = \int_{x-a}^{\infty} f_1(u) du = \varphi(x-a) ; \quad (2.39)$$

$$(\varphi(x))'_x = -\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-x^2/2} . \quad (2.40)$$

Для дальнейшего решения, на основании (2.39), представим систему уравнений (2.34) в удобном виде:

$$\begin{cases} \varphi(x_0) \cdot \varphi(y_0) = C / p_1 \\ \varphi(x_0 - a) \cdot \varphi(y_0 - b) \rightarrow \max \end{cases} \quad (2.41)$$

Применяя равенство:  $\frac{x+y}{2} \geq \sqrt{x \cdot y}$ , где  $x > 0, y > 0$  и  $x+y = const$ , причем

$\max(x, y)$  достигается при  $x = y$ . Тогда система уравнений (2.41) принимает вид:

$$\varphi(x_0) \cdot \varphi(y_0) = C^* , \quad (2.42)$$

$$x_0 - a = y_0 - b \quad (2.43)$$

Откуда получим:

$$\Delta = a - b ;$$

$$x_0 = y_0 + \Delta ; \quad (2.44)$$

$$\varphi(y_0 + \Delta) \cdot \varphi(y_0) = C^* = const . \quad (2.45)$$

Проведя дифференцирование уравнения (2.38) по  $x$ , получим:

$$\varphi'(x) = \left( \frac{1}{2} - \varphi_0(x) \right)'_x = - \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^{y_0} e^{-\frac{u^2}{2}} du \right)'_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{u^2}{2}} . \quad (2.46)$$

Согласно формулам (2.38), (2.39) и (2.40), система уравнений (2.34) принимает вид:

$$\begin{cases} \varphi(x_0) \cdot \varphi(y_0) = \frac{C}{p_1} \\ \frac{dx_0}{dy_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_0-a)^2}{2}} \cdot \varphi(y_0-b) - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(y_0-b)^2}{2}} \cdot \varphi(x_0-a) = 0 \end{cases} \quad (2.47)$$

Дифференцируя первое уравнение системы (2.41) по  $y_0$ , получим:

$$(\varphi(x_0) \cdot \varphi(y_0))'_{y_0} = \left(\frac{C}{p_1}\right)'_{y_0} \text{ или } (\varphi(x_0))'_{y_0} \cdot \varphi(y_0) + \varphi(x_0) \cdot (\varphi(y_0))'_{y_0} = 0. \quad (2.48)$$

Учитывая, что  $x_0 = x_0(y_0)$ , имеем

$$(\varphi(x_0))'_{x_0} \cdot (x_0)'_{y_0} \cdot \varphi(y_0) - \varphi(x_0) \cdot (\varphi(y_0))'_{y_0} = 0. \quad (2.49)$$

В силу утверждения (2.40), уравнение (2.49) преобразуется к виду:

$$-\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x_0^2}{2}} \cdot \frac{dx_0}{dy_0} \cdot \varphi(y_0) - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{y_0^2}{2}} \cdot \varphi(x_0) = 0. \quad (2.50)$$

Из уравнения (2.49) получим

$$\frac{dx_0}{dy_0} = \frac{e^{-\frac{y_0^2}{2}}}{e^{-\frac{x_0^2}{2}}} \cdot \frac{\varphi(x_0)}{\varphi(y_0)}. \quad (2.51)$$

Подставим (2.51) в систему уравнений (2.47), тогда второе уравнение преобразуется в выражение:

$$\frac{e^{-\frac{x_0^2}{2}}}{e^{-\frac{y_0^2}{2}}} \cdot \frac{\varphi(x_0)}{\varphi(y_0)} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x_0-a)^2}{2}} \cdot \varphi(y_0-b) + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(y_0-b)^2}{2}} \cdot \varphi(x_0-a) = 0. \quad (2.52)$$

Что равнозначно

$$-e^{-\frac{x_0^2}{2}} \cdot e^{-\frac{(x_0-a)^2}{2}} \cdot \varphi(x_0) \cdot \varphi(y_0-b) - e^{-\frac{(y_0-b)^2}{2}} \cdot \varphi(y_0) \cdot \varphi(x_0-a) = 0. \quad (2.53)$$

Учитывая, что

$$\frac{x_0}{2} - \frac{(x_0-a)^2}{2} = x_0 \cdot a - \frac{a^2}{2} \text{ и } \frac{y_0}{2} - \frac{(y_0-b)^2}{2} = y_0 \cdot b - \frac{b^2}{2}, \quad (2.54)$$

то последнее примет вид:

$$-e^{-\frac{x_0 \cdot a - a^2}{2}} \cdot \varphi(x_0) \cdot \varphi(y_0 - b) - e^{-\frac{y_0 \cdot b - b^2}{2}} \cdot \varphi(y_0) \cdot \varphi(x_0 - a) = 0. \quad (2.55)$$

Тогда система уравнений (2.47) преобразуется к следующему виду:

$$\begin{cases} \varphi(x_0) \cdot \varphi(y_0) - \frac{C}{P_1} = 0 \\ e^{-\frac{x_0 \cdot a - a^2}{2}} \cdot \varphi(x_0) \cdot \varphi(y_0 - b) - e^{-\frac{y_0 \cdot b - b^2}{2}} \cdot \varphi(y_0) \cdot \varphi(x_0 - a) = 0 \end{cases}. \quad (2.56)$$

Таким образом, на основании (2.56), получено решение задачи оптимизации порогов классификации трассы распространения СРНС в случае, когда состояние канала связи описывается нормальным законом распределения. На основании полученного решения, разработана имитационная модель, представленная в приложении Г.

#### 2.4.4. Методика оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС для закона Релея

В общем случае решение задачи идентификации определяется ошибками первого и второго рода. Зададим плотности вероятности распределения признаков  $x$  и  $y$  в виде Релеевских законов распределения.

Ошибки первого и второго рода имеют вид:

$$\alpha_o = \int_{x_0}^{\infty} f_1(x) dx; \beta_o = \int_a^{x_0} f_2(x) dx; \alpha_p = \int_{y_0}^{\infty} f_1(y) dy; \beta_p = \int_b^{y_0} f_2(y) dy. \quad (2.57)$$

$$f_1(x) = x e^{-\frac{x^2}{2}}; f_2(x) = (x-a) e^{-\frac{(x-a)^2}{2}}; f_1(y) = y e^{-\frac{y^2}{2}}; f_2(y) = (y-b) e^{-\frac{(y-b)^2}{2}}. \quad (2.58)$$

С учетом формул (2.57), формулы (2.31) и (2.32) принимают вид:

$$P_{л.м.} = p_1 \int_{x_0}^{\infty} f_1(x) dx \int_{y_0}^{\infty} f_1(y) dy = C = const ; \quad (2.59)$$

$$P_{np}^{\min} = \min p_2 \left( 1 - \int_{x_0}^{\infty} f_2(x) dx \int_{y_0}^{\infty} f_2(y) dy \right) . \quad (2.60)$$

Уравнения (2.59) и (2.60) трансформируются в выражения:

$$x_0^2 + y_0^2 = 2 \ln \frac{p_1}{C} ; \quad (2.61)$$

$$\frac{dx_0}{dy_0} \cdot (x_0 - a) + (y_0 - b) = 0 . \quad (2.62)$$

Продифференцировав (2.62) по  $y_0$  и подставив результат в (2.61), получим оптимальные пороги классификации:

$$x_0^* = \sqrt{\frac{2 \ln p_1 / C}{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2}} ; \quad (2.63)$$

$$y_0^* = \sqrt{\frac{2 \ln p_1 / C}{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}} . \quad (2.64)$$

Таким образом, на основании (2.63, 2.64), решена задача оптимизации порогов классификации трассы распространения СРНС в случае, когда состояние канала связи описывается законом распределения Релея. На основании полученного решения разработана имитационная модель, представленная в приложении Д.

### 2.4.5. Методика оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС для закона Райса

Распределение Райса является обобщением распределения Рэлея. Если  $X$  и  $Y$  - независимые случайные величины, имеющие нормальное распределение с одинаковыми дисперсиями  $\sigma^2$  и ненулевыми математическими ожиданиями (в общем случае неравными), то величина  $Z = \sqrt{X^2 + Y^2}$  имеет распределение Райса, плотность вероятности которой определяется в виде:

$$f(x|\nu, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{(x^2 + \nu^2)}{2\sigma^2}} \cdot I_0\left(\frac{x\nu}{\sigma^2}\right), \quad (2.65)$$

где  $I_0(z)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода [121],

$\nu = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2}$ ,  $\mu_1, \mu_2$  – математическое ожидание случайных величин  $X$  и  $Y$ .

Функцию Бесселя можно определить с помощью разложения в ряд Тейлора в точке нуля [122]:

$$J_\alpha(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m! \Gamma(m + \alpha + 1)} \cdot \left(\frac{x}{2}\right)^{2m + \alpha}. \quad (2.66)$$

Далее рассмотрен случай для  $\alpha=0$ .

Учитывая, что  $\Gamma(z)$  – гамма-функция Эйлера:

$$\Gamma(m + 1) = m!. \quad (2.67)$$

Функция Бесселя нулевого порядка принимает следующий вид:

$$I_0(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(m!)^2} \cdot \left(\frac{x^{2m}}{2}\right). \quad (2.68)$$

Из сходимости степенного ряда, функцию Бесселя с точностью  $10^{-8}$  представим в виде следующего приближения:

$$I_0(x) = \sum_{m=0}^6 \frac{(-1)^m}{(m!)^2} \cdot \left( \frac{x^{2m}}{2} \right). \quad (2.69)$$

Тогда, функции плотностей распределения признаков  $x$  и  $y$ , для устройств обнаружения и распознавания примут вид:

$$f_1(x) = \frac{x}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{(x^2+\nu^2)}{2\sigma^2}} \cdot I_0\left(\frac{x\nu}{\sigma^2}\right); \quad f_2(x) = \frac{(x-a)}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{(x-a)^2+\nu^2}{2\sigma^2}} \cdot I_0\left(\frac{(x-a)\nu}{\sigma^2}\right); \quad (2.70)$$

$$f_1(y) = \frac{y}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{(y^2+\nu^2)}{2\sigma^2}} \cdot I_0\left(\frac{y\nu}{\sigma^2}\right); \quad f_1(y) = \frac{(y-b)}{\sigma^2} \cdot e^{-\frac{(y-b)^2+\nu^2}{2\sigma^2}} \cdot I_0\left(\frac{(y-b)\nu}{\sigma^2}\right). \quad (2.71)$$

Необходимо найти оптимальные пороги классификации  $x_0$  и  $y_0$ .

С учетом формул (2.70) и (2.71), формулы (2.32) и (2.33) принимают вид:

$$P_{л.м.} = p_1 \int_{x_0}^{\infty} f_1(x) dx \int_{y_0}^{\infty} f_1(y) dy = C = const; \quad (2.72)$$

$$P_{np}^{\min} = \min p_2 (1 - \int_{x_0}^{\infty} f_2(x) dx \int_{y_0}^{\infty} f_2(y) dy). \quad (2.73)$$

Так как в выражении (2.72) пороги  $x_0$  и  $y_0$  связаны одной функциональной зависимостью  $x_0 = \varphi(y_0)$ , продифференцировав (2.73) по  $y_0$  и приравняв его нулю, получим

$$\frac{dx_0}{dy_0} \cdot f_2(x_0) \cdot \int_{y_0}^{\infty} f_2(y) dy + f_2(y_0) \cdot \int_{x_0}^{\infty} f_2(x) dx = 0. \quad (2.74)$$

После подстановки  $I_0$ , закон распределения Райса принимает вид:

$$f(x|\nu, \sigma) = \sum_{m=0}^6 \frac{(-1)^m}{(m!)^2} \cdot \frac{1}{\sigma^2} \cdot \left( \frac{\nu}{2\sigma^2} \right)^{2m} \cdot x \cdot e^{-\frac{(x^2+\nu^2)}{2\sigma^2}} \cdot x^{2m}. \quad (2.75)$$

Рассмотрим следующие два интеграла, для любого  $t > 0$ :

$$B_{m1}(t|\nu, \sigma) = \int_t^{\infty} f_1(x|\nu, \sigma) dx, \quad (2.76)$$

$$B_{m2}(t-b|\nu, \sigma) = \int_t^{\infty} f_2(x-b|\nu, \sigma) dx. \quad (2.77)$$



Для вычисления этих интегралов введем обозначения:

$$\int_a^{\infty} \phi_m(x | \nu, \sigma) dx, \quad (2.78)$$

где  $\phi_m(x | \nu, \sigma) = x \cdot e^{-\frac{(x^2 + \nu^2)}{2\sigma^2}} \cdot x^{2m}$ .

И произведем вычисление несобственного интеграла (2.78), который входит в состав закона распределения Райса. Проведя преобразования, можно сформулировать результат в виде равенства:

$$\int_a^{\infty} x \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + \nu^2}{2\sigma^2}\right) \cdot x^{2m} dx = (2\sigma^2)^{m+1} \int_{\frac{a}{2\sigma^2}}^{\infty} \exp(-z) \cdot z^m \cdot dz. \quad (2.79)$$

На основе этого, для представления в окончательной форме закона Райса, вычислим интеграл следующего типа ( $m=0,1,2,\dots,6$ ):

$$\int_{\beta}^{\infty} \exp(-z) \cdot z^m \cdot dz. \quad (2.80)$$

Введем обозначение:

$$B_m(\beta) = \int_{\beta}^{\infty} e^{-z} \cdot z^m dz. \quad (2.81)$$

Установим рекуррентную формулу для вычисления интеграла (2.81).

Справедливо равенство ( $m=0,1,2,\dots,6$ ):

$$B_m(\beta) = -\left(z^m \cdot e^{-z}\right)\Big|_{\beta}^{\infty} + m \cdot B_{m-1}(\beta), \quad (2.82)$$

где

$$B_0(\beta) = \int_{\beta}^{\infty} e^{-z} dz = -e^{-z}\Big|_{\beta}^{\infty} = e^{-\beta}. \quad (2.83).$$

Последовательно находим  $B_1(\beta)$  на основании (2.82) и (2.83):

$$B_1(\beta) = e^{-\beta} \cdot (\beta + 1),$$

$$B_2(\beta) = e^{-\beta} \cdot (\beta^2 + 2\beta + 1),$$

$$B_3(\beta) = e^{-\beta} \cdot (\beta^3 + 3\beta^2 + 6\beta + 3),$$

$$B_4(\beta) = e^{-\beta} \cdot (\beta^4 + 4\beta^3 + 12\beta^2 + 24\beta + 12), \quad (2.84)$$

$$B_5(\beta) = e^{-\beta} \cdot (\beta^5 + 5\beta^4 + 20\beta^3 + 60\beta^2 + 120\beta + 60),$$

$$B_6(\beta) = e^{-\beta} \cdot (\beta^6 + 6\beta^5 + 30\beta^4 + 120\beta^3 + 360\beta^2 + 720\beta + 360).$$

Для заданной точности, закон распределения Райса примет следующий вид:

$$f(x | \nu, \sigma) = \sum_{m=0}^6 \frac{(-1)^m}{(m!)^2} \cdot \frac{1}{\sigma^2} \cdot \left( \frac{\nu}{2\sigma^2} \right)^{2m} \cdot x \cdot e^{-\frac{(x^2 + \nu^2)}{2\sigma^2}} \cdot x^{2m}. \quad (2.85)$$

Тогда, базовая оптимизационная система уравнений в рассматриваемом случае принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} B(x_0 | \nu, \sigma) \cdot B(y_0 | \nu, \sigma) = \frac{C}{P_1} \\ \frac{dx}{dy} \cdot f_2(x_0) \cdot \int_{y_0}^{\infty} f_2(y) dy + f_2(y_0) \cdot \int_{x_0}^{\infty} f_2(x) dx = 0 \end{array} \right. \quad (2.86)$$

Здесь, согласно обозначению, имеем:

$$\int_{y_0}^{\infty} f_2(y) dy = \int_{y_0}^{\infty} f_1(y - b) dy. \quad (2.87)$$

Проведя замену переменной, можно представить (2.87) в виде:

$$\int_{y_0}^{\infty} f_2(y) dy = \int_{y_0 - b}^{\infty} f_1(t) dt = B(y_0 - b | \nu, \sigma). \quad (2.88)$$

$$\int_{x_0}^{\infty} f_2(x) dx = \int_{x_0 - a}^{\infty} f_1(t) dt = B(x_0 - a | \nu, \sigma). \quad (2.88)$$

Таким образом получаем следующие соотношения для любого  $t > 0$ :

$$\int_t^{\infty} f_1(x | \nu, \sigma) dx = B(t | \nu, \sigma), \quad (2.89)$$

$$\int_t^{\infty} f_2(x - b | \nu, \sigma) dx = B(t - b | \nu, \sigma). \quad (2.90)$$

Исходя из последних двух формул (2.89, 2.90), основная система преобразуется к виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} B(x_0 | \nu, \sigma) \cdot B(y_0 | \nu, \sigma) = \frac{C}{P_1} \\ \frac{dx_0}{dy_0} \cdot f_1(x_0 - a | \nu, \sigma) \cdot B(y_0 - b | \nu, \sigma) + f_1(y_0 - b | \nu, \sigma) \cdot B(x_0 - a | \nu, \sigma) = 0 \end{array} \right. \quad (2.91)$$

Для нахождения  $\frac{dx_0}{dy_0}$  дифференцируя по  $y_0$  первое уравнение, и учитывая второе уравнения, получаем:

$$(B(x_0 | \nu, \sigma) \cdot B(y_0 | \nu, \sigma))_{y_0} = \frac{C}{P_1} = 0 \quad (2.92)$$

$$(B(x_0 | \nu, \sigma)_{y_0} \cdot B(y_0 | \nu, \sigma)) + (B(y_0 | \nu, \sigma)_{y_0} \cdot B(x_0 | \nu, \sigma)) = 0 \quad (2.93)$$

Применяя правило дифференцирования сложных функций, получаем :

$$(B_m(x_0 | \nu, \sigma)'_{x_0} \cdot (x_0)'_y \cdot B_m(y_0 | \nu, \sigma)) + B_m(x_0 | \nu, \sigma) \cdot (-f_1(x_0) \nu, \sigma) = 0, \quad (2.94)$$

$$-f_1(x_0 | \nu, \sigma) \frac{d_{x_0}}{d_{y_0}} \cdot B_m(y_0 | \nu, \sigma) + B_m(y_0 | \nu, \sigma) - f_1(y_0 | \nu, \sigma) \cdot B_m(x_0 | \nu, \sigma) = 0. \quad (2.95)$$

Из равенства (2.95) находим:

$$\frac{dx_0}{dy_0} = -\frac{f_1(y_0 | \nu, \sigma) \cdot B(x_0 | \nu, \sigma)}{f_1(x_0 | \nu, \sigma) \cdot B(y_0 | \nu, \sigma)} \quad (2.96)$$

Подставляя (2.96) в систему уравнений (2.86) и проведя некоторые преобразования, итоговая система уравнений примет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} B(x_0 | \nu, \sigma) \cdot B(y_0 | \nu, \sigma) = \frac{C}{P_1} \\ f_1(x_0) \cdot f_1(x_0 - a) B(x_0 | \nu, \sigma) \cdot B(x_0 - a | \nu, \sigma) - \\ - f_1(y_0) f_1(y_0 - B) \cdot B(y_0 | \nu, \sigma) \cdot B(y_0 - B | \nu, \sigma) = 0 \end{array} \right. , \quad (2.97)$$

где

$$f_1(x) = \frac{1}{\sigma^2} \cdot x \cdot \exp \left\{ -\frac{x^2 + \nu^2}{2\sigma^2} \right\} \sum_{m=0}^6 \frac{(-1)^m}{(m!)^2} \cdot \left( \frac{\nu}{2\sigma^2} \right)^{2m} \cdot x^{2m} , \quad (2.98)$$

$$B(x_0 | \nu, \sigma) = \exp \left\{ -\frac{\nu^2}{2\sigma^2} \right\} * \sum_{m=0}^6 \frac{(-1)^{m2m}}{(m!)^2} B_m \left( \frac{x^2}{2\sigma^2} \right) , \quad (2.99)$$

$$\begin{aligned}
B_0(x) &= e^{-x}, \\
B_1(x) &= e^{-x} \cdot (x+1), \\
B_2(x) &= e^{-x} \cdot (x^2 + 2x + 1), \\
B_3(x) &= e^{-x} \cdot (x^3 + 3x^2 + 6x + 3), \\
B_4(x) &= e^{-x} \cdot (x^4 + 4x^3 + 12x^2 + 24x + 12), \\
B_5(x) &= e^{-x} \cdot (x^5 + 5x^4 + 20x^3 + 60x^2 + 120x + 60), \\
B_6(x) &= e^{-x} \cdot (x^6 + 6x^5 + 30x^4 + 120x^3 + 360x^2 + 720x + 360).
\end{aligned} \tag{2.100}$$

Таким образом, на основании (2.97), получено решение задачи оптимизации порогов классификации трассы распространения СРНС в случае, когда состояние канала связи описывается законом распределения Райса. На основании полученного решения разработана имитационная модель представленная в приложении Е.

#### 2.4.6. Методика оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС для закона Накагами

Введем обозначение:

$$C(a) = \int_a^{\infty} f(x, \mu, \omega) dx = \int_a^{\infty} \frac{2\mu^\mu}{\Gamma(\mu)\omega^\mu} \cdot \exp\left(-\frac{\mu}{\omega} \cdot x^2\right) dx, \tag{2.101}$$

где  $\omega > 0, \mu \geq \frac{1}{2}$ ,  $\Gamma(\mu)$  – гамма-функция [123-129].

Из (2.101) получим:

$$C^*(a; \mu, \omega) = \int_a^{\infty} x^{2\mu-1} \cdot \exp\left(-\frac{\mu}{\omega} \cdot x^2\right) dx. \tag{2.102}$$

Тогда, для  $x_0$  и  $y_0$  :

$$\begin{aligned} f_1(x) &= f(x, \mu, \omega); & f_2(x) &= f(x - a, \mu, \omega); \\ f_1(y) &= f(y, \mu, \omega); & f_2(y) &= f(y - b, \mu, \omega). \end{aligned} \quad (2.103)$$

Определим  $\varphi(x)$  :

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \int_x^{\infty} f_2(t) dt = \int_x^{\infty} f(t - b, \mu, \omega) dt \rightarrow \int_x^{\infty} f(t - b, \mu, \omega) dt = \\ &= \int_{x-b}^{\infty} f(z, \mu, \omega) dz = \varphi(x - b). \end{aligned} \quad (2.104)$$

Введем обозначение:

$$H_1(x_0) = \int_{x_0}^{\infty} f_1(x) dx; \quad H_2(y_0) = \int_{y_0}^{\infty} f_1(y) dy. \quad (2.105)$$

Тогда получим:

$$\int_{x_0}^{\infty} f_2(x) dx = \int_{x_0-a}^{\infty} f_1(x - a) dx = \int_{x_0-a}^{\infty} f_1(t) dt = H_1(x_0 - a). \quad (2.106)$$

Аналогично для признаков  $y$ :

$$\int_{y_0}^{\infty} f_1(y) dy = H_2(y_0); \quad \int_{y_0}^{\infty} f_2(y) dy = H_1(y_0 - b). \quad (2.107)$$

Исходя из этого, основная система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} H(x_0) \cdot H(y_0) = \frac{C}{p_1} \\ \frac{dx_0}{dy_0} \cdot f(x_0 - a; \mu, \omega) \cdot H(y_0 - b) + f(y_0 - b; \mu, \omega) \cdot H(x_0 - a) = 0 \end{cases} \quad (2.108)$$

Продифференцировав 1 уравнение из системы (2.108), получим:

$$\begin{aligned} (H(x_0) \cdot H(y_0))'_{y_0} &= \left(\frac{C}{p_1}\right)' \rightarrow (H(x_0) \cdot H(y_0))'_{y_0} = 0 \rightarrow \\ &\rightarrow (H(x_0))'_{y_0} \cdot H(y_0) + H(x_0) \cdot (H(y_0))'_{y_0} = 0. \end{aligned} \quad (2.109)$$

Тогда:

$$(H(x_0))'_{x_0} \cdot (x_0)'_{y_0} \cdot H(y_0) + H(x_0) \cdot (H(y_0))'_{y_0} = 0. \quad (2.110)$$

Из (2.110) найдем  $\frac{dx_0}{dy_0}$  :

$$\frac{dx_0}{dy_0} = (x_0)'_{y_0} = -\frac{H(x_0) \cdot (H(y_0))'_{y_0}}{H(y_0) \cdot (H(x_0))'_{x_0}}. \quad (2.111)$$

При этом,  $(H(x_0))'_{x_0}$  :

$$(H(x_0))'_{x_0} = -f(x: \mu, \omega) \rightarrow (H(x_0))'_{x_0} = (1 - \int_0^x f(t: \mu, \omega))'_{x_0} \quad (2.112)$$

На основании  $(H(x_0))'_{x_0}$ , получаем для (2.111):

$$\frac{dx_0}{dy_0} = -\frac{H(x_0) \cdot (-f(y_0: \mu, \omega))}{H(y_0) \cdot (-f(x_0: \mu, \omega))} \quad (2.113)$$

Подставив (2.113) в (2.108) и проведя преобразование 2 уравнения, получим итоговый вид системы уравнений:

$$\begin{cases} H(x_0) \cdot H(y_0) - \frac{C}{P_1} = F_1 = 0 \\ f(y_0) \cdot f(x_0 - a) \cdot H(x_0) \cdot H(y_0 - b) - \\ -f(x_0) \cdot f(y_0 - b) \cdot H(y_0) \cdot H(x_0 - a) = F_2 = 0 \end{cases} \quad (2.114)$$

где  $f(x: \mu, \omega) = \frac{2 \cdot \mu^\mu}{\Gamma(\mu) \cdot \omega^\mu} \cdot x^{2\mu-1} \cdot \exp(-\frac{\mu}{\omega} \cdot x^2)$ ,  $\omega > 0$ ,  $\mu \geq \frac{1}{2}$ .

Таким образом, на основании (2.114), получено решение задачи оптимизации порогов классификации трассы распространения СРНС в случае, когда состояние канала связи описывается законом распределения Накагами. На основании полученного решения разработана имитационная модель представленная в приложении Ж.

## **2.5. Разработка способа управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС**

### **2.5.1. Постановка частной задачи на исследование**

Требуется разработать способ управления БЛА в режиме автономного полета, обеспечивающий:

- своевременную идентификацию помехового воздействия на приемник БЛА;
- осуществление коррекции БИНС с использованием сигналов СНС при нормальном состоянии НП;
- осуществление коррекции канала высоты и вертикальной скорости от барометрического высотомера, а также выполнять коррекцию направления на север при помощи магнитометра ;
- учитывать временные ограничения, обусловленные накоплением погрешности координат местоопределения БИНС;
- производить контроль заряда батареи и скорости ветра.

Входными данными являются:

1) Переменная состояния НП *GNSS\_status*, определяемая по навигационным параметрам приемника СНС с помощью способа по оценке состояния НП и идентификация видов помехового воздействия.

2) Переменная состояния радиоканала дистанционного управления (РКДУ) *RCC\_status*, с помощью которой осуществляется оценка работоспособности РКДУ. Она принимает два значения: 0 при невозможности использовать радиоканал для дистанционного управления БЛА; 1 при нахождении радиоканала

в рабочем состоянии, обеспечивающем возможность дистанционного управления БЛА.

3) Переменная заряда батареи *Bat\_charge*, поступает из контроллера заряда батареи, с ее помощью производится оценка уровня заряда (напряжения) аккумуляторной батареи.

4) Переменная величины воздушной скорости *Air\_speed* поступает из датчика скорости, которая определяется как величина скорости набегающего потока:

$$Air\_speed = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\xi \cdot \rho}}, \quad (2.115)$$

где  $\Delta P$  – разница полного и статического давлений, измеряемая датчиком скорости;  $\rho$  - плотность воздуха;  $\xi$  - коэффициент преобразования датчика.

5) Переменная величины путевой скорости *Ground\_speed* определяется по показаниям инерциальной навигационной системы (ИНС) как скорость перемещения объекта относительно земной поверхности путем деления пройденного пути на единицу времени (1 секунду).

6) Постоянная величина максимально допустимой скорости ветра *Max\_wind\_speed*, при которой обеспечивается безопасность полета БЛА.

В качестве ограничений, будем читать, что для БЛА доступны следующие типовые маневры:

- 1) Автоматический взлет и посадка.
- 2) Удержание заданного значения высоты (набор, снижение).
- 3) Удержание заданной позиции (зависание).
- 4) Автоматический полет по точкам по заранее заданному и заложенному в память вычислителя и автопилота маршруту.
- 5) Возврат на точку старта, когда БЛА независимо от его текущего положения автоматически возвращается на точку взлета и переходит в режим удержания позиции.



б) «Аварийная посадка», при которой устанавливаются углы крена и тангажа равные нулю и выполняют снижение для посадки.

### **2.5.2. Способ управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС**

Для осуществления выработки логики БЛА в зависимости от состояния НП определены их соответствия (таблица 2.4).

Также, необходимо определить значения следующих параметров:

- максимально допустимое время автономного полета  $t_{\max.\text{avt}}$ , за которое погрешность координат, определенных БИНС, достигнет предельно допустимой величины  $\Delta\sigma_k$ ;
- расстояние *Flight\_range*, которое может пролететь БЛА на оставшемся заряде батареи;
- скорость ветра *Wind\_speed*.

Параметры, характеризующие расстояние и время полета до точек назначения (*Dist\_NP*, *Time\_NP*), указанных в полетном задании и до точек посадки (*Dist\_LP*, *Time\_LP*) вычисляются автоматически, системой управления современных БЛА.

Время автономного полета, при котором погрешность координат достигнет заданной  $\Delta\sigma_k$ , определяют из уравнения, составленного на основе формулы для экспресс-оценки погрешностей (раздел 1.1), из которой следует, что максимальное время автономного полета равно

$$t_{\max.\text{avt}} \leq 5 \sqrt{\frac{2500 \cdot T_c^{\Delta\omega} \cdot (\Delta\sigma_k)^2}{g^2 \cdot \left(6\sqrt{5} \cdot \sigma_{BI}^{\Delta\omega} + ARW \sqrt{126 \cdot T_c^{\Delta\omega}}\right)^2}}. \quad (2.116)$$

Таблица 2.4 – Логика поведения БЛА в зависимости от состояния НП

Статус и характеристика состояния НП		Логика поведение БЛА
<i>GNSS_status</i>	Характеристика поля	
<i>GNSS_status</i> = 1	нормальное (неискаженное) состояние НП	БИНС в режиме коррекции от СНС ( <i>SINS_corr_SNS</i> = 1), полет по маршруту в автономном режиме
<i>GNSS_status</i> = 2	допустимо искаженное состояние НП	БИНС в режиме коррекции от СНС ( <i>SINS_corr_SNS</i> = 1), полет по маршруту или в точку посадки в автономном режиме
<i>GNSS_status</i> = 3	энергетическое подавление НП	БИНС автономна ( <i>SINS_corr_SNS</i> = 0), полет по маршруту или в точку посадки в автономном режиме
<i>GNSS_status</i> = 4	Активное навязывание ложного местоположение приемнику СРНС	БИНС автономна ( <i>SINS_corr_SNS</i> = 0), полет по маршруту или в точку посадки в автономном режиме

Таким образом, если  $t_{\max.\text{avt}} \leq t_{\text{зад}}$ , то автономный полет под управлением только БИНС возможен, при этом ошибки координат местоопределения БЛА не будут превышать максимально допустимой погрешности  $\Delta\sigma_k$ . В противном случае, целесообразно осуществить полет в точку посадки. В случае невозможности полета в точку посадки, БЛА должен безопасно произвести вынужденную посадку.

*Wind\_speed* находится из навигационного треугольника скоростей с помощью выражения:

$$Wind\_speed = \frac{Ground\_speed - Air\_speed \cdot \cos(Drift\_angle)}{\cos(Wind\_angle)}, \quad (2.117)$$

где *Ground\_speed* и *Drift\_angle* – соответственно путевая скорость и угол сноса, определяемые с помощью ИНС; *Air\_speed* – воздушная скорость, определяемая с помощью датчика скорости; *Wind\_angle* – угол ветра, определяемый из метеорологического ветра по данным метеосводок.

Реализованная в БЛА процедура управления поддерживает выполнение следующих типовых маневров:

- 1) Автоматический взлет и посадка.
- 2) Удержание заданного значения высоты (набор, снижение).
- 3) Удержание заданной позиции (зависание).
- 4) Автоматический полет по точкам по заранее заданному и заложенному в память вычислителя и автопилота маршруту.
- 5) Возврат на точку старта, когда БЛА независимо от его текущего положения автоматически возвращается на точку взлета и переходит в режим удержания позиции.
- 6) «Аварийная посадка», при которой устанавливаются углы крена и тангажа равные нулю и выполняются снижение для посадки.

На основании данных маневров, способ управления БЛА в автономном режиме представляет из себя следующую последовательность действий, когда переменная *GNSS\_status* равна 1 или 2:

- осуществляется коррекция БИНС от навигационных данных приемника СНС;
- производится расчет расстояния *Dist\_NP* и времени полета *Time\_NP* до навигационной точки назначения;
- обеспечивается выполнение маневра «Полет в точку с заданными координатами»;

– Если  $GNSS\_status=2$ , осуществляется процедура идентификации состояния спутникового канала связи с последующей оптимизацией порогов классификации, на основании разработанных имитационных моделей.

В данном режиме полета БЛА автоматически следует по заранее заданному и записанному в память вычислителя маршруту по командам автопилота. При приближении к контрольной точке с заданными координатами на заранее заданное расстояние, которое называется радиус контрольной точки, производят установку следующей точки маршрута.

Для случая, когда НП оказывается в состоянии энергетического подавления или изменяется под воздействием активного навязывания ложного местоположение приемнику СРНС, (переменная  $GNSS\_status$  равна 3 или 4), выполняют следующие действия:

– осуществляется зависание (удержания позиции) на месте, для того, чтобы убедиться в достоверности результатов оценки состояния НП с требуемой доверительной вероятностью 0,95;

– осуществляется переход на БИНС, с отключением коррекции по СНС;

– производится коррекция вертикального канала БИНС от барометрического высотомера;

– запускается таймер автономной работы БИНС, для контроля  $T_{avt}$  (19);

– осуществляется маневр «Полет в точку с заданными координатами»;

– производится расчет расстояния и время полета до точек назначения ( $Dist\_NP$ ,  $Time\_NP$ ) и посадки полетного задания ( $Dist\_LP$ ,  $Time\_LP$ ), и прогнозируемого максимально допустимого времени автономного полета  $t_{max.avt}$ , за которое погрешность координаты БИНС достигнет предельного значения и будет менее 500 м;

– если время до заданной точки назначения полетного задания  $Time\_NP$  меньше максимально допустимого времени автономного полета  $t_{max.avt}$ , то движение БЛА продолжается в точку с заданными координатами в автономном режиме;

- иначе, прерывается полетное задание с осуществлением «Полет в точку посадки»;
- если время до точки посадки  $Time_{LP}$  меньше максимально допустимого времени автономного полета  $t_{\max.avt}$ , то выполняют полет и посадку, в указанную в полетном задании точку;
- иначе, осуществляется процедура «Вынужденная посадка»;
- в процессе движения БЛА в автономном режиме, в том числе при совершении типовых маневров «Полет в точку посадки» и «Вынужденная посадка», периодически проверяется состояние РКДУ;
- если связь по каналу РКДУ присутствует, то осуществляется переход на ручное управление БЛА.

Порядок выполнения процедуры управления в режиме, когда НП восстанавливается до приемлемого состояния:

- если состояние НП улучшается, как минимум до допустимого искаженного состояния, то осуществляется зависание (удержания позиции) на месте и проверка достоверности оценки состояния НП с требуемой доверительной вероятностью 0,95;
- производят отключение коррекции вертикального канала БИНС от барометрического высотомера, и осуществляют коррекцию по навигационным данным приемника СНС;
- сбрасывается таймер автономной работы БИНС;
- рассчитывается расстояния  $Dist_{NP}$  и времени полета  $Time_{NP}$  до навигационной точки назначения и осуществляют маневр «Полет в точку с заданными координатами».

Для обеспечения безопасности полета БЛА:

- периодически считывается текущее значение напряжения аккумуляторной батареи и рассчитывается расстояние  $Flight_{range}$ , которое может пролететь БЛА на оставшемся заряде;

- осуществляется постоянный контроль заряда аккумуляторной батареи *Bat\_charge*;
- определяется воздушная скорость полета *Air\_speed*, путевая скорость *Ground\_speed*, и вычисляется скорость ветра *Wind\_speed*;
- при  $Bat\_charge \leq Limit$ , или  $Wind\_speed > Max\_Wind\_speed$ , выполняется аварийная посадка;
- если связь по каналу РКУД присутствует, то по нему осуществляется передача текущих координат БЛА и переход на ручное управление.
- иначе, если  $Bat\_charge > Limit$  или  $Wind\_speed < Max\_Wind\_speed$ , производится дальнейшее осуществление полетного задания.

Таким образом, разработан способ управления БЛА в автономном режиме, осуществляющий: своевременную идентификацию помехового воздействия на приемник БЛА, коррекцию БИНС с использованием сигналов СНС при нормальном состоянии НП; контроль заряда батареи и скорости ветра. Выполняемые процедуры осуществляются с учетом временных ограничений, обусловленных накоплением погрешности координат местоопределения БИНС. На основании способа разработан алгоритм управления БЛА в автономном режиме полета, представленный в приложении И.

## ВЫВОДЫ

Раздел посвящен решению первых четырех частных научных задач. Проведена разработка способов и методов, направленных на повышение точности позиционирования БЛА, а именно:

1. Произведена постановка **первой частной задачи исследований**. Решение представлено в разделе 2.2. Для определения факта искажения НП использован подход, суть которого заключается в полиномиальной аппроксимации некоторого массива из  $N$  достоверных измерений  $R = (R_1, R_2, \dots, R_j, \dots, R_N)$  в виде оценок местоопределения (МО) БЛА на интервале времени  $t \in [t_o, t_a]$  с шагом  $\tau$ , равным периоду поступления навигационных параметров. Для вероятностной оценки состояния НП, при использовании совокупности признаков по полученной выборке МО, использован Байесовский подход. Получена достоверная апостериорная вероятность с использованием способа максимизации апостериорной плотности. Определено решающее правило по критерию минимизации СКП, на основании которого определены неравенства для обнаружения факта искажения и идентификации видов помехового воздействия. Описана процедура идентификации активной подмены координат СРНС.

Произведена постановка и решение **второй частной задачи исследований**, представленной в разделе 2.3. С целью выбора оптимального критерия, проведено сравнение критериев согласия с использованием эталонных распределений Релея, Райса, Накагами и нормального распределения на одинаковых выборках. Лучшим критерием является критерий Колмогорова-Смирнова, имеющий точность идентификации более 95% при меньшем времени вычислений. Выделение огибающей сигнала осуществлялось с использованием эмпирической модовой декомпозиции сигнала. Разработана методика идентификации состояний трассы распространения СРНС.

Произведена постановка **третьей частной задачи исследований**, посвященная оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС. Решение третьей частной задачи представлено в разделе 2.4. В качестве решающего правила, обеспечивающего наивысшую точность системы идентификации, использован критерий Неймана-Пирсона. Показано, что оптимизация порогов классификации  $(x_0, y_0)$  сводится к решению общей системы уравнений. На основании общей системы уравнений, получена система

уравнений, для случаев, когда состояние канала связи описывается нормальным законом распределения, распределением Райса и Накагами.

Произведена постановка и решение **четвертой частной задачи** исследований, представленной в разделе 2.5. Разработан способ управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС. Время автономного полета, при котором погрешность координат достигнет заданной  $\Delta\sigma_k$ , определяют из уравнения, составленного на основе формулы экспресс-оценки погрешностей. На основании реализованной в БЛА процедуры управления и поддерживаемых типовых маневров, с использованием способа определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, разработан способ управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС. При обнаружении факта искажения навигационного поля, осуществляется процедура идентификации состояний спутниковых каналов связи. На основании полученных результатов производится оптимизация порогов классификации состояний спутниковых каналов связи.

Полученные в данном разделе результаты, обладают следующими отличительными признаками новизны.

1. Способ определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, отличающийся от известных тем, что в нем использована новая совокупность выполняемых в определенной последовательности действий, с соблюдением введенных правил принятия решений, а именно:

для определения факта искажения НП использована полиномиальная аппроксимация массива измерений местоопределения (МО) БЛА с дискретностью, равной периоду поступления навигационных параметров;

для вероятностной оценки состояния НП, с использованием совокупности признаков по полученной выборке МО, использован Байесовский подход;

определяется доверительная апостериорная вероятность оценки состояния НП с использованием способа максимизации апостериорной плотности;



для обнаружения факта искажения и идентификации видов помехового воздействия определено решающее правило использующее критерий минимизации СКП.

2. Для идентификации состояний трассы распространения СРНС, разработана методика, отличающаяся от известных тем, что впервые для решения подобной задачи использован метод модовой декомпозиции и введено сравнение по выбранному критерию согласия текущего состояния трассы распространения СРНС с эталонными распределениями Релея, Райса, Накагами и нормального распределения.

3. Впервые разработан метод оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС, для законов распределения Райса, Накагами и нормального закона распределения. Получены численные решение оптимальных порогов классификации с точностью не хуже 0,01. Использование данного метода позволило обеспечить выбор оптимальных порогов классификации при обнаружении сигнала на фоне шума и минимизировать вероятности возникновения ошибок первого и второго рода.

4. С целью обеспечения безопасности полета и возможности выполнения полетного задания в условиях искажения/подавления НП, разработан способ автоматического управления БЛА при отсутствии командного радиоканала дистанционного управления, отличающийся от известных тем, что введены новые, выполняемые в определенной последовательности операции:

определение время автономного полета, при котором погрешность координат достигнет заданного значения;

на основании результатов выполнения способа определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, осуществляется совокупность типовых маневров управления БЛА, обеспечивающая возможность выполнения полетного задания;

при обнаружении ионосферных искажений осуществляется процедура идентификации состояний трассы распространения сигналов СРНС, основанная на разработанной методике;

на основании результатов методики идентификации состояний трассы распространения СРНС, осуществляется оптимизация порогов классификации состояний трассы распространения СРНС.

Материалы и результаты данного раздела диссертации были предварительно опубликованы в статьях [1-5], опубликованных в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований по специальности 05.13.01, в статьях [5-7] в рецензируемом издании, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований по группе специальностей 05.13.00. В работах [1-14] материалы данного раздела были использованы для обоснования направлений исследований. Полученные решения использовались при разработке программ для ЭВМ [16-22] и формировании патента на полезную модель [15]. Отдельные результаты обсуждались в рамках конференций и были опубликованы в соответствующих сборниках [23-30]

### **3. МОДЕЛИ, АЛГОРИТМ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ БЛА**

#### **3.1. Разработка практических рекомендаций по формированию устройства определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС и алгоритма его функционирования**

С целью идентификации состояния и определения факта искажения НП на борту БЛА, для удовлетворения требуемых характеристик и показателей точности, разработана полезная модель устройства определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС [15], позволяющая достоверно определять факт искажения НП и идентифицировать его состояние с использованием типовых классов.

В состав устройства входят: Буферная память координат (блок 2) , буферная память дополнительных параметров (блок 3), блок расчета коэффициентов аппроксимации (блок 4), блок расчета погрешности (блок 5), статистической оценки (блок 9), блок рекуррентной фильтрации аномалий (блок 10) и расчета доверительной вероятности (блок 11), блок расчета пороговых значений (блок 12), блок расчета коэффициентов аппроксимации (блок 4), регистр состояния навигационного поля (блок 7), решающие устройства (блок 6, 13, 14). Данная имитационная модель выполняет прием и обработку навигационной информации, поступающей из приемника ГНСС, по уравнению (2.9) осуществляет обнаружение факта искажения НП (блок 6). В случае обнаружения искажения, осуществляется идентификация типовых видов помехового воздействия на НП, путем проверки формулы (2.15) за исключением активного навязывания ложного

местоположение приемнику СРНС (блок 13). Идентификация активного навязывания ложного местоположение приемнику СРНС осуществляется в блоке 14, путем проверки формулы (2.16).

На основе общей структурной схемы устройства определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, представленной на рисунке 3.1, разработана имитационная модель в среде MathLab, ввиду этого блоки 2 и 3 реализованы в одном блоке 1, а блок 10 реализован в составе блока 11.

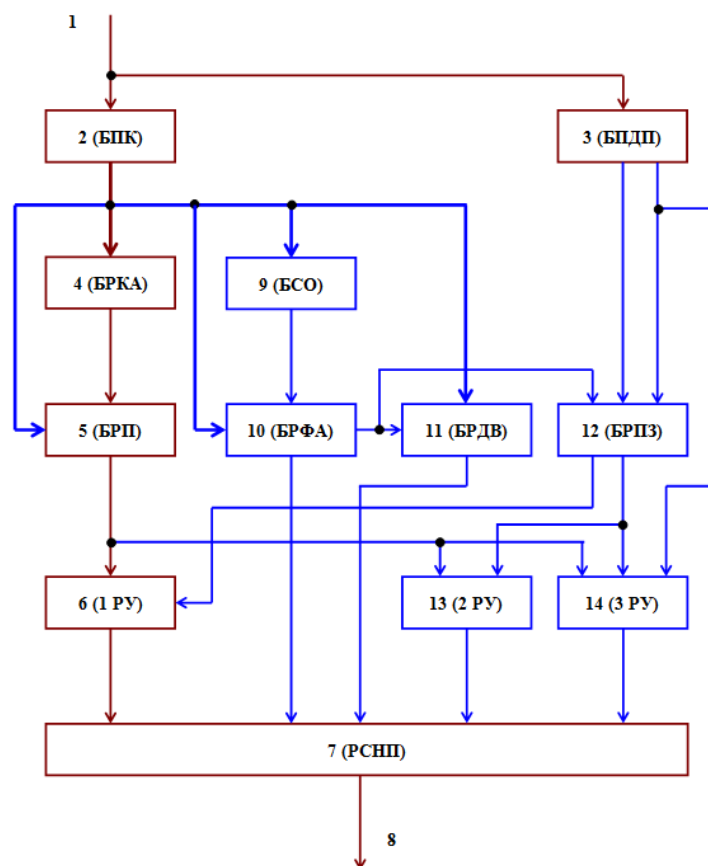


Рисунок 3.1 – Общая структурная схема устройства определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия

В общем виде, имитационная модель устройства определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС представлена на рисунке 3.2. Пример входных данных представлен на рисунке 3.3, где Index – номер входного пакета, SV C/N0 – отношение сигнал/шум, GPStime – время навигационного

приемника, UTC – текущее время ( $\delta t$  вычисляется по параметрам GPStime и UTC). Выходными параметрами имитационной модели являются: сигнал достоверности  $S_d$  (Поле «Достоверность»), сигнал наличия аномалии ГНСС  $S_a$  (поле «Искажение»), сигнал искажения ГНСС  $S_{II}$ , кода, идентифицирующего класс помехового воздействия  $S_k$  (поле «Класс»), и сигнал о наличии активного навязывания ложного местоположение приемнику СРНС  $S_{sp}$  (поле «Спуфинг»).

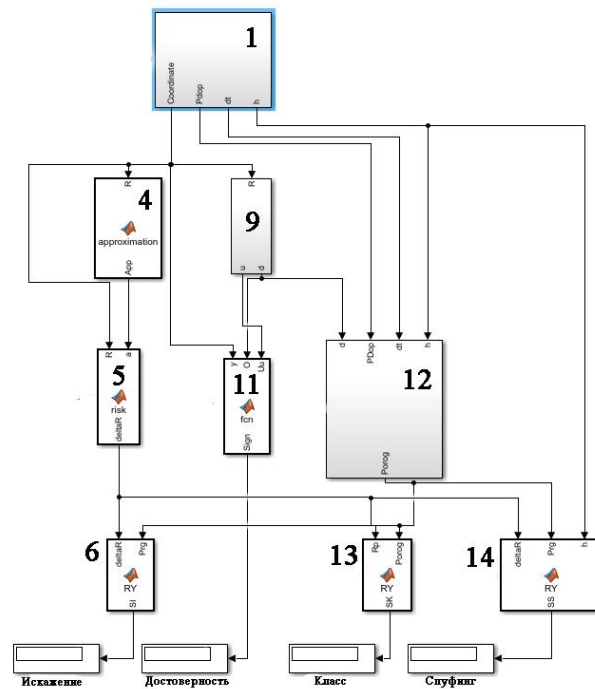


Рисунок 3.2 – Имитационная модель, разработанная в среде MatLab

С целью проверки адекватности работы имитационной модели проведена проверка соответствия ручной обработки GPS-трека и обработки этих данных имитационной моделью. Для проверки работы использовался трек GPS/ГЛОНАСС записанный приемником БЛА легкого класса «Альбатрос П2» и- blox 8. Ручная обработка производилась с помощью программы u-center.

Index	PDOP	SV C/N0	GPS time	UTC
1427	100.0		2032:389...	12:08:11....
1428	100.0		2032:389...	12:08:11....
1429	100.0		2032:389...	12:08:11....
1430	100.0		2032:389...	12:08:11....
1431	100.0		2032:389...	12:08:11....
1432	100.0		2032:389...	12:08:12....
1433	100.0		2032:389...	12:08:12....
1434	100.0		2032:389...	12:08:12....
1435	100.0		2032:389...	12:08:12....
1436	100.0		2032:389...	12:08:12....
1437	100.0		2032:389...	12:08:13....
1438	100.0		2032:389...	12:08:13....
1439	100.0		2032:389...	12:08:13....
1440	100.0		2032:389...	12:08:13....
1441	100.0		2032:389...	12:08:13....
1442	100.0		2032:389...	12:08:14....
1443	100.0		2032:389...	12:08:14....
1444	100.0		2032:389...	12:08:14....
1445	100.0		2032:389...	12:08:14....
1446	100.0		2032:389...	12:08:14....
1447	100.0		2032:389...	12:08:15....
1448	100.0		2032:389...	12:08:15....
1449	100.0		2032:389...	12:08:15....
1450	100.0		2032:389...	12:08:15....
1451	100.0		2032:389...	12:08:15....
1452	100.0	21.00	2032:389...	12:08:16....
1453	100.0	21.00	2032:389...	12:08:16....
1454	100.0	19.67	2032:389...	12:08:16....

Рисунок 3.3 – Пример входных данных имитационной модели

На рисунке 3.4 представлен один из тестовых треков, с наличием преднамеренного подавления сигнала НП. Прерывистые зеленые точки означают прохождение пакетов GPS/ГЛОНАСС с задержкой, точки красного цвета означают отсутствие принимаемого сигнала, а точки синего цвета обозначают слабый прием сигнала. Окно «Deviation map» (рисунок 3.4, окно 1) отображает погрешность местоопределения, при этом максимальное значение составило 500 метров, вследствие искажения навигационного поля. Значение PDOP, в период искажения сигнала, резко возросло до значения 100, а далее перестало определяться приемником (обозначено красными точками – рисунок 3.4, окно 1 и 2). Данный трек обработан с помощью имитационной модели в среде MatLab 14 (Рисунок 3.5). Как видно на рисунке, информационное поле «Искажение» имеет значение «0». Далее, когда приемник был подвергнут кратковременному подавлению, имитационная модель обнаружила и установила факт подавления навигационного поля, значение поля «Искажение» изменилось на значение «1», а поле «Класс» на значение «4», что соответствует преднамеренному подавлению сигнала (рисунок 3.6).

В качестве базовых параметров  $\Delta$  состояния навигационного поля для разработанного способа и имитационной модели, рекомендуется использовать полученные в ходе обработки эмпирических данных полетов БЛА:

–  $\Delta_1 = 1,5 \cdot Pdop$  (метр) – нормальное (неискаженное) состояние НП при  $h_s \geq 45$  дБм/Гц;

–  $\Delta_2 = 5 \cdot Pdop$  (метр) – незначительно искаженное состояние НП при  $h_s = 40 \dots 33$  дБм/Гц, вызванное эффектом отражения навигационных сигналов и, как следствие, интерференционными замираниями;

–  $\Delta_3 = 8 \cdot Pdop$  (метр) – искаженное состояние НП при  $h_s = 33 \dots 28$  дБм/Гц, вызванное ионосферными возмущениями;

–  $\Delta_4 = 30 \cdot Pdop$  (метр) – нарастающая преднамеренная помеха при  $h_s = 28 \dots 15$  дБм/Гц;

–  $\Delta_5 = 50 \cdot Pdop$  (метр) – скачкообразное энергетическое подавление при  $h_s = 20 \dots 10$  дБм/Гц;

Использование данных значений позволит сократить процедуру первичного обучения и повысить скорость работы предложенного метода.

На основании устройства определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия, разработан алгоритм управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, позволяющий обеспечить возможность выполнения полетного задания в автономном режиме полета при отсутствии радиоканала дистанционного управления и искаженном или подавленном НП, а также обеспечить безопасность полетов БЛА в сложной сигнально-помеховой обстановке. Полная реализация алгоритма описана в приложении И.

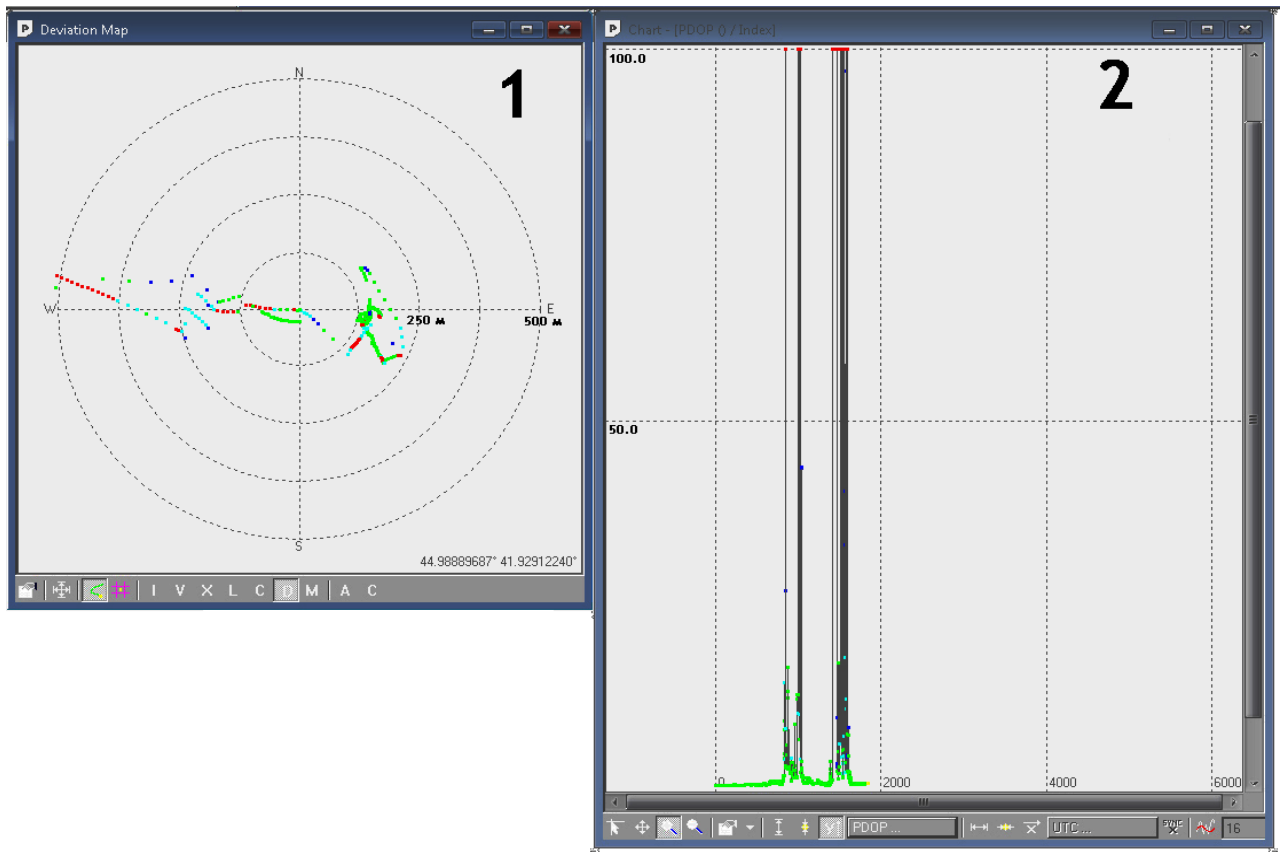


Рисунок 3.4 – Ошибки местоопределения GPS/ГЛОНАСС и параметры PDOP

Реакция имитационной модели на факт искажения навигационного поля и идентификацию помехового воздействия соответствует реальному времени.

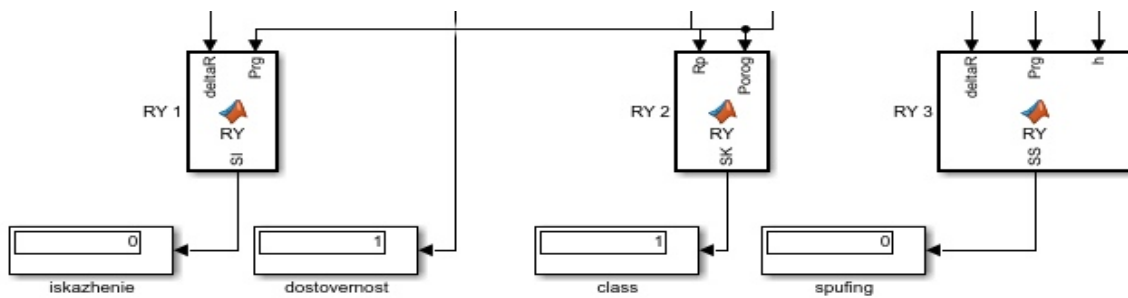


Рисунок 3.5 – Обработка пакетов GPS/ГЛОНАСС в неискаженном навигационном поле



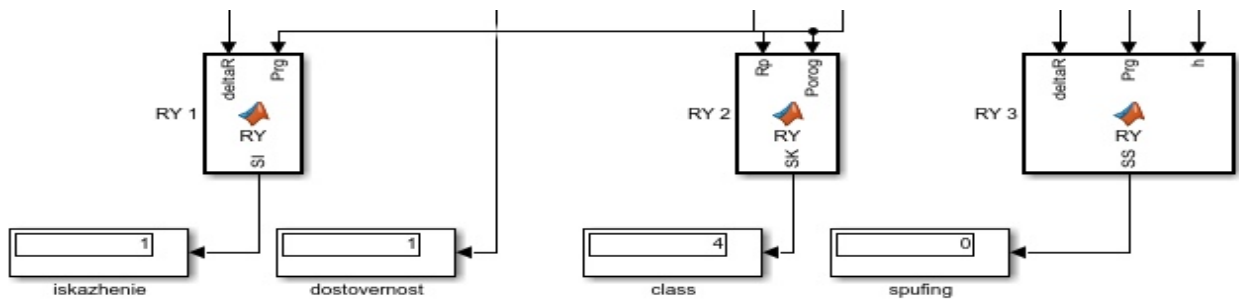


Рисунок 3.6 –Идентификация подавления сигнала GPS/ГЛОНАСС.

Основные этапы работы алгоритма приведены далее. Тестирование алгоритма осуществлялось с использованием [16, 18,19].

В начальном режиме на основе информации, введенной в блок данных (02) проводят оценку состояния НП. Для этого, воспользовавшись правилами, установленными в блоках решений (03, 05, 07 и 10) оценивают состояние навигационного поля, и если оно искажено, то идентифицируют виды помехового воздействия на приемник СНС. При этом в одном из блоков отображений (04, 06, 08, 09) формируют соответствующее сообщение-сигнализацию для регистрации в памяти вычислителя.

Рассмотрим порядок выполнения процедуры в режиме, когда НП находится в нормальном или допустимо искаженном состоянии. В этом режиме, когда переменная  $GNSS\_status$  равна 1 или 2, выполняют следующие действия:

- выдают соответственно уведомляющее сообщение «Норма ГНСС» или предупреждающее - «Искажение ГНСС» (блоки 04 или 06);
- продолжают выполнять коррекцию БИНС от навигационных данных приемника СНС –  $SINS\_corr\_SNS = 1$  (блок 11);
- производят расчет расстояния  $Dist\_NP$  и времени полета  $Time\_NP$  до навигационной точки назначения (блок 38);
- выдают команду на выполнение маневра «Полет в точку с заданными координатами» (блок 39);

– если  $GNSS\_status=2$ , осуществляется процедура идентификации состояния трассы распространения СРНС (блок 51) с последующей оптимизацией порогов классификации (блок 50).

В данном режиме полета БЛА автоматически следуют по заранее заданному и записанному в память вычислителя маршруту по командам автопилота. При приближении к контрольной точке с заданными координатами на заранее заданное расстояние, которое называется радиус контрольной точки, производят установку следующей точки маршрута.

Порядок выполнения процедуры в режиме, когда НП оказывается в состоянии энергетического подавления или изменяется под воздействием активного навязывания ложного местоположение приемнику СРНС.

В этом режиме, когда переменная  $GNSS\_status$  равна 3 или 4, выполняют следующие действия:

- выдают соответственно аварийное сообщение «Подавление ГНСС» или «Спуфинг ГНСС» (блоки 08 или 09);
- производят сброс текущего полетного задания (блок 12) и выдают команду на выполнение типового маневра «Стоп» для зависания (удержания позиции) на месте, для того, чтобы убедиться в достоверности результатов оценки состояния НП с требуемой доверительной вероятностью 0,95;
- отключают коррекцию БИНС от навигационных данных приемника СНС –  $SINS\_corr\_SNS = 0$  (блок 13);
- выдают предупреждающее сообщение-сигнализацию «БИНС автономна» (блок 14);
- включают коррекцию вертикального канала БИНС от барометрического высотомера (блок 15);
- выдают предупреждающее сообщение-сигнализацию «Высотометр» (блок 16);
- запускают таймер автономной работы БИНС  $T_{авт}$  (блок 17);

- выдают команду на выполнение маневра «Полет в точку с заданными координатами» (блок 18);
- определяют с помощью датчика скорости текущую воздушную скорость полета (блок 19);
- рассчитывают расстояния и время полета до точек назначения ( $Dist_{NP}$ ,  $Time_{NP}$ ) и посадки полетного задания ( $Dist_{LP}$ ,  $Time_{LP}$ ), производят расчет прогнозируемого максимально допустимого времени автономного полета  $t_{max.avt}$ , за которое погрешность координаты БИНС достигнет предельно допустимой величины (блоки 20 и 21);
- проверяют выполнение условия – время до заданной точки назначения полетного задания  $Time_{NP}$  меньше максимально допустимого времени автономного полета  $t_{max.avt}$  (блок 22);
- если условие выполняется, то продолжают движение БЛА в точку с заданными координатами в автономном режиме (блок 32);
- в противном случае полетное задание прерывают, выполняют команду для типового маневра «Полет в точку посадки» (блок 28);
- формируют предупреждающее сообщение-сигнализацию «Полет в точку посадки» (блок 29);
- проверяют выполнение условия – время до точки посадки  $Time_{LP}$  меньше максимально допустимого времени автономного полета  $t_{max.avt}$  (блок 23);
- если условие выполняется, то продолжают типовой маневр «Полет в точку посадки» (блок 28) и выполняют процедуру посадки, в указанную в полетном задании точку;
- в противном случае формируют аварийное сообщение-сигнализацию «Предельная ошибка координат» (блок 24), отменяют команду «Полет в точку с заданными координатами» (блок 25);
- осуществляют процедуру «Вынужденная посадка» (блок 26) и выдают предупреждающее сообщение-сигнализацию «Вынужденная посадка» (блок 27);

– в процессе движения БЛА в автономном режиме, в том числе при совершении типовых маневров «Полет в точку посадки» и «Вынужденная посадка», проверяют состояние РКДУ (блок 30);

– если канал управления в наличии (переменная  $RCC\_status = 1$ ), то передают его текущие координаты и предупреждающее сообщение-сигнализацию «Возьми ручное управление» (блок 31).

Порядок выполнения процедуры управления в режиме, когда НП восстанавливается до приемлемого состояния. В этом режиме выполняют следующие действия (операции, приемы):

– в процессе движения БЛА в автономном режиме контролируют состояние НП (блок 33);

– если состояние НП улучшается, хотя бы до допустимого искаженного состояния, то выдают команда на выполнение типового маневра «Стоп» для зависания (удержания позиции) на месте и проверки достоверности оценки состояния НП с требуемой доверительной вероятностью 0,95 (блок 34);

– отключают коррекцию вертикального канала БИНС от барометрического высотомера, включают коррекцию БИНС от навигационных данных приемника СНС (блок 35);

– выдают уведомляющее сообщение-сигнализацию «БИНС норма» (блок 36);

– сбрасывают таймер автономной работы БИНС (блок 37);

– производят расчет расстояния  $Dist_{NP}$  и времени полета  $Time_{NP}$  до навигационной точки назначения (блок 38);

– выдают команду на выполнение маневра «Полет в точку с заданными координатами» (блок 39).

Порядок выполнения процедуры управления в режиме обеспечения безопасности полета БЛА. В этом режиме выполняют следующие действия:

– выполняют последнюю команду, управляющую движением БЛА, т.е. продолжают текущее полетное задание (блок 40);

- периодически считывают из контроллера СБП текущее значение напряжения аккумуляторной батареи и рассчитывают расстояние *Flight\_range*, которое может пролететь БЛА на оставшемся заряде (блок 41);
- постоянно контролируют состояние заряда аккумуляторной батареи *Bat\_charge* (блок 42);
- определяют с помощью датчика скорости воздушную скорость полета *Air\_speed*, а с помощью ИНС путевую скорость *Ground\_speed*, по их значениям вычисляют скорость ветра *Wind\_speed* (блок 43);
- при достижении критических значений, когда  $Bat\_charge \leq Limit$  (блок 42), или, когда  $Wind\_speed > Max$  (блок 44), вырабатывают решение на аварийную посадку, для этого производят сброс текущего полетного задания и выполняют аварийную посадку (блок 45);
- выдают аварийное сообщение-сигнализацию «Аварийная посадка» (блок 46);
- при совершении типового маневра «Аварийная посадка», проверяют состояние РКДУ (блок 30);
- если канал управления БЛА в наличии (переменная  $RCC\_status = 1$ ), то передают его текущие координаты и предупреждающее сообщение-сигнализацию «Возьми ручное управление» (блок 31);
- в случаях, когда  $Bat\_charge > Limit$  (блок 42) или когда  $Wind\_speed < Max$  (блок 44), выполняют последнюю команду, управляющую движением БЛА, завершая текущее полетное задание.

Таким образом, представлены практические рекомендации по формированию устройства определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС и алгоритма его функционирования. Адекватность разработок подтверждена данными, полученными с использованием трека навигационного приемника БЛА u-blox 8. Использование предложенного устройства позволяет определить факт искажения НП и идентифицировать тип помехового воздействия в реальном времени. Его применение в навигационных

приемниках позволит усовершенствовать алгоритмы управления БЛА и расширить их функциональные возможности в автономном режиме работы.

### **3.2. Имитационная модель идентификации состояний трассы распространения СРНС**

Для идентификации состояний трассы распространения СРНС разработана имитационная модель [1, 20], позволяющая осуществлять идентификацию закона распределения огибающей навигационного сигнала. Данная модель актуальна для применения в навигационных приемниках, у которых отсутствует возможность анализа квадратурных компонент сигнала, при эксплуатации в условиях повышенной вероятности возникновения ионосферных флуктуаций. Рассмотрим, в качестве примера, обработку выборки навигационного GPS-сигнала длиной 1 минуту, размером в 1000 измерений, полученного с помощью оборудования Novatel GPStation-6.

На рисунке 3.7 представлена функция амплитуды исходного сигнала, полученного лабораторным комплексом.

После обработки предложенным методом, исходный сигнал  $y(k)$  разложен на 8 мод (imf1...imf8) и остаточный тренд (res.) (2.17-2.20). Полученные моды представлены на рисунке 3.8.

Т.к. на данном промежутке времени возможно идентифицировать только быстрые замирания сигнала, с использованием предложенного метода возможно отделить неинформативные составляющие с низкой частотой. В результате экспериментов определено, что для коротких промежутков времени, характерных для быстрых замираний, это 3 последние моды и остаток.

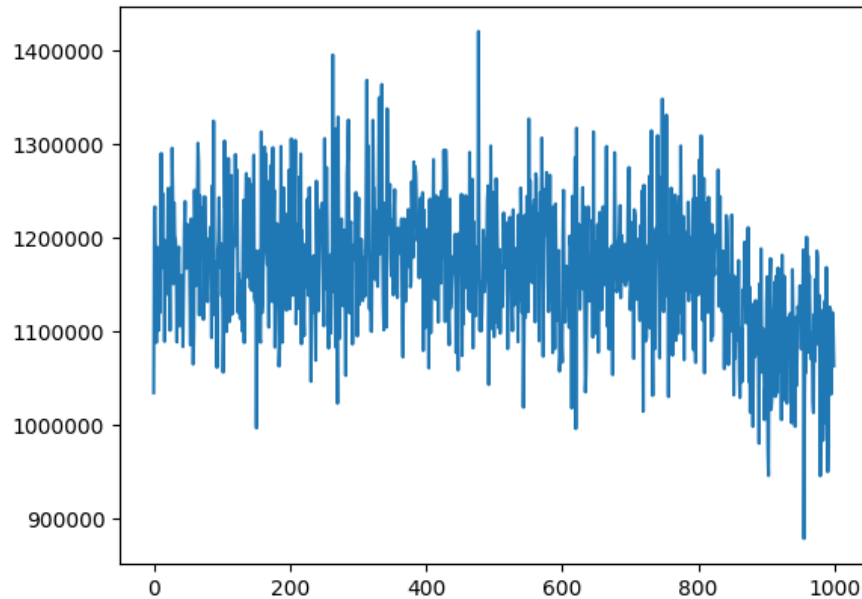


Рисунок 3.7 – Исходная выборка GPS сигнала

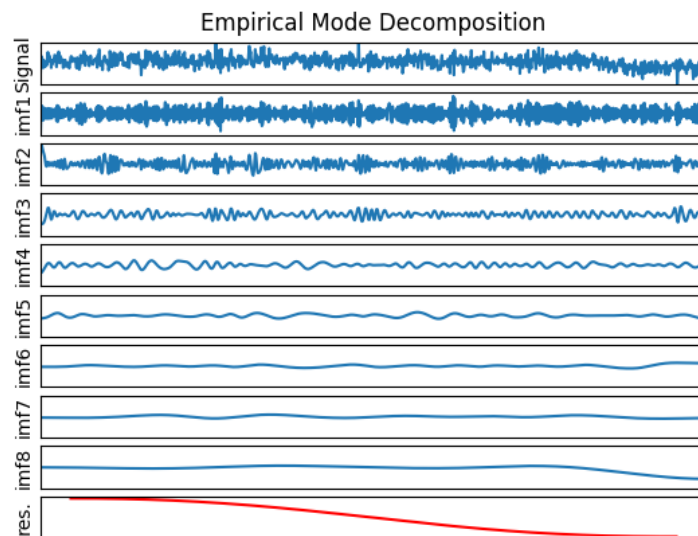


Рисунок 3.8 – Полученный набор мод

На рисунке 3.9 представлены суммы мод от последней к первой и их дифференциальные плотности распределения. Первые суммы, полученные представленным методом, представляют собой постоянную составляющую и низкочастотную составляющую, не несущие информации о быстрых замираниях сигнала.

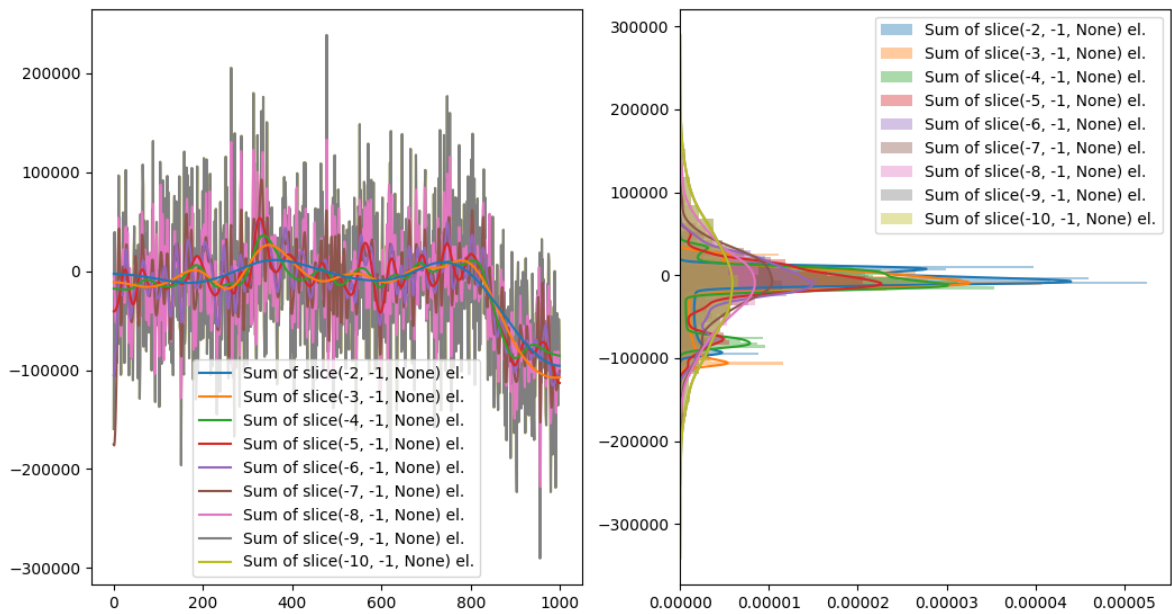


Рисунок 3.9 – Суммы полученных мод и плотности распределения сумм

Таким образом, отняв 4 последние моды, получим сигнал, содержащий только высокочастотные составляющие. С помощью кубического сплайна возможно вычисление огибающей итогового сигнала.

Далее, согласно методу, произведена идентификация закона распределения огибающей сигнала, с помощью критерия Колмогорова-Смирнова. Результаты работы критерия представлены в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Результат работы критерия Колмогорова-Смирнова

Критерий	Исходное распределение	Предполагаемое распределение	Коэффициент правдоподобия
Колмогорова-Смирнова	Нормальное	Райса	4,37399
		Накагами	5,46973
		Нормальное	7,2852
		Рэля	4,2382
Итоговое время			0,653 с.

Согласно (2.21), критерий Колмогорова-Смирнова верно идентифицировал закон распределения для полученной огибающей.



Использование представленного метода позволит обоснованно проводить оптимизацию порогов классификации состояний трассы распространения СРНС законов распределений случайных величин.

### **3.3. Имитационная модель оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС**

Для оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС разработаны имитационные модели [17, 21, 22], с целью обеспечения чувствительности навигационного оборудования БЛА. Данные модели позволят обеспечить алгоритм RAIM необходимым количеством спутников, что позволит повысить качество его функционирования. Также, это положительно скажется на вычислении параметров навигационной задачи, таких как  $P_{DOP}$ .

Использование оптимизации порогов классификации позволяет обеспечить более высокую вероятность обнаружения сигнала на фоне помехи, при обеспечении вероятности ложной тревоги на уровне  $10^{-3}$ .

На основании полученных решений, проведено сравнение реализованного метода с существующими методами определения порогов классификации [121-129]. Результаты зависимости вероятности правильного обнаружения сигнала GPS/ГЛОНАСС от отношения сигнал/шум, для некоторых ансамблей сигналов, приведены на рисунках 3.10-3.13.

В зависимости от состояния ионосферы, данное решение позволяет расширить минимальное соотношение сигнал/шум до диапазона 19..20 дБ/Гц. Это позволит обеспечить более стабильную работу алгоритмов RAIM и возможность

выбора наиболее удачного созвездия, для PDOP с целью сохранения максимально возможной точности навигационной системы.

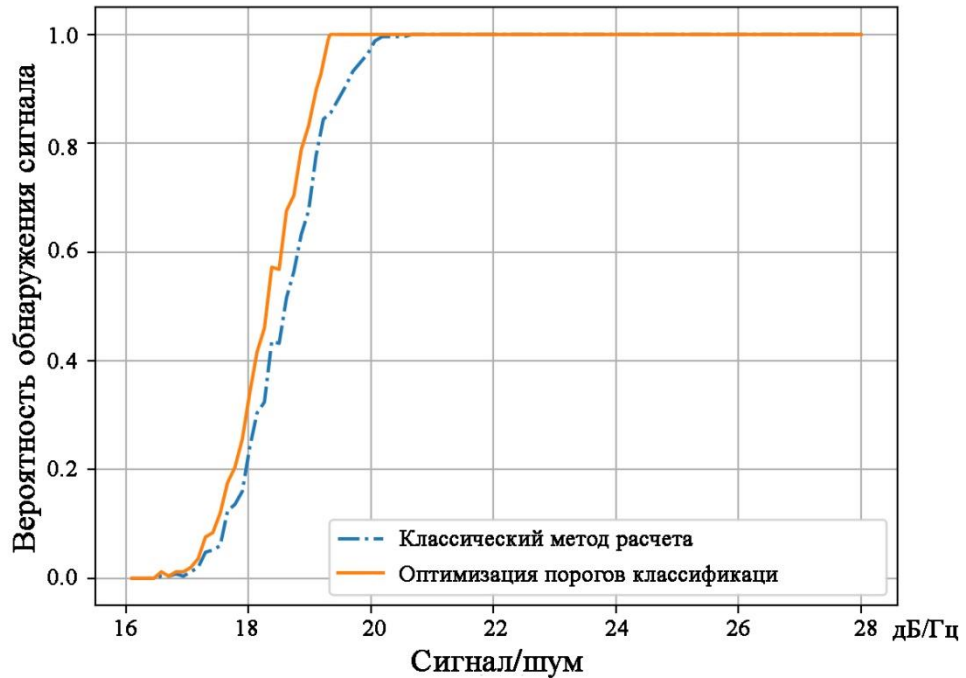


Рисунок 3.10 – Зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения  $\sqrt{E/N}$  для закона Релея

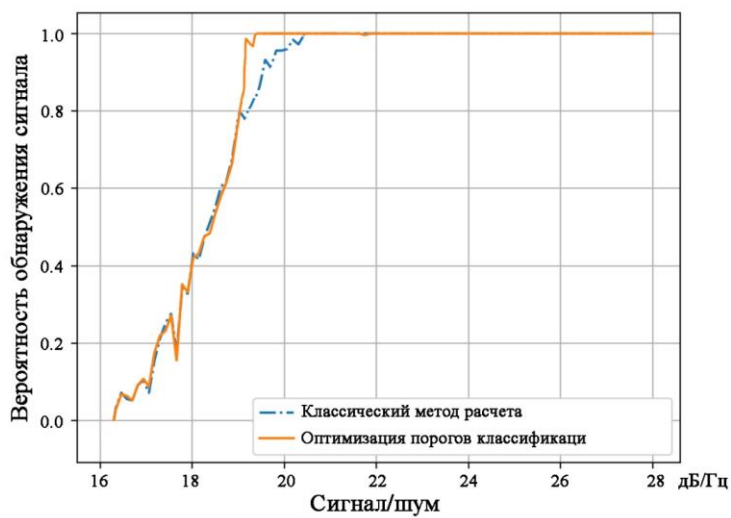


Рисунок 3.11 – Зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения  $\sqrt{E/N}$  для нормального закона распределения

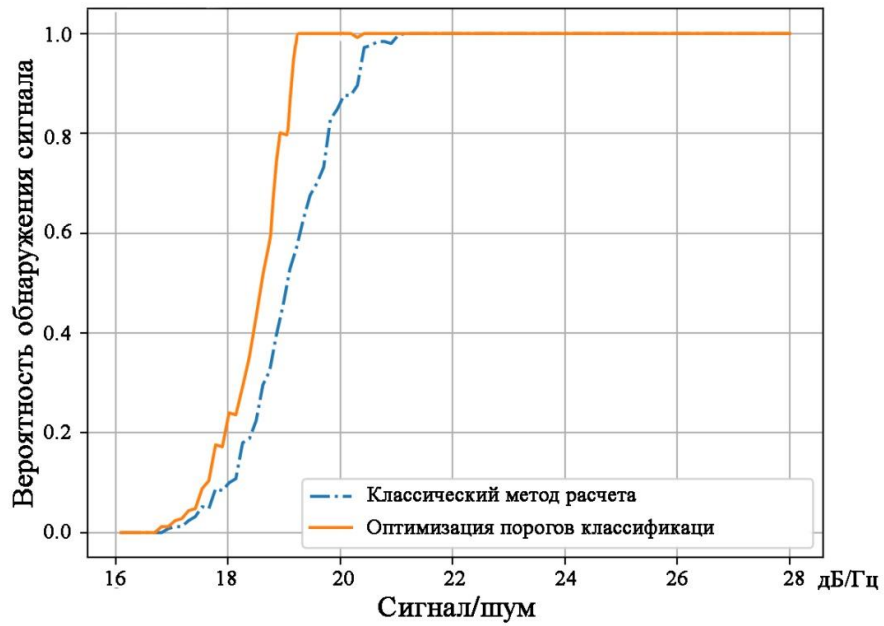


Рисунок 3.12 – Зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения  $\sqrt{E/N}$  для закона Райса

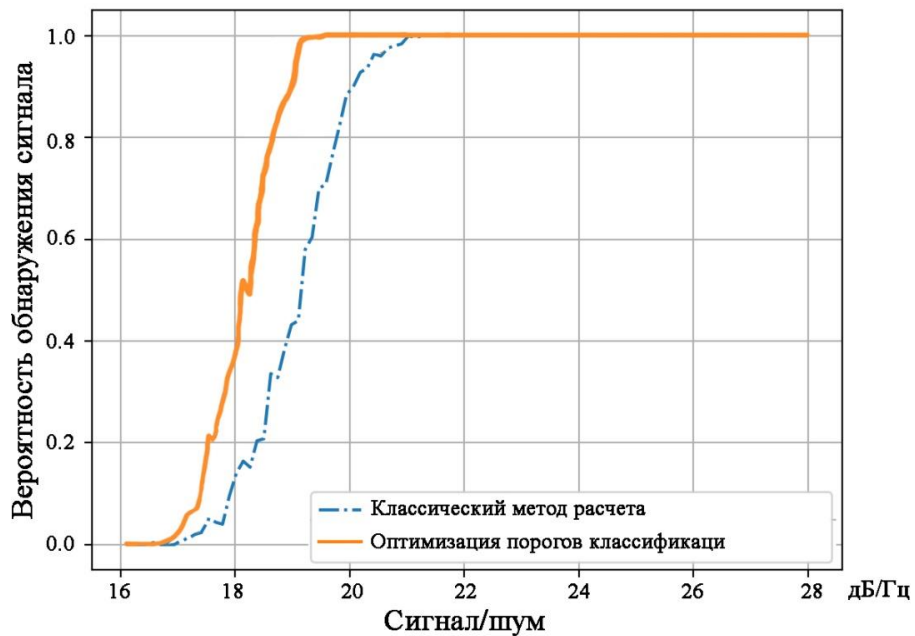


Рисунок 3.13 – Зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения  $\sqrt{E/N}$  для закона Накагами

При сравнении параметров алгоритмов решений методами Ньютона, Пауэлла, Бройдена и Ньютона-Крылова выявлено, что все они обладают достаточной точностью. Поэтому, в качестве критерия наилучшего метода решения для каждого из законов распределения наиболее предпочтительный метод определен по времени исполнения. Результаты тестирования методов представлены на рисунке 3.14.

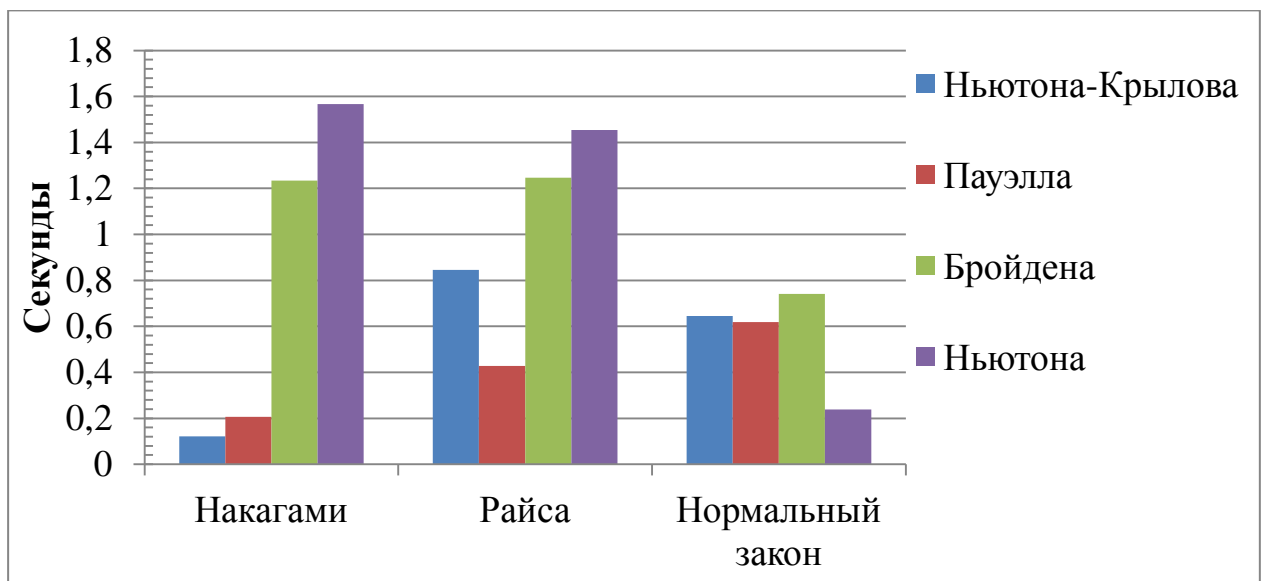


Рисунок 3.14 – Время поиска решения корней системы уравнений

Таким образом, определено, что для закона Накагами наиболее предпочтительно использовать метод Ньютона-Крылова, для закона Райса – метод Пауэлла, а для нормального распределения – метод Ньютона.

Разработанный метод оптимизации порогов классификации трассы распространения СРНС позволяет обеспечить более высокую вероятность обнаружения сигнала GPS/ГЛОНАСС на фоне шума, описываемого законами распределения случайных величин, относительно известных методов вычисления порогов классификации. Использование данного метода целесообразно для всех навигационных приемников, функционирующих в условиях возникновения ионосферных флуктуаций.

### 3.4. Сравнительная оценка точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета, при искажении или подавлении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС и вывод о достижении цели исследования

Проведем сравнительный анализ точности позиционирования БЛА в условиях искажения или подавления НП. В качестве исходных данных используем данные, полученные с использованием БЛА в разделе 1, рис. 1.8.

Анализ трека, записанного приемником БЛА легкого класса «Альбатрос П2» u-blox 8 показал, что своевременная идентификация факта искажения НП позволяет избежать наложения ошибки искаженного НП на БИНС (рисунок 3.15).

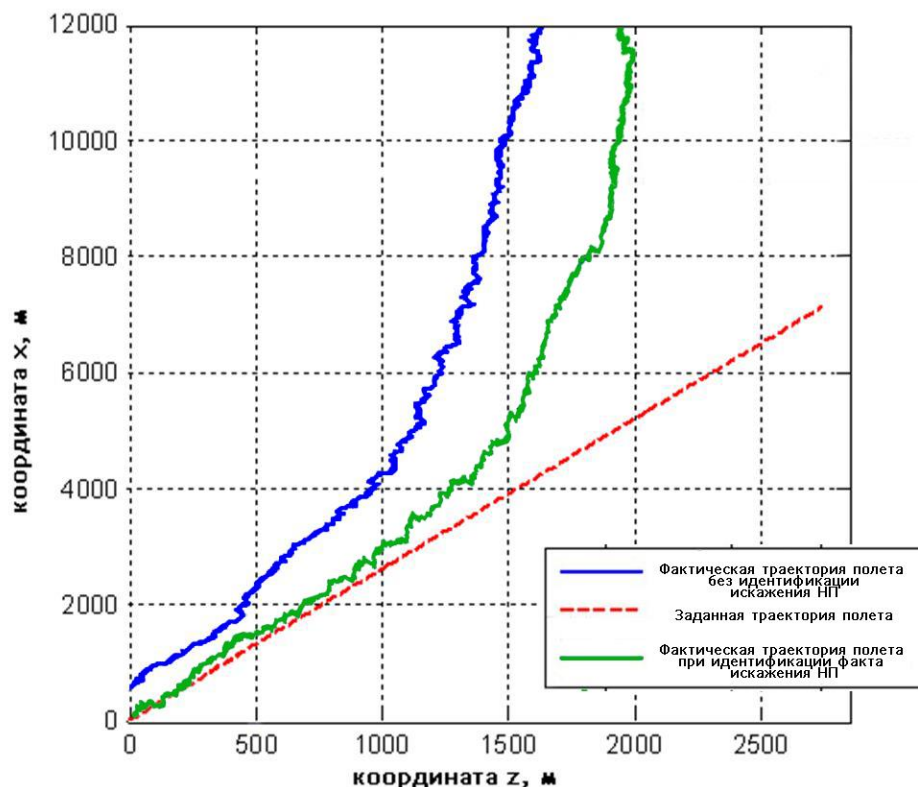


Рисунок 3.15 – Траектория полета БЛА с идентификацией факта искажения НП.

При этом, в условиях искажения ионосферного слоя обеспечена требуемая помехоустойчивость. Показано, что в ряде случаев, когда навигационный приемник не использовал оптимизацию порогов классификации и сохранял связь менее чем с 5 спутниками (красная линия, рисунок 3.16), при использовании оптимизации порогов классификации, в ряде случаев связь сохранялась с 5-7 спутниковыми аппаратами (зеленая линия, рисунок 3.16).

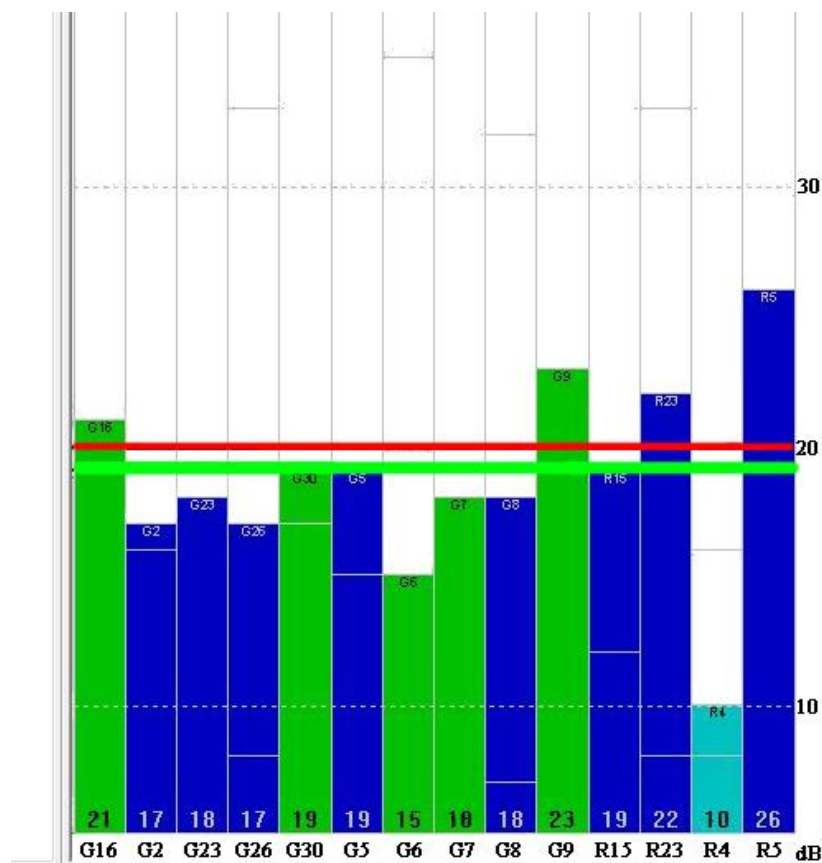


Рисунок 3.16 – Достигнутые показатели чувствительности приемника БЛА

Проведение летных испытаний при различных состояниях НП позволило определить, что в среднем, в течение 5 минут после факта искажения/подавления НП, в режиме автономного полета, разработанный НМА обеспечивает ошибку местоопределения, в среднем, в 350 м для БЛА легкого класса (рисунок 3.17). Относительно известных методов, непосредственный выигрыш составляет от 20 до 200 метров по показателю ошибки позиционирования БЛА.

## Ошибка позиционирования БЛА

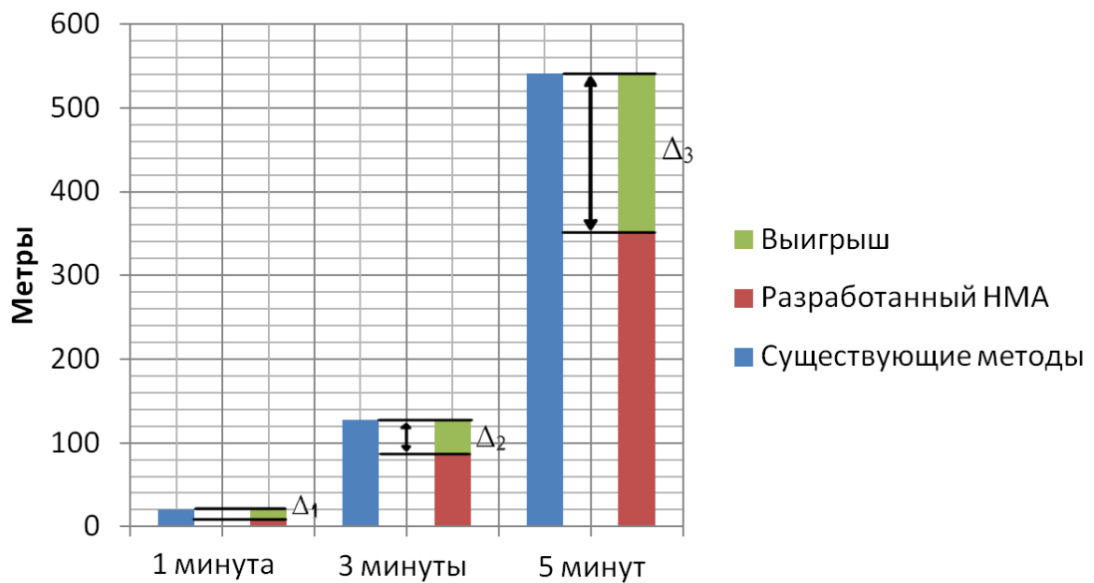


Рисунок 3.17 – Сравнительная оценка ошибки позиционирования БЛА

Полученный выигрыш точности местоопределения по показателю ошибки определения навигационного положения БЛА в условиях подавления или искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС обусловлен своевременным переходом на БИНС при подавлении навигационного поля и обеспечением помехоустойчивости приемника спутникового канала связи при наличии ионосферных возмущений.

Соответственно, полученные результаты позволяют обеспечить выигрыш при:

- функционировании БЛА в условиях подавления НП GPS/ГЛОНАСС;
- приближении БЛА к источнику помехи, подавляющей НП GPS/ГЛОНАСС и создающей плавное повышение ошибки позиционирования;
- функционировании БЛА в условиях возмущения ионосферы, когда состояние трассы распространения СРНС описывается законами Райса, Релея, Накагами и нормальным законом распределения.

Факторами, обеспечивающими максимальный выигрыш являются:

- использование БИНС в составе БЛА;
- видимость большого количества навигационных аппаратов;
- описание ионосферных флуктуаций рассмотренными в работе законами распределения (Райса, Релея, Накагами и нормальным законом);
- доступность рассмотренных типовых маневров БЛА;
- исполнение БЛА в виде квадрокоптера.

Рассмотрим факторы, уменьшающие выигрыш от использования предложенных решений.

При отсутствии БИНС в составе БЛА происходит наиболее значительное ухудшение выигрыша, ввиду невозможности осуществления навигации в условиях подавления или значительного искажения НП.

При описании ионосферных флуктуаций иными законами распределения случайных величин (например, законом Бекмана, Четырехпараметрическим распределением и т.д.) уменьшение выигрыша будет зависеть от близости частного случая к рассмотренным законам. Также, рассмотренные законы не описывают аномальных экспериментальных случаев, у которых имеется более одной вершины и коэффициент эксцесса которых существенно отрицателен. Для данных случаев проведение процедуры оптимизации порогов классификации невозможен, ввиду априорно неверной идентификации состояния трассы распространения СРНС.

Видимость менее, чем 6 спутниковых аппаратов, при плохой сигнальной обстановке, даже при проведении процедуры оптимизации порогов классификации не позволит осуществить обеспечение алгоритма RAIM необходимым количеством спутников. При этом, за счет обеспечения помехоустойчивости, возможно лишь уменьшение выигрыша путем различения навигационного сигнала на фоне помехи от видимых КА.

Ввиду того, что предложенные решения по управлению БЛА осуществляются на третьем уровне управления, недоступность рассмотренных типовых маневров БЛА не позволяет использовать способ управления БЛА. В



данном случае выигрыш возможен за счет осуществления процедуры оптимизации порогов классификации и зависеть от количества наблюдаемых спутниковых аппаратов.

При исполнении БЛА в «самолетном» типе невозможно обеспечение процедуры идентификации спуфинга и некоторых этапов управления БЛА, т.к. данная процедура подразумевает зависание аппарата в воздухе. В данном случае выигрыш будет обеспечен исключительно за счет осуществления процедуры оптимизации порогов классификации, в зависимости от количества наблюдаемых спутниковых аппаратов.

Рассмотренные факторы также являются ограничениями на применение полученных результатов.

Так как использование полученных результатов на практике, при функционировании БЛА в условиях подавления НП и условиях ионосферных флуктуаций, обеспечивает требуемую ошибку позиционирования БЛА легкого класса в течении 5 минут после факта искажения/подавления НП GPS/ГЛОНАСС, то можно сделать вывод, что цель исследования является достигнутой.

## ВЫВОДЫ

1) Раздел посвящен решению **пятой частной задачи** и сравнительной оценки точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета, при искажении или подавлении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС. **Пятая частная задача** формулируется как разработка практических рекомендаций по повышению точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета.

2) На основе способа определения факта и типа искажения НП GPS/ГЛОНАСС и способа управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении НП GPS/ГЛОНАСС разработаны практические рекомендации по формированию устройства [15], позволяющего достоверно определять факт искажения НП и идентифицировать его состояние с использованием типовых классов. Технической новизной является следующее:

впервые представлено устройство, позволяющее осуществлять определение факта искажения НП и идентифицировать тип искажения;

предложены базовые параметры состояния навигационного поля для разработанного способа и устройства, которые получены в ходе обработки эмпирических данных полетов БЛА;

разработанный алгоритм функционирования данного устройства позволяет интегрировать его в состав третьего уровня управления БЛА легкого класса.

Практическая значимость данных рекомендаций заключается в том, что они применимы к широкому спектру навигационных приемников и могут быть реализованы в составе программируемой логической интегральной схемы, что удовлетворяет существующие требования к массогабаритным ограничениям БЛА легкого класса. При этом, в отличие от существующих решений, обеспечивается не только определение факта искажения НП, но и идентификация типа искажения. Его применение в навигационных приемниках позволит

усовершенствовать алгоритмы управления БЛА и расширить их функциональные возможности в автономном режиме работы.

3) На основании методики идентификации состояний трассы распространения СРНС разработана имитационная модель идентификации состояний трассы распространения СРНС, позволяющая обоснованно проводить процедуру оптимизации порогов классификации. Технической новизной является возможность осуществления идентификации состояния трассы распространения СРНС по огибающей сигнала с использованием модовой декомпозиции сигнала без использования анализа квадратурных компонент принимаемого навигационного сигнала.

Практическая значимость заключается в обеспечении возможности обоснованного проведения процедуры оптимизации порогов классификации состояния трассы распространения СРНС для навигационных приемников, в составе которых отсутствует возможность анализа квадратурных компонент принимаемого сигнала.

4) На основании метода оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС разработана имитационная модель оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС. Технической новизной является обеспечение алгоритма RAIM необходимым количеством спутников, что позволит повысить качество его функционирования. Также, это оказывает положительный эффект на вычислении параметров навигационной задачи, таких как  $P_{DOP}$ .

Полученные в ходе решения пятой научной задачи результаты обладают следующими признаками научной новизны:

для идентификации состояний НП GPS/ГЛОНАСС предложено использование следующих типовых состояний:

- $\Delta_1$  – нормальное (неискаженное) состояние НП при  $h_s \geq 45$  дБм/Гц;

- $\Delta_2$  – незначительно искаженное состояние НП при  $h_s = 40 \dots 33$  дБм/Гц, вызванное эффектом отражения навигационных сигналов и, как следствие, интерференционными замираниями;
- $\Delta_3$  – искаженное состояние НП при  $h_s = 33 \dots 28$  дБм/Гц, вызванное ионосферными возмущениями;
- $\Delta_4$  – нарастающая преднамеренная помеха при  $h_s = 28 \dots 15$  дБм/Гц;
- $\Delta_5$  – скачкообразное энергетическое подавление при  $h_s = 20 \dots 10$  дБм/Гц.

Практическая значимость заключается в выработке рекомендаций по использованию алгоритмов решения задачи оптимизации порогов классификации, в зависимости от текущего закона распределения случайных величин по критерию времени работы алгоритма. Показано, что для закона Накагами наиболее предпочтительно использовать метод Ньютона-Крылова, для закона Райса – метод Пауэлла, а для нормального распределения – метод Ньютона. Полученное решение позволяет использовать его в составе БЛА легкого класса.

5) Целью диссертационного исследования являлось повышение точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета, при искажении или подавлении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, на основе управления движением БЛА и разработки методов идентификации состояния навигационного поля. В процессе решения научной задачи были получены научные результаты, обладающие научной новизной и теоретической значимостью:

способ определения фатка и типа искажения Ннавигационного поля GPS/ГЛОНАСС;

методика идентификации состояний трассы распространения СРНС;

метод оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС.

способ управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.

Использование этих научных результатов в прикладной области позволило сформулировать практические рекомендации по использованию полученных решений, а именно:

практические рекомендации по формированию устройства определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС и алгоритма его функционирования;

имитационную модель идентификации трассы распространения СРНС;

имитационную модель оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС.

Цель следования, состоящая в повышении точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета, при искажении или подавлении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, на основе управления движением БЛА и разработки методов идентификации состояния навигационного поля на основании достигается за счет применения разработанного научно-методического аппарата. Для верификации разработанного НМА, проведена оценка уровня повышения точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета. Анализ результатов показал, что использование в составе БЛА вышеуказанных решений позволяет повысить точность позиционирования БЛА за счет уменьшения ошибки местоопределения в режиме автономного полета, в среднем, до 350 м.

Материалы и результаты данного раздела диссертации были предварительно опубликованы в статьях [1-5], опубликованных в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований по специальности 05.13.01, в статьях [5-7] в рецензируемом издании, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований по группе специальностей 05.13.00. В работах [1-14] материалы данного раздела были использованы для обоснования направлений исследований. Полученные решения использовались при разработке программ для ЭВМ [16-22] и формировании патента на полезную модель [15]. Отдельные результаты обсуждались в рамках конференций и были опубликованы в соответствующих сборниках [23-30]

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании с целью повышения точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета при искажении или подавлении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, на основе управления движением БЛА и разработки методов идентификации состояния навигационного поля решена научная задача разработки научно-методического аппарата, обеспечивающего повышение точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета, по показателю ошибки определения навигационного положения БЛА в условиях подавления или искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.

В процессе исследования научная задача была декомпозирована на совокупность взаимоувязанных частных задач, итогом решения которых являются защищаемые положения, которые соответствуют научным результатам, обладающим научной новизной, теоретической значимостью.

1. Способ определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.

2. Методики идентификации состояний трассы распространения СРНС.

3. Метод оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС.

4. Способ автоматического управления беспилотным летательным аппаратом в условиях подавления или искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС.

5. Практические рекомендации по повышению точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета.

Полученные в работе новые результаты, а также их составные части обладают следующими отличительными признаками новизны.

1. Способ определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, отличающийся от известных тем, что в нем использована новая совокупность выполняемых в определенной последовательности действий, с соблюдением введенных правил принятия решений, а именно:

для определения факта искажения НП использована полиномиальная аппроксимация массива измерений местоопределения (МО) БЛА с дискретностью, равной периоду поступления навигационных параметров;

для вероятностной оценки состояния НП, с использованием совокупности признаков по полученной выборке МО, использован Байесовский подход;

определяется доверительная апостериорная вероятность оценки состояния НП с использованием способа максимизации апостериорной плотности;

для обнаружения факта искажения и идентификации видов помехового воздействия определено решающее правило использующее критерий минимизации СКП.

2. Для идентификации состояний трассы распространения СРНС, разработана методика, отличающаяся от известных тем, что впервые для решения подобной задачи использован метод модовой декомпозиции и введено сравнение по выбранному критерию согласия текущего состояния трассы распространения СРНС с эталонными распределениями Релея, Райса, Накагами и нормального распределения.

3. Впервые разработан метод оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС, для законов распределения Райса, Накагами и нормального закона распределения. Получены численные решение оптимальных порогов классификации с точностью не хуже 0,01. Использование данного метода позволило обеспечить выбор оптимальных порогов классификации при обнаружении сигнала на фоне шума и минимизировать вероятности возникновения ошибок первого и второго рода.

4. С целью обеспечения безопасности полета и возможности выполнения полетного задания в условиях искажения/подавления НП, разработан способ

автоматического управления БЛА при отсутствии командного радиоканала дистанционного управления, отличающийся от известных тем, что введены новые, выполняемые в определенной последовательности операции:

определение время автономного полета, при котором погрешность координат достигнет заданного значения;

на основании результатов выполнения способа определения факта и типа искажения навигационного поля GPS/ГЛОНАСС, осуществляется совокупность типовых маневров управления БЛА, обеспечивающая возможность выполнения полетного задания;

при обнаружении ионосферных искажений осуществляется процедура идентификации состояний трассы распространения сигналов СРНС, основанная на разработанной методике;

на основании результатов методики идентификации состояний трассы распространения СРНС, осуществляется оптимизация порогов классификации состояний трассы распространения СРНС;

5. Разработаны практические рекомендации по повышению точности позиционирования БЛА в режиме автономного полета:

для идентификации состояний НП GPS/ГЛОНАСС предложено использование следующих типовых состояний:

- $\Delta_1$  – нормальное (неискаженное) состояние НП при  $h_s \geq 45$  дБм/Гц;
- $\Delta_2$  – незначительно искаженное состояние НП при  $h_s = 40 \dots 33$  дБм/Гц, вызванное эффектом отражения навигационных сигналов и, как следствие, интерференционными замираниями;
- $\Delta_3$  – искаженное состояние НП при  $h_s = 33 \dots 28$  дБм/Гц, вызванное ионосферными возмущениями;
- $\Delta_4$  – нарастающая преднамеренная помеха при  $h_s = 28 \dots 15$  дБм/Гц;
- $\Delta_5$  – скачкообразное энергетическое подавление при  $h_s = 20 \dots 10$  дБм/Гц.



Таким образом, в работе получены новые результаты, которые позволяют разрешить научную задачу, имеющую важное значение для развития теории управления и теории помехоустойчивости, в частности – применительно к управлению БЛА по сигналам СРНС (соответствует п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней»).

Анализ результатов показал, что использование в составе БЛА вышеуказанных решений позволяет повысить точность позиционирования БЛА за счет уменьшения ошибки местоопределения в режиме автономного полета, в среднем, до 350 м.

Разработанные в диссертации имитационные модели, методы, способы и рекомендации могут быть использованы организациями, ведущими сопровождение работ при разработке БЛА легкого класса квадрокоптерного типа, а также главными конструкторами при разработке нового навигационного оборудования.

Основным научным направлением дальнейшего развития диссертационного исследования являются следующие:

1) Развитие методики идентификации состояний трассы распространения СРНС для обеспечения корректности идентификации в случаях описания ионосферных флуктуаций иными законами распределения случайных величин (например, законом Бекмана, Четырехпараметрическим распределением и т.д.) и аномальных экспериментальных случаев, у которых имеется более одной вершины и коэффициент эксцесса которых существенно отрицателен.

2) Автором предполагается проведение дальнейших научных исследований в направлении оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС для не рассмотренных в данной работе законов распределения и аномальных экспериментальных случаев, с целью обеспечения помехоустойчивости навигационных приемников в различных условиях функционирования.

3) Модернизация разработанного НМА для увеличения выигрыша при использовании БЛА легкого класса самолетного типа. Для данного случая, необходима разработка иных способов управления БЛА, ввиду конструкционных

ограничений.

4) Проведение исследований на тему повышения точности позиционирования мультироторного БЛА на этапах взлета/посадки в условиях отсутствия прямой видимости навигационных аппаратов.

**СПИСОК ЗАТЕКСТОВЫХ ССЫЛОК**

1. Линец Г. И., Мельников С. В. Критерий идентификации вероятностной модели состояния спутниковых каналов связи // Современная наука и инновации. 2020. № 2 (30). С. 32–40.
2. Линец Г. И., Мельников С. В. Оптимизация порогов классификации состояния трансионосферных каналов связи, описываемых распределением Накагами // Известия Института инженерной физики. 2020. № 3 (57). С. 29–33.
3. Применение беспилотных летательных аппаратов для радиолокационного поиска воздушных и морских судов, потерпевших аварию / А. В. Баженов, Н. В. Гривенная, А. М. Исаев, С. В. Мельников // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 212–230.
4. Погрешность определения псевдодальности в спутниковой радионавигационной системе при возмущениях ионосферы / В. П. Пашинцев, Г. И. Линец, С. А. Коваль, М. А. Сенокосов, С. В. Мельников // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 2. С. 231–279.
5. Алгоритм определения начальных координат роботизированного беспилотного летательного аппарата в условиях искажения навигационного поля / Г. И. Линец, С. В. Мельников, О. Х. Шаяхметов, А. М. Исаев, М. А. Исаев // Современная наука и инновации. 2020. № 2 (30). С. 17–28.
6. Способ определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия на приемник РБЛА / К. М. Сагдеев, Г. И. Линец, С. В. Мельников, А. М. Исаев, М. А. Исаев // Инфокоммуникационные технологии. 2020. Т. 18. № 2. С. 166–177.
7. Программно-аппаратный комплекс имитационного моделирования полета мультироторного БЛА / А. М. Исаев, Г. И. Линец, М. А. Исаев, С. В. Мельников // Инфокоммуникационные технологии. 2020. Т. 18. № 2. С. 177–187.

8. Linets G., Melnikov S. Decrease of energy consumption of transport telecommunication networks using stage-by-stage controlling procedure // *Studies in Systems, Decision and Control*. 2019. №. 171. C. 299–322.

9. Optimizing classification thresholds of status of transionospheric communication channel distributed according to rayleigh distribution law for decreased quadcopter's positioning errors / G. I. Linets, M. A. Isaev, A. M. Isaev, S. V. Melnikov // *CEUR Workshop Proceedings : 3rd International Workshop on Young Scientist's Trends in Information Processing, YSIP3 2019 (Stavropol and Arkhyz; Russian Federation; 17 September 2019 - 20 September 2019)*. 2019. №. 2500. C. 1–8.

10. Decrease energy consumption of transport telecommunication networks due to the usage of stage-by-stage controlling procedure / G. I. Linets, S. V. Melnikov, S. V. Govorova, V. V. Medenec, M. A. Lapina // *2018 Multidisciplinary symposium on computer science and ICT, REMS 2018 (15–20 October 2018, Stavropol; Russian Federation) / North–Caucasus Federal University. Stavropol, 2018*. P. 181–190.

11. Optimizing classification thresholds of status of transionospheric communication channel distributed according to rayleigh distribution law for decreased quadcopter's positioning errors / G. I. Linets, S. V. Melnikov, M. A. Isaev, A. M. Isaev // *3rd international workshop on young scientist's trends in information processing, YSIP3 2019 (Stavropol and Arkhyz, 17-20 september 2019.)*. Stavropol, 2019. P. 1–8.

12. Linets G. I., Melnikov S. V., Isaev A. M. Optimization of classification thresholds for states of transionospheric radio links described by the normal distribution for ensuring the accuracy of uav positioning // *9th Computer Science On-line Conference, CSOC 2020 (Zlin, Czech Republic; 15 July 2020)*. Zlin, 2020. P. 453–469.

13. Optimization of the classification thresholds of the state of transionospheric communication channels to ensure accuracy of the positioning RBLA / G. Linets, V. Nikulin, A. Isaev, S. Melnikov // *AIP Conference Proceedings*. 2019. №. 2171. Art. number 060006.

14. Linets G. I. Sandryan S. N., Melnikov S. V. Optimizing thresholds of classification system for identifying status of transport communication systems // International conference on Information technologies in business and industry 2018 (17–20 January 2018, Tomsk, Russian Federation)/ Tomsk Polytechnic University. Tomsk, 2018. Art. number 022011.

15. Патент 198994 Российская Федерация, МПК G01S 19/21, G01C 21/20, H04B 17/309. Устройство определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия на приемник роботизированного беспилотного летательного аппарата / Г. И. Линец, К. М. Сагдеев, С. В. Мельников, Е. М. Ширяев, А. М. Исаев, М. А. Исаев, В. В. Гранкин ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (RU). № 2019140798. Заявл. 10.12.19 ; опубл. 06.08.2020. Бюл. № 22.

16. Свидетельство 2019619475. Имитационная модель мультироторного БЛА / А. М. Исаев, М. А.Исаев, Г. И. Линец, С. В. Мельников ; Правообладатель ФГБОУ ВО Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (RU). № 2019618010. Заявл. 04.07.2019 ; опубл. 17.07.2019.

17. Свидетельство 2019615347. Имитационная модель определения оптимальных порогов классификации состояния трансионосферного канала при распределении случайных величин по нормальному закону / Г. И. Линец, С. В. Мельников, В. А. Миронов ; правообладатель ФГБОУ ВО Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (RU). № 2019613609. Заявл. 08.04.2019 ; опубл. 24.04.2019.

18. Свидетельство 2020613362. Программный модуль компенсации ошибок определения истинного местоположения радиус вектора положения РБЛА / В. А. Миронов, А. М. Исаев, М. А. Исаев, И. В. Стручков, А. Д. Бушуров, Р. А. Воронкин, Д. С. Елагин, Е. И. Парменов, С. В. Мельников ; правообладатель

ФГБОУ ВО Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (RU). № 202061250. Заявл. 11.03.2020 ; опубл. 13.03.2020.

19. Свидетельство 2020613742. Программный модуль компенсации ошибок определения скорости РБЛА / В. А. Миронов, А. М. Исаев, М. А. Исаев, И. В. Стручков, А. Д. Бушуров, Р. А. Воронкин, Д. С. Елагин, Е. И. Парменов, С. В. Мельников ; правообладатель ФГБОУ ВО Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (RU). № 2020612504. Заявл. 11.03.2020 ; опубл. 23.03.2020.

20. Свидетельство 2020613445. Имитационная модель идентификации закона распределения случайных величин в транссионосферных каналах связи / Г. И. Линец, С. В. Мельников, Д. А. Михайлов, А. М. Исаев ; правообладатель ФГБОУ ВО Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (RU). № 2020612505. Заявл. 11.03.2020 ; опубл. 16.03.2020.

21. Свидетельство 2020614042. Имитационная модель определения оптимальных порогов классификации состояния транссионосферного канала при распределении случайных величин по закону Райса / Г. И. Линец, С. В. Мельников, Д. А. Михайлов, А. М. Исаев ; правообладатель ФГБОУ ВО Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (RU). № 2020612667. Заявл. 11.03.2020 ; опубл. 25.03.2020.

22. Свидетельство 2020614250. Имитационная модель определения оптимальных порогов классификации состояния транссионосферного канала при распределении случайных величин по закону Накагами / Г. И. Линец, С. В. Мельников, Д. А. Михайлов, А. М. Исаев ; правообладатель ФГБОУ ВО Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего

образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (RU). № 2020612518. Заявл. 11.03.2020 ; опубл. 27.03.2020.

23. Linets G., Melnikov S., Mironov V. Optimizing Classification Thresholds of Status of Transionospheric Communication Channel for Decreased Quadrocopter's Positioning Errors // Proceedings of the 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2019). (Ufa, Russia, May 28–29, 2019) / USATU. Ufa, 2019. С. 212–218

24. Сагдеев К. М., Линец Г. И., Мельников С. В. Способ определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия на приемник РБЛА // Студенческая наука для развития информационного общества : сборник материалов X Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. 2019. С. 8–16

25. Мельников С. В. Определение ошибок первого и второго рода классификации состояния транспортных телекоммуникационных систем при распределении признаков по закону Райса // Студенческая наука для развития информационного общества : сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции. Ставрополь, 2018. С. 17–25.

26. Мельников С. В., Линец Г. И. Оптимизация порогов классификации состояния трансионосферных каналов связи для обеспечения точности позиционирования РБЛА при замираниях Накагами [Электронный ресурс] // Сборник тезисов докладов по итогам Национального СуперКомпьютерного форума (23-26 ноября 2019 г., Переславль-Залесский). URL:[http://2019.nscf.ru/TesisAll/06\\_Prikladnoe\\_PO/036\\_MelnikovSV.pdf](http://2019.nscf.ru/TesisAll/06_Prikladnoe_PO/036_MelnikovSV.pdf) (дата обращения: 14.08.2020)

27. Способ определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия на приемник РБЛА [Электронный ресурс] / К. М. Сагдеев, Г. И. Линец, С. В. Мельников, А. М. Исаев, М. А. Исаев // Сборник тезисов докладов по итогам Национального СуперКомпьютерного форума (23-26 ноября 2019 г., Переславль-Залесский).

URL:[http://2019.nscf.ru/TesisAll/06\\_Prikladnoe\\_PO/035\\_MelnikovSV.pdf](http://2019.nscf.ru/TesisAll/06_Prikladnoe_PO/035_MelnikovSV.pdf) (дата обращения: 14.08.2020)

28. Линец Г. И., Никулин В. И., Мельников С. В. Выбор критерия идентификации закона распределения случайных величин трансферных каналов связи // XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства : сборник тезисов : в 2 т.. Москва, 2020. С. 254–256.

29. Оптимизация порогов классификации системы идентификации состояния транспортных телекоммуникационных систем / Г. И. Линец, С. В. Мельников, И. Д. Бонкин, И. А. Шуточкин // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2017. Т. 7. № 2. С. 220–224.

30. Программно-аппаратный комплекс имитационного моделирования полета мультироторного беспилотного летательного аппарата / А. М. Исаев, М. А. Исаев, Г. И. Линец // Студенческая наука для развития информационного общества : сборник материалов X Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Ч. 1. – Ставрополь : Ставрополь : Изд-во СКФУ, 2019. – С. 17–25.

31. Развитие рынка беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс] // EY: Building a better working. URL:[https://www.ey.com/ru\\_ru/news/2020/05/ey-uav-survey-18052020](https://www.ey.com/ru_ru/news/2020/05/ey-uav-survey-18052020) (дата обращения: 14.08.2020)

32. Федосеева Н. А., Загвоздкин М. В. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов // Научный журнал. 2017. № 9 (22). С. 26–29

33. Анализ компании рынка Аэронет - производителей и эксплуатантов беспилотных авиационных систем [Электронный ресурс] // Официальный сайт рабочей группы Аэронет. URL:<http://nti-aeronet.ru/wp->



<content/uploads/2020/03/Analiz-kompanij-rynka-Ajeronet-proizvoditelej-i-jekspluatantov-bespilotnyh-aviacionnyh-sistem.pdf> (дата обращения: 14.08.2020).

34. Ростопчин В., Бурдун И. Беспилотные авиационные системы: основные понятия // Электроника: наука, технология, бизнес. 2009. № 4. С. 82–88

35. Церна И. Состояние и регулирование международного рынка беспилотных летательных аппаратов // Актуальные проблемы экономики и права. 2016. Т. 10. № 3. С. 92–100.

36. Квадрокоптеры «Феникс» [Электронный ресурс] // БГ Оптикс. Интеллектуальные системы и технологии для надежной охраны объектов и территорий. URL:<https://bg-optics.ru/phoenix.html> (дата обращения: 14.08.2020).

37. Квадрокоптер DS700 [Электронный ресурс] // Dronestroy. Профессиональные коптеры. URL:<https://dronestroy.ru/catalog/copters/kvadrokopter-ds700/> (дата обращения: 14.08.2020).

38. Пеликан [Электронный ресурс] // Коптер Экспресс. URL:<https://ru.coex.tech/pelican> (дата обращения: 14.08.2020).

39. Gemini [Электронный ресурс] // Geoscan. URL:<https://www.geoscan.aero/ru/products/gemini> (дата обращения: 14.08.2020).

40. Комплекс с БЛА «Альбатрос» [Электронный ресурс] // Стилсофт. URL:<https://stilsoft.ru/products/Albatros> (дата обращения: 14.08.2020).

41. Hawker Q800X [Электронный ресурс] // Aeraccess. URL:<https://www.aeraccess-group.com/product/outdoor/hawker-q800x.html> (дата обращения: 14.08.2020).

42. Skeyetech [Электронный ресурс] // Azur Drones. URL:<https://www.azurdrones.com/product/skeyetech/> (дата обращения: 14.08.2020).

43. Smart aerial monitoring system (SAMS) [Электронный ресурс] // Icaros.Remote Sensing Solutions. URL:<https://icarosgeospatial.com/sams/> (дата обращения: 14.08.2020).

44. Mavic Air 2 [Электронный ресурс] // DJI. URL:<https://www.dji.com/ru/mavic-air-2/specs> (дата обращения: 14.08.2020).

45. van Diggeken F. GPS and GPS+GLONASS RTK [Электронный ресурс] // Geneva International Centre for Humanitarian Demining. URL:[https://www.gichd.org/fileadmin/pdf/LIMA/RTK\\_survey2.pdf](https://www.gichd.org/fileadmin/pdf/LIMA/RTK_survey2.pdf) (дата обращения: 14.08.2020).

46. Проявление магнито-ориентированных ионосферных плазменных возмущений на средних широтах / Э. Л. Афраимович, Э. И. Астафьева, Е. А. Косоголов, Ю. В. Ясюкевич // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений : сб. науч. тр. по материалам V междунар. конф. (с. Паратунка, Камчат. край, 2–7 авг. 2010 г.) / отв. ред. Б.М. Шевцов, В.В. Богданов. – Петропавловск-Камчатский : ИКИР ДВО РАН, 2010. – С. 250–254

47. Critical infrastructures [Электронный ресурс] // Azur drones. URL:<https://www.azurdrones.com/critical-infrastructures/> (дата обращения: 14.08.2020).

48. Степанов Д. Н. Методы и алгоритмы определения положения и ориентации беспилотного летательного аппарата с применением бортовых видеокамер // Программные продукты и системы. 2014. №1 (105). С. 150–157

49. Семенова Л. Л. Современные методы навигации беспилотных летательных аппаратов // Наука и образование сегодня. 2018. №4 (27). С. 6–8

50. Суворов М. А. Анализ вариантов интегрированных навигационных систем [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования : электронный научный журнал. 2015. № 1–1. С. URL:<https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19414> (дата обращения: 14.08.2020).

51. Performance Based Navigation Sub-Group [Электронный ресурс] // ИКАО. Объединение авиации. URL:<https://www.icao.int/MID/Documents/2018/PBN%20SG3/IP3.pdf> (дата обращения: 14.08.2020).

52. Комраков Д. В. Контроль целостности навигационной информации в глобальных навигационных спутниковых системах // Проблемы техногенной

безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. молодых ученых, аспирантов и студентов / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2014. Вып. V. С. 214–218.

53. Мелешко В. В., Нестеренко О. И. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы : учебное пособие. – Кировоград : б. и., 2011. 171 с.

54. Матвеев В. В. Исследование погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы высокодинамичного летательного аппарата // Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. № 12–1. С. 165–173

55. Бойков Д. В. Алгоритм автономного контроля целостности навигационного поля // Технические науки в России и за рубежом. 2014. С. 27–32

56. Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации / М. А. Литвин А. А. Малюгина, А. Б. Миллер, А. Н. Степанов Д. Е. Чикрин // ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. – М. : Радиотехника, 2010. С. 326–339

57. Фокин Л. А., Ширяев В. И., Подвилова Е. О. Об анализе погрешностей интегрированной навигационной системы и методах их оценивания // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2012. № 35 (17). С. 127–134.

58. Иванов В. Б., Гефан Г. Д., Горбачев О. А. Исследование глобальной статистической модели полного электронного содержания в ионосфере, основанной на методе естественных ортогональных функций и предназначенной для систем спутниковой навигации // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. Т. 36. № 4. – С. 154–160.

59. Бандура А. С., Скобелин А. А., Ткалич В. Л. Сравнительный анализ моделей учета поправок на распространение сигналов космических аппаратов в тропосфере // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 40. С. 187–191

60. Максименко В. Н., Ухин Д. А. Анализ уязвимостей каналов связи спутниковых навигационных систем lbs-услуги // Экономика и качество систем связи. 2019. № 1 (11). С. 18–22

61. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография в 2 т. Т. 1. – М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2005. 334 с.
62. Костромицкий С. М., Дятко А. А., Шумский П. Н. Создание эффективных помех системам глобальной навигации // Базис. 2019. № 1 (5). С. 14–20
63. Ван дер Зил. Шум (источники описание измерение). – М.: Сов. радио, 1973. 228 с.
64. Болденков Е. Н. Лекции по курсу «Основы построения навигационной аппаратуры потребителей СРНС» [Электронный ресурс] // Портал Лаборатории Навигационных Систем и кафедры РТС НИУ МЭИ. URL:[https://sns.ru/hw/images/e/e1/2013\\_ЭУМК\\_С3.33\\_Лекции\\_АП\\_СРНС.pdf](https://sns.ru/hw/images/e/e1/2013_ЭУМК_С3.33_Лекции_АП_СРНС.pdf) (дата обращения: 14.08.2020).
65. Бойко А. Системы обнаружения и нейтрализации беспилотников [Электронный ресурс] // RoboTrends. URL:<http://robotrends.ru/robopedia/sistemy-obnaruzheniya-i-nyaytralizacii-bespilotnikov> (дата обращения: 14.08.2020).
66. Российская Федерация. Министерство промышленности и торговли. Об утверждении радионавигационного плана Российской Федерации и о признании утратившими силу приказов Минпромторга России от 02 сентября 2008 г., № 118 и от 31 августа 2011 г. № 1177 : Приказ Минпромторга России от 28 июля 2015 г. № 2123. // URL:<https://minpromtorg.gov.ru/common/upload/docVersions/5a724ff99f35b/actual/2123.PDF> (дата обращения: 14.08.2020).
67. Точность измерений псевдодальностей ГЛОНАСС [Электронный ресурс] // Российская система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ). URL:<http://www.sbcm.ru/smglo/errs?version=rus&replate&site=extern> (дата обращения: 14.08.2020).
68. Федеральная целевая программа № 05.578.21.0270 «Разработка роботизированного беспилотного летательного аппарата мультироторного типа с

использованием бесплатформенной инерциальной навигационной системы» (шифр заявки 2018-14-000-0001-255) : утв. Министерством науки и высшего образования Российской Федерации от 20.12.2018 // URL:[http://www.fcpir.ru/participation\\_in\\_program/contracts/05.578.21.0270/](http://www.fcpir.ru/participation_in_program/contracts/05.578.21.0270/) (дата обращения: 14.08.2020).

69. Алгоритмы автономного группового управления горизонтальными движениями БЛА / А. Р. Гайдук, А. А. Дьяченко, С. Г. Капустян, Е. А. Плаксиенко // Научный вестник НГТУ. 2017. Т. 67. № 2. С. 120–124

70. Система автономного управления маневрами БЛА / А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян, А. А. Дьяченко, Е. А. Плаксиенко // Системный анализ, управление и обработка информации : труды VII Международного научного семинара (п. Дивноморское, 6–12 октября 2016 г.) / под общ. ред. Р.А. Нейдорфа. – Ростов н/Д., 2016. – С. 24–30

71. Ahmed B., Flight control of a rotary wing UAV using backstepping / Ahmed B., Pota H. R., Garratt M. // International Journal of Robust and Nonlinear Control. 2009. №. 20. С. 639–658.

72. Gaiduk A. R, Kapustyan S. G., Shapovalov I. O. Self-organization in groups of intelligent robots // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2015. №. 345. С. 171–181.

73. Пшихопов В. Х. Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 3 (104). С. 187–196.

74. Гайдук А. Р., Медведев М. Ю., Плаксиенко Е. А. Синтез грубых систем группового управления роботами // Наука и образование на рубеже тысячелетий : сборник научно-исследовательских работ / Кисловодский гуманитарно-технологический институт. – Кисловодск, 2016. Вып. 1. С. 6–23

75. Рекомендация МСЭ-R P. 531-12 (09/2013) Данные об ионосферном распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования спутниковых служб и систем [Электронный ресурс] //

Международный союз электросвязи. [URL:https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.531-12-201309-S!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.531-12-201309-S!!PDF-R.pdf) (дата обращения: 30.04.2020).

76. Евстратов А. Г., Пустовойтов Е. Л. Расчет влияния мешающего радиосигнала на приемник цифровой системы радиосвязи при известных законах распределения быстрых и медленных замираний полезного и мешающего радиосигналов // Т-Comm. 2014. № 5. С. 50–55

77. Статистический анализ и методика оценки надежности радиоканалов по помехоустойчивости при наличии замираний сигнала / В. В. Зеленевский, А. В. Зеленевский, В. В. Кургузов, М. С. Черноусов, Б. М. Наконечный // Известия Института инженерной физики. 2020. № 3 (57). С. 13–17

78. Тяпкин В. Н., Гарин Е. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. 260 с.

79. Фатеев Ю. Л., Курносов А. С. Исследование одночастотного метода определения вертикальной задержки сигнала в ионосфере // Сибирский журнал науки и технологий. 2016. № 4. С. 44–47

80. Романова Н. Ю. Определение параметров анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы // Physics of Auroral Phenomena. 2015. №. 38. P. 157–160

81. Насыров А. М., Насыров И. А. Развитие искусственных мелкомасштабных неоднородностей при модификации ионосферы мощным наклонным радиоизлучением // Фундаментальные исследования. 2005. № 10. С. 87–87

82. Фатеев Ю. Л., Курносов А. С. Сравнительный анализ методов определения задержки сигнала в ионосфере // Научные технологии. 2016. Т. 17. № 8. С. 44–47

83. Системы функциональных дополнений глобальных навигационных спутниковых систем [Электронный ресурс] // Информационно-аналитический

центр координатно-временного и навигационного обеспечения.  
URL:[https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/function\\_dop.php](https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/function_dop.php) (дата обращения: 14.08.2020).

84. Анализ прикладных моделей ионосферы для расчета распространения радиоволн и возможность их использования в интересах радиолокационных систем. I. Классификация прикладных моделей и основные требования, предъявляемые к ним в интересах радиолокационных средств //Аксенов О. Ю., Козлов С. И., Ляхов А. Н., Трекин В. В., Перунов Ю. М., Якубовский С. В. // Солнечно-земная физика. 2020. № 6. С. 86–96

85. Наконечный Г. В., Гальямов А. М., Петренко С. В. Использование моделей компенсации погрешностей для получения оптимальных характеристик навигационных решений // Наука и бизнес : пути развития. 2019. № 4 (94). С. 104–109

86. Фам Хоанг Лонг Разработка методики учета влияния ионосферы при GPS - измерениях на территории Вьетнама : дис. ... на канд. техн. наук.: 25.00.32/ Фам Хоанг Лонг Москва, 2014. 141 с.

87. Методы диагностики характеристик ионосферы для заданного региона и коррекция моделей ионосферы в интересах повышения точности прогнозирования распространения радиоволн декаметрового диапазона // В. И. Арефьев, М. К. Кочерова, А. Б. Талалаев, В. В. Тихонов // Вестник тверского государственного университета. Серия: прикладная математика Издательство: Тверской государственный университет. 2016. № 1. С. 33–51

88. Беккер С. З. Вероятностно-статистические модели нижней невозмущенной среднеширотной ионосферы, верифицированные по данным наземных радиофизических измерений : дис. ... канд. физ.-мат. наук.: 25.00.29/ Беккер Сусанна Зейтуллаевна Москва, 2018. 129 с.

89. Пат. 2586076 Российская Федерация, МПК G 01 S 13/84. Способ обнаружения несанкционированного воздействия на точностные характеристики космических навигационных систем / И. А. Гладков, В. В.

Василенко, М. Н. Зубчик ; заявитель и патентообладатель ФГБУ «4 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации. № 2014154045/07 ; заявл. 29.12. 14 ; опубл. 10.06.16, Бюл. № 16.

90. Пат. 2671238 Российская Федерация, МПК G01S 7/36. Способ обнаружения преднамеренных помех НАП ГНСС / А. В. Журавлев, В. Г. Маркин, В. А. Шуваев, Е. М. Красов, А. Ф. Иванов ; заявитель и патентообладатель АОНВП «Протек». № 2017143741 ; заявл. 13.12.17 ; опубл. 30.10.18, Бюл. № 31.

91. Соболев С. П. Методы оценки и контроля целостности бортового навигационного оборудования спутниковой системы посадки : дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2007. 179 с.

92. Mur-Artal R., Montiel J. M. M., Tardos J. D. ORB-SLAM: A versatile and accurate monocular SLAM system // IEEE Transactions on Robotics. 2015. № 31 (5). С. 1147–1163.

93. Mur-Artal R., Tardos J. D. ORB-SLAM 2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras // IEEE Transactions on Robotics. 2017. № 33 (5). С. 1255–1262.

94. Klein G., Murray D. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces // Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (Washington, DC, USA. 13–16 November 2007). С. 1–10.

95. Гряник В. Н., Павликов С. Н., Убанкин Е. И. Средства радиоэлектронного наблюдения. – Владивосток : ВГУЭС, 2006. 200 с.

96. Линец Г. И. Методы структурно-параметрического синтеза, идентификации и управления транспортными телекоммуникационными сетями для достижения максимальной производительности. – Ставрополь : Издательско-информационный центр «Фабула», 2014. 384 с.

97. u-blox 8 / u-blox M8. Receiver description. Including protocol specification [Электронный ресурс] // IoT Security. URL:<https://www.u-blox.com>



[blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox8-](http://blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox8-)

[M8\\_ReceiverDescrProtSpec\\_%28UBX-13003221%29.pdf](#)

(дата обращения:

14.08.2020).

98. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. – М. : Физматлит, 2006. 816 с.

99. Лагутин М. Б. Наглядная математическая статистика : учебное пособие, 3-е изд., испр. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. 472 с.

100. Вожов С. С., Чимитова Е. В. Проверка гипотезы о виде распределения по интервальным данным // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2016. № 1 (34). С. 35–42

101. On some goodness-of-fit tests and their connection to graphical methods with uncensored and censored data / С. Castro-Kuriss, М. Huerta, V. Leiva, А. Tapia // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. № 1001. С. 157–183

102. ГОСТ Р 50.1.037-2002. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть II. Непараметрические критерии : рекомендации по стандартизации : внесены Техническим комитетом по стандартизации ТК 125 «Стандартизация статистических методов управления качеством» : введен впервые : дата введения 2002-07-01 / разработан Новосибирским государственным техническим университетом, доработаны с участием Технического комитета по стандартизации ТК 125 "Стандартизация статистических методов управления качеством". – М. : Изд-во стандартов. 2002. 64 с.

103. Кас М., Kiefer J., Wolfowitz J. On tests of normality and other tests of goodness of fit based on distance methods // The annals of mathematical statistics. 1955. № 26. С. 189-211.

104. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. – М: Радиотехника, 2010. С. 362–367.

105. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2. Редакция 5.1. [Электронный ресурс] // Российские космические системы. URL:[http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD\\_GLONASS\\_rus\\_v5.1.pdf](http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf) (дата обращения: 18.08.2020).

106. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал открытого доступа с кодовым разделением в диапазоне L3. Редакция 1.0. [Электронный ресурс] // Российские космические системы. URL:<http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/IKD-L3-s-kod.-razd.-Red-1.0-2016.pdf> (дата обращения: 18.08.2020).

107. Кукушкин С. Алгоритм обнаружения несанкционированного воздействия на точностные характеристики КНС / С. С. Кукушкин, И. А. Гладков // Двойные технологии. 2008. № 1. С. 13–15.

108. Кукушкин С. С. Оценка состояния навигационного поля космических навигационных систем / С. С. Кукушкин, И. А. Гладков // Двойные технологии. 2008. № 3. С. 4–11.

109. Гладков И. А. Применение полиномов Лагранжа в задачах контроля состояния навигационного поля [Электронный ресурс] // Персональный сайт Игоря Александровича Гладкова. URL:<http://gladkov35.ru/sboy-navigatsii/> (дата обращения 12.12.2019)

110. Bishop C. M. Pattern recognition and machine learning. – New York : Springer Science + Business Media, 2006. 758 с.

111. Дьяконов А. Г. Байесовский подход. Анализ малых данных [Электронный ресурс] // Квазинаучный блог Александра Дьяконова. URL:<https://dyakonov.org/2018/07/30> (дата обращения 18.12.2019)

112. ГОСТ 31379-2009. Глобальные навигационные спутниковые системы. Приемник персональный. Технические требования: межгосударственный

стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 июля 2011 г. N 192-ст : введен впервые : дата введения 2011-10-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием "Научно-технический центр современных навигационных технологий "Интернавигация" (ФГУП "НТЦ "Интернавигация"). – М. : Стандартинформ, 2011. 10 с.

113. Ульянова Ю. Е., Бабенко Р. Г., Чернов А. В. Частотно-временные преобразования, используемые в цифровой обработке сигналов / Ю. Е. Ульянова, Р. Г. Бабенко, А. В. Чернов // Глобальная ядерная безопасность. 2015. № 3 (16). С. 36–42.

114. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung, H. H. Liu // Proceedings of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences. 1998. №. 454. С. 903–995.

115. Непомнящий Г. А. Адаптивное обнаружение сигнала на фоне нестационарной помехи // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2011. № 23 (240). С.120–123.

116. Храменков А. С., Ярмолик С. Н. Сопоставительный анализ радиолокационных обнаружителей, основанных на критерии Неймана Пирсона и последовательном критерии отношения вероятностей // Доклады БГУИР. 2013. № 6 (76). С. 72–78

117. Тыртышников Е. Е. Методы численного анализа – М. : Академия, 2007. 320 с.

118. Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков. Г. М. Численные Методы. 6-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 636 с.

119. Поляк Б. Т. Метод Ньютона и его роль в оптимизации и вычислительной математике // Труды ИСА РАН. 2006. № 28. С. 48–66

120. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. 10-е изд., стер.– М.: Academia, 2005. 576 с.

121. Функции Бесселя : учебно-методическое пособие / Сост.: В. И. Зубов. М. : МФТИ, 2007. 51 с.
122. Пономаренко А. В. Разработка модельной реализации функций Бесселя из стандарта LSB // Труды ИСП РАН. 2006. № 10. С. 115–142
123. Laurenson D. Indoor radio channel propagation modelling by ray tracing techniques : PhD Doctor of Philosophy. – Edinburgh, 1994. 171 с.
124. Nakagami M. The m-Distribution, a general formula of intensity of rapid fading // Statistical Methods in Radio Wave Propagation : Proceedings of a Symposium (June 18-20, 1958). – Oxford : Pergamon Press, 1960. С. 3–36.
125. Parsons J. D. The mobile radio propagation channel. – New York : Wiley, 1992. 433 с.
126. Костылев В. И. Анализ эффективности энергетического обнаружения радиосигнала со случайной амплитудой Накагами // Вестник ВГУ. Серия: физика, математика. 2001. № 2. С. 16–20.
127. Сидоркина Ю. А., Антипов В. В. Обнаружение сигнала с неизвестными временным положением и частотой // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 222 (12). С. 67–71.
128. Орощук И. М., Долгих В. Н., Сучков А. Н. Вероятностные характеристики пространственно-корреляционного метода обнаружения сигналов в декаметровом диапазоне [Электронный ресурс] // Журнал радиоэлектроники. 2013. № 12. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec13/5/text.html> (дата обращения 18.08.2020)
129. Миронов В. А. Определение характеристик обнаружения радиолокационных сигналов на фоне пассивных помех в морских условиях // Системи обробки інформації. 2010. № 1 (82). С. 90–94.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Аксенов, О. Ю. Анализ прикладных моделей ионосферы для расчета распространения радиоволн и возможность их использования в интересах радиолокационных систем. I. Классификация прикладных моделей и основные требования, предъявляемые к ним в интересах радиолокационных средств // О. Ю. Аксенов, С. И. Козлов, А. Н. Ляхов, В. В. Трекин, Ю. М. Перунов, С. В. Якубовский // Солнечно-земная физика. – 2020. – № 6. – С. 86–96
2. Анализ компании рынка Аэронет - производителей и эксплуатантов беспилотных авиационных систем [Электронный ресурс] // Официальный сайт рабочей группы Аэронет : [сайт]. – Режим доступа: <http://nti-aeronet.ru/wp-content/uploads/2020/03/Analiz-kompanij-rynka-Ajeronet-proizvoditelej-i-jekspluatantov-bespilotnyh-aviacionnyh-sistem.pdf> (дата обращения: 14.08.2020).
3. Антонович, К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии : монография в 2 т. Т. 1 / К. М. Антонович. – М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – 334 с.
4. Арефьев, В. И. Методы диагностики характеристик ионосферы для заданного региона и коррекция моделей ионосферы в интересах повышения точности прогнозирования распространения радиоволн декаметрового диапазона // В. И. Арефьев, М. К. Кочерова, А. Б. Талалаев, В. В. Тихонов // Вестник тверского государственного университета. Серия: прикладная математика. Издательство: Тверской государственный университет. – 2016. – № 1. – С. 33–51
5. Афраймович, Э. Л. Проявление магнито-ориентированных ионосферных плазменных возмущений на средних широтах / Э. Л. Афраймович, Э. И. Астафьева, Е. А. Косогоров, Ю. В. Ясюкевич // Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений : сб. науч. тр. по материалам V междунар.

конф. (с. Паратунка, Камчат. край, 2–7 авг. 2010 г.) / отв. ред. Б.М. Шевцов, В.В. Богданов. – Петропавловск-Камчатский : ИКИР ДВО РАН, 2010. – С. 250–254

6. Баженов, А. В. Применение беспилотных летательных аппаратов для радиолокационного поиска воздушных и морских судов, потерпевших аварию / А. В. Баженов, Н. В. Гривенная, А. М. Исаев, С. В. Мельников // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – № 2. – С. 212–230.

7. Бандура, А. С. Сравнительный анализ моделей учета поправок на распространение сигналов космических аппаратов в тропосфере / А. С. Бандура, А. А. Скобелин, В. Л. Ткалич // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2007. – № 40. – С. 187–191

8. Бахвалов, Н. С. Численные Методы / Н. С. Бахвалов, Н. П. Жидков, Г. М. Кобельков. 6-е изд. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 636 с.

9. Беккер, С. З. Вероятностно-статистические модели нижней невозмущенной среднеширотной ионосферы, верифицированные по данным наземных радиофизических измерений : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 25.00.29 / Беккер Сусанна Зейтуллаевна ; ИДГ РАН. – М., 2018. – 129 с.

10. Бойко, А. Системы обнаружения и нейтрализации беспилотников [Электронный ресурс] / А. Бойко // RoboTrends : [сайт]. – Режим доступа: <http://robotrends.ru/robopedia/sistemy-obnaruzheniya-i-nyaytralizacii-bespilotnikov> (дата обращения: 14.08.2020).

11. Бойков, Д. В. Алгоритм автономного контроля целостности навигационного поля / Д. В. Бойков // Технические науки в России и за рубежом. 2014. С. 27–32

12. Болденков, Е. Н. Лекции по курсу «Основы построения навигационной аппаратуры потребителей СРНС» [Электронный ресурс] / Е. Н. Болденков // Портал Лаборатории Навигационных Систем и кафедры РТС НИУ МЭИ : [сайт]. – Режим доступа: [https://srns.ru/hw/images/e/e1/2013\\_ЭУМК\\_С3.33\\_Лекции\\_АП\\_СРНС.pdf](https://srns.ru/hw/images/e/e1/2013_ЭУМК_С3.33_Лекции_АП_СРНС.pdf) (дата обращения: 14.08.2020).

13. Ван дер Зил, А. Шум (источники описание измерение) / А. Ван дер Зил. – М.: Советское радио, 1973. – 228 с.
14. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. 10-е изд., стер.– М.: Academia, 2005. – 576 с.
15. Вожов, С. С. Проверка гипотезы о виде распределения по интервальным данным / С. С. Вожов, Е. В. Чимитова // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2016. – № 1 (34). – С. 35–42
16. Гайдук, А. Р. Алгоритмы автономного группового управления горизонтальными движениями БЛА / А. Р. Гайдук, А. А. Дьяченко, С. Г. Капустян, Е. А. Плаксиенко // Научный вестник НГТУ. – 2017. – Т. 67. – № 2. – С. 120–124
17. Гайдук, А. Р. Система автономного управления маневрами БЛА / А. Р. Гайдук, С. Г. Капустян, А. А. Дьяченко, Е. А. Плаксиенко // Системный анализ, управление и обработка информации : труды VII Международного научного семинара (п. Дивноморское, 6–12 октября 2016 г.) / под общ. ред. Р.А. Нейдорфа. – Ростов н/Д., 2016. – С. 24–30
18. Гайдук, А. Р., Медведев М. Ю., Плаксиенко Е. А. Синтез грубых систем группового управления роботами / А. Р. Гайдук, М. Ю. Медведев, Е. А. Плаксиенко // Наука и образование на рубеже тысячелетий : сборник научно-исследовательских работ/ Кисловодский гуманитарно-технологический институт. – Кисловодск, 2016. – Вып. 1. – С. 6–23
19. Гладков, И. А. Применение полиномов Лагранжа в задачах контроля состояния навигационного поля [Электронный ресурс] / И. А. Гладков // Персональный сайт Игоря Александровича Гладкова [сайт]. – Режим доступа: <http://gladkov35.ru/sboy-navigatsii/> (дата обращения 12.12.2019)
20. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2. Редакция 5.1. [Электронный ресурс] // Российские

космические системы [сайт]. – Режим доступа: [http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD\\_GLONASS\\_rus\\_v5.1.pdf](http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf) (дата обращения: 18.08.2020).

21. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал открытого доступа с кодовым разделением в диапазоне L3. Редакция 1.0. [Электронный ресурс] // Российские космические системы [сайт]. – Режим доступа: <http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/IKD-L3-s-kod.-razd.-Red-1.0-2016.pdf> (дата обращения: 18.08.2020).

22. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. – М: Радиотехника, 2010. – С. 362–367.

23. ГОСТ 31379-2009. Глобальные навигационные спутниковые системы. Приемник персональный. Технические требования: межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 20 июля 2011 г. N 192-ст : введен впервые : дата введения 2011-10-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием "Научно-технический центр современных навигационных технологий "Интернавигация" (ФГУП "НТЦ "Интернавигация"). – М. : Стандартиформ, 2011. – 10 с.

24. ГОСТ Р 50.1.037-2002. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть II. Непараметрические критерии : рекомендации по стандартизации : внесены Техническим комитетом по стандартизации ТК 125 «Стандартизация статистических методов управления качеством» : введен впервые : дата введения 2002-07-01 / разработан Новосибирским государственным техническим университетом, доработаны с участием Технического комитета по стандартизации ТК 125 "Стандартизация статистических методов управления качеством". – М. : Изд-во стандартов. 2002. – 64 с.



25. Гряник, В. Н. Средства радиоэлектронного наблюдения / В. Н. Гряник, С. Н. Павликов, Е. И. Убанкин. – Владивосток : ВГУЭС, 2006. – 200 с.
26. Дьяконов, А. Г. Байесовский подход. Анализ малых данных [Электронный ресурс] / А. Г. Дьяконов // Квазинаучный блог Александра Дьяконова [сайт]. – Режим доступа: <https://dyakonov.org/2018/07/30> (дата обращения 18.12.2019)
27. Евстратов, А. Г. Расчет влияния мешающего радиосигнала на приемник цифровой системы радиосвязи при известных законах распределения быстрых и медленных замираний полезного и мешающего радиосигналов / А. Г. Евстратов, Е. Л. Пустовойтов // Т-Comm. – 2014. – № 5. – С. 50–55
28. Зеленевский, В. В. Статистический анализ и методика оценки надежности радиоканалов по помехоустойчивости при наличии замираний сигнала / В. В. Зеленевский, А. В. Зеленевский, В. В. Кургузов, М. С. Черноусов, Б. М. Наконечный // Известия Института инженерной физики. – 2020. – № 3 (57). – С. 13–17
29. Иванов В. Б., Исследование глобальной статистической модели полного электронного содержания в ионосфере, основанной на методе естественных ортогональных функций и предназначенной для систем спутниковой навигации / В. Б. Иванов, Г. Д. Гефан, О. А. Горбачев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. – Т. 36. – № 4. – С. 154–160.
30. Исаев, А. М. Программно-аппаратный комплекс имитационного моделирования полета мультироторного БЛА / А. М. Исаев, Г. И. Линец, М. А. Исаев, С. В. Мельников // Инфокоммуникационные технологии. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 177–187.
31. Исаев, А. М. Программно-аппаратный комплекс имитационного моделирования полета мультироторного беспилотного летательного аппарата / А. М. Исаев, М. А. Исаев, Г. И. Линец // Студенческая наука для развития информационного общества : сборник материалов X Всероссийской научно-

технической конференции с международным участием. Ч. 1. – Ставрополь : Ставрополь : Изд-во СКФУ, 2019. – С. 17–25.

32. Квадрокоптер DS700 [Электронный ресурс] // Dronestroy. Профессиональные коптеры[сайт]. – Режим доступа: <https://dronestroy.ru/catalog/copters/kvadrokopter-ds700/> (дата обращения: 14.08.2020).

33. Квадрокоптеры «Феникс» [Электронный ресурс] // БГ Оптикс. Интеллектуальные системы и технологии для надежной охраны объектов и территорий [сайт]. – Режим доступа: <https://bg-optics.ru/phoenix.html> (дата обращения: 14.08.2020).

34. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика / А. И. Кобзарь. – М. : Физматлит, 2006. 816 с.

35. Комплекс с БЛА «Альбатрос» [Электронный ресурс] // Стилсофт [сайт]. – Режим доступа: <https://stilsoft.ru/products/Albatros> (дата обращения: 14.08.2020).

36. Комраков, Д. В. Контроль целостности навигационной информации в глобальных навигационных спутниковых системах / Д. В. Комраков // Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития : сб. науч. ст. молодых ученых, аспирантов и студентов / Тамб. гос. техн. ун-т. – Тамбов, 2014. – Вып. V. – С. 214–218.

37. Костромицкий, С. М. Создание эффективных помех системам глобальной навигации / С. М. Костромицкий, А. А. Дятко, П. Н. Шумский // Базис. – 2019. – № 1 (5). – С. 14–20.

38. Костылев, В. И. Анализ эффективности энергетического обнаружения радиосигнала со случайной амплитудой Накагами / В. И. Костылев // Вестник ВГУ. Серия: физика, математика. – 2001. – № 2. – С. 16–20.

39. Кукушкин, С. С. Алгоритм обнаружения несанкционированного воздействия на точностные характеристики КНС / С. С. Кукушкин, И. А. Гладков // Двойные технологии. – 2008. – № 1. – С. 13–15.

40. Кукушкин, С. С. Оценка состояния навигационного поля космических навигационных систем / С. С. Кукушкин, И. А. Гладков // Двойные технологии. – 2008. – № 3. – С. 4–11.
41. Лагутин, М. Б. Наглядная математическая статистика : учебное пособие / М. Б. Лагутин. 3-е изд., испр. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. – 472 с.
42. Линец, Г. И. Алгоритм определения начальных координат роботизированного беспилотного летательного аппарата в условиях искажения навигационного поля / Г. И. Линец, С. В. Мельников, О. Х. Шаяхметов, А. М. Исаев, М. А. Исаев // Современная наука и инновации. – 2020. – № 2 (30). – С. 17–28.
43. Линец, Г. И. Выбор критерия идентификации закона распределения случайных величин трансферных каналов связи / Г. И. Линец, В. И. Никулин, С. В. Мельников // XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства : сборник тезисов : в 2 т.. Москва, 2020. – С. 254–256.
44. Линец, Г. И. Критерий идентификации вероятностной модели состояния спутниковых каналов связи / Г. И. Линец, С. В. Мельников // Современная наука и инновации. – 2020. – № 2 (30). – С. 32–40.
45. Линец, Г. И. Методы структурно-параметрического синтеза, идентификации и управления транспортными телекоммуникационными сетями для достижения максимальной производительности / Г. И. Линец. – Ставрополь : Издательско-информационный центр «Фабула», 2014. – 384 с.
46. Линец, Г. И. Оптимизация порогов классификации системы идентификации состояния транспортных телекоммуникационных систем / Г. И. Линец, С. В. Мельников, И. Д. Бонкин, И. А. Шуточкин // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. – 2017. – Т. 7. – № 2. – С. 220–224.

47. Линец, Г. И. Оптимизация порогов классификации состояния трансферных каналов связи, описываемых распределением Накагами / Г. И. Линец, С. В. Мельников // Известия Института инженерной физики. – 2020. – № 3 (57). – С. 29–33

48. Литвин М. А. Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации / М. А. Литвин, А. А. Малюгина, А. Б. Миллер, А. Н. Степанов Д. Е. Чикрин // ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. – М. : Радиотехника, 2010. – С. 326–339

49. Максименко, В. Н. Анализ уязвимостей каналов связи спутниковых навигационных систем lbs-услуги / В. Н. Максименко, Д. А. Ухин // Экономика и качество систем связи. – 2019. – № 1 (11). – С. 18–22

50. Матвеев, В. В. Исследование погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы высокодинамичного летательного аппарата / В. В. Матвеев // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. – № 12–1. – С. 165–173

51. Мелешко, В. В. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы : учебное пособие / В. В. Мелешко, О. И. Нестеренко. – Кировоград : б. и., 2011. – 171 с.

52. Мельников, С. В. Определение ошибок первого и второго рода классификации состояния транспортных телекоммуникационных систем при распределении признаков по закону Райса / Мельников С.В. // Студенческая наука для развития информационного общества : сборник материалов VIII Всероссийской научно-технической конференции (Ставрополь, 22–23 мая 2018 г.)/ Северо-Кавказский федеральный университет. – Ставрополь, 2018. – С. 17–25.

53. Мельников, С. В. Оптимизация порогов классификации состояния трансферных каналов связи для обеспечения точности позиционирования РБЛА при замираниях Накагами [Электронный ресурс] / С. В. Мельников, Г. И. Линец // Сборник тезисов докладов по итогам Национального СуперКомпьютерного форума (23-26 ноября 2019 г., Переславль-Залесский). –

Режим доступа: [http://2019.nscf.ru/TesisAll/06\\_Prikladnoe\\_PO/036\\_MelnikovSV.pdf](http://2019.nscf.ru/TesisAll/06_Prikladnoe_PO/036_MelnikovSV.pdf)  
(дата обращения 18.08.2020).

54. Миронов, В. А. Определение характеристик обнаружения радиолокационных сигналов на фоне пассивных помех в морских условиях / В. А. Миронов // Системи обробки інформації. – 2010. – № 1 (82). – С. 90–94

55. Наконечный, Г. В. Использование моделей компенсации погрешностей для получения оптимальных характеристик навигационных решений / Г. В. Наконечный, А. М. Гальямов, С. В. Петренко // Наука и бизнес : пути развития. – 2019. – № 4 (94). – С. 104–109

56. Насыров А. М., Насыров И. А. Развитие искусственных мелкомасштабных неоднородностей при модификации ионосферы мощным наклонным радиоизлучением / А. М. Насыров, И. А. Насыров // Фундаментальные исследования. – 2005. – № 10. – С. 87–87

57. Непомнящий, Г. А. Адаптивное обнаружение сигнала на фоне нестационарной помехи / Г. А. Непомнящий // Вестник ЮУрГУ. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2011. – № 23 (240). – С.120–123.

58. Орошук, И. М. Вероятностные характеристики пространственно-корреляционного метода обнаружения сигналов в декаметровом диапазоне [Электронный ресурс] / И. М. Орошук, В. Н. Долгих, А. Н. Сучков // Журнал радиоэлектроники. – 2013. – № 12. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec13/5/text.html> (дата обращения 18.08.2020).

59. Пат. 198994 Российская Федерация, МПК G01S 19/21, G01C 21/20, H04B 17/309. Устройство определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия на приемник роботизированного беспилотного летательного аппарата / Г. И. Линец, К. М. Сагдеев, С. В. Мельников, Е. М. Ширяев, А. М. Исаев, М. А. Исаев, В. В. Гранкин ; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное

учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (RU). № 2019140798. Заявл. 10.12.19 ; опубл. 06.08.2020. Бюл. № 22.

60. Пат. 2586076 Российская Федерация, МПК G 01 S 13/84. Способ обнаружения несанкционированного воздействия на точностные характеристики космических навигационных систем / И. А. Гладков, В. В. Василенко, М. Н. Зубчик ; заявитель и патентообладатель ФГБУ «4 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации. № 2014154045/07 ; заявл. 29.12.14 ; опубл. 10.06.16, Бюл. № 16.

61. Пат. 2671238 Российская Федерация, МПК G01S 7/36. Способ обнаружения преднамеренных помех НАП ГНСС / А. В. Журавлев, В. Г. Маркин, В. А. Шуваев, Е. М. Красов, А. Ф. Иванов ; заявитель и патентообладатель АОНВП «Протек». № 2017143741 ; заявл. 13.12.17 ; опубл. 30.10.18, Бюл. № 31.

62. Пашинцев, В. П. Погрешность определения псевдодальности в спутниковой радионавигационной системе при возмущениях ионосферы / В. П. Пашинцев, Г. И. Линец, С. А. Коваль, М. А. Сенокосов, С. В. Мельников // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – № 2. – С. 231–279.

63. Пеликан [Электронный ресурс] // Коптер Экспресс [сайт]. – Режим доступа: <https://ru.coex.tech/pelican> (дата обращения: 14.08.2020).

64. Поляк Б. Т. Метод Ньютона и его роль в оптимизации и вычислительной математике / Б. Т. Поляк // Труды ИСА РАН. – 2006. – № 28. – С. 48–66

65. Пономаренко А. В. Разработка модельной реализации функций Бесселя из стандарта LSB / А. В. Пономаренко // Труды ИСП РАН. – 2006. – № 10. – С. 115–142

66. Пшихопов, В. Х. Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами / В. Х. Пшихопов, М. Ю. Медведев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3 (104). – С. 187–196.

67. Развитие рынка беспилотных летательных аппаратов [Электронный ресурс] // EY: Building a better working [сайт]. – Режим доступа: [https://www.ey.com/ru\\_ru/news/2020/05/ey-uav-survey-18052020](https://www.ey.com/ru_ru/news/2020/05/ey-uav-survey-18052020) (дата обращения: 14.08.2020)

68. Рекомендация МСЭ-R P. 531-12 (09/2013). Данные об ионосферном распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования спутниковых служб и систем [Электронный ресурс] // Международный союз электросвязи [сайт]. – Режим доступа: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.531-12-201309-S!!PDF-R.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.531-12-201309-S!!PDF-R.pdf) (дата обращения: 30.04.2020).

69. Романова, Н. Ю. Определение параметров анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы / Н. Ю. Романова // *Physics of Auroral Phenomena*. – 2015. – №. 38. – P. 157–160

70. Российская Федерация. Министерство промышленности и торговли. Об утверждении радионавигационного плана Российской Федерации и о признании утратившими силу приказов Минпромторга России от 02 сентября 2008 г., № 118 и от 31 августа 2011 г. № 1177 : Приказ Минпромторга России от 28 июля 2015 г. № 2123. – Режим доступа: URL:<https://minpromtorg.gov.ru/common/upload/docVersions/5a724ff99f35b/actual/2123.PDF> (дата обращения: 14.08.2020).

71. Ростопчин, В. Беспилотные авиационные системы: основные понятия / В. Ростопчин, И. Бурдун // *Электроника: наука, технология, бизнес*. – 2009. – № 4. – С. 82–88

72. Сагдеев, К. М. Способ определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия на приемник РБЛА / К. М. Сагдеев, Г. И. Линец, С. В. Мельников // *Студенческая наука для развития информационного общества : сборник материалов X Всероссийской научно-технической конференции с международным участием*. 2019. – С. 8–16.

73. Сагдеев, К. М. Способ определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия на приемник РБЛА [Электронный ресурс] / К. М. Сагдеев, Г. И. Линец, С. В. Мельников, А. М. Исаев, М. А. Исаев // Сборник тезисов докладов по итогам Национального СуперКомпьютерного форума (23-26 ноября 2019 г., Переславль-Залесский). – Режим доступа: [http://2019.nscf.ru/TesisAll/06\\_Prikladnoe\\_PO/035\\_MelnikovSV.pdf](http://2019.nscf.ru/TesisAll/06_Prikladnoe_PO/035_MelnikovSV.pdf) (дата обращения 18.08.2020).

74. Сагдеев, К. М. Способ определения факта искажения навигационного поля и идентификации помехового воздействия на приемник РБЛА / К. М. Сагдеев, Г. И. Линец, С. В. Мельников, А. М. Исаев, М. А. Исаев // Инфокоммуникационные технологии. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С.166–177.

75. Свидетельство 2019615347. Имитационная модель определения оптимальных порогов классификации состояния трансионосферного канала при распределении случайных величин по нормальному закону / Г. И. Линец, С. В. Мельников, В. А. Миронов ; правообладатель ФГБОУ ВО Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (RU). № 2019613609. Заявл. 08.04.2019 ; опубл. 24.04.2019.

76. Свидетельство 2019619475. Имитационная модель мультироторного БЛА / А. М. Исаев, М. А.Исаев, Г. И. Линец, С. В. Мельников ; Правообладатель ФГБОУ ВО Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (RU). № 2019618010. Заявл. 04.07.2019 ; опубл. 17.07.2019.

77. Свидетельство 2020613362. Программный модуль компенсации ошибок определения истинного местоположения радиус вектора положения РБЛА / В. А. Миронов, А. М. Исаев, М. А. Исаев, И. В. Стручков, А. Д. Бушуров, Р. А. Воронкин, Д. С. Елагин, Е. И. Парменов, С. В. Мельников ; правообладатель ФГБОУ ВО Федеральное государственное автономное образовательное



учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (RU). № 202061250. Заявл. 11.03.2020 ; опубл. 13.03.2020.

78. Свидетельство 2020613445. Имитационная модель идентификации закона распределения случайных величин в транссионосферных каналах связи / Г. И. Линец, С. В. Мельников, Д. А. Михайлов, А. М. Исаев ; правообладатель ФГБОУ ВО Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (RU). № 2020612505. Заявл. 11.03.2020 ; опубл. 16.03.2020.

79. Свидетельство 2020613742. Программный модуль компенсации ошибок определения скорости РБЛА / В. А. Миронов, А. М. Исаев, М. А. Исаев, И. В. Стручков, А. Д. Бушуров, Р. А. Воронкин, Д. С. Елагин, Е. И. Парменов, С. В. Мельников ; правообладатель ФГБОУ ВО Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (RU). № 2020612504. Заявл. 11.03.2020 ; опубл. 23.03.2020.

80. Свидетельство 2020614042. Имитационная модель определения оптимальных порогов классификации состояния транссионосферного канала при распределении случайных величин по закону Райса / Г. И. Линец, С. В. Мельников, Д. А. Михайлов, А. М. Исаев ; правообладатель ФГБОУ ВО Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (RU). № 2020612667. Заявл. 11.03.2020 ; опубл. 25.03.2020.

81. Свидетельство 2020614250. Имитационная модель определения оптимальных порогов классификации состояния транссионосферного канала при распределении случайных величин по закону Накагами / Г. И. Линец, С. В. Мельников, Д. А. Михайлов, А. М. Исаев ; правообладатель ФГБОУ ВО Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Кавказский федеральный университет» (RU). № 2020612518. Заявл. 11.03.2020 ; опубл. 27.03.2020.

82. Семенова, Л. Л. Современные методы навигации беспилотных летательных аппаратов / Л. Л. Семенова // Наука и образование сегодня. 2018. – № 4 (27). – С. 6–8.

83. Сидоркина, Ю. А. Обнаружение сигнала с неизвестными временным положением и частотой / Ю. А. Сидоркина, В. В. Антипов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2015. – № 222 (12). – С. 67–71.

84. Системы функциональных дополнений глобальных навигационных спутниковых систем [Электронный ресурс] // Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения [сайт]. – Режим доступа: [https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/function\\_dop.php](https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/function_dop.php) (дата обращения: 14.08.2020).

85. Соболев, С. П. Методы оценки и контроля целостности бортового навигационного оборудования спутниковой системы посадки : дис. ... канд. техн. Наук : 05.12.14 / Сергей Павлович Соболев ; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина): СПб., 2007. – 179 с.

86. Степанов, Д. Н. Методы и алгоритмы определения положения и ориентации беспилотного летательного аппарата с применением бортовых видеокамер / Д. Н. Степанов // Программные продукты и системы. – 2014. – №1 (105). – С. 150–157

87. Суворов, М. А. Анализ вариантов интегрированных навигационных систем [Электронный ресурс] / М. А. Суворов // Современные проблемы науки и образования : электронный научный журнал. 2015. № 1–1. С. – Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19414> (дата обращения: 14.08.2020).

88. Точность измерений псевдодальностей ГЛОНАСС [Электронный ресурс] // Российская система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ) [сайт]. – Режим доступа:

<http://www.sdcm.ru/smglo/errs?version=rus&reupdate&site=extern> (дата обращения: 14.08.2020).

89. Тыртышников, Е. Е. Методы численного анализа / Е. Е. Тыртышников. – М. : Академия, 2007. – 320 с.

90. Тяпкин, В. Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография / В. Н. Тяпкин, Е. Н. Гарин. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. – 260 с.

91. Ульянова, Ю. Е. Частотно-временные преобразования, используемые в цифровой обработке сигналов / Ю. Е. Ульянова, Р. Г. Бабенко, А. В. Чернов // Глобальная ядерная безопасность. – 2015. – № 3 (16). – С. 36–42.

92. Фам Хоанг Лонг Разработка методики учета влияния ионосферы при GPS - измерениях на территории Вьетнама : дис. ... на канд. техн. Наук : 25.00.32 / Фам Хоанг Лонг ; МИИГАиК: Москва, 2014. – 141 с.

93. Фатеев, Ю. Л. Исследование одночастотного метода определения вертикальной задержки сигнала в ионосфере / Ю. Л. Фатеев, А. С. Курносков // Сибирский журнал науки и технологий. – 2016. – № 4. – С. 44–47

94. Фатеев, Ю. Л. Сравнительный анализ методов определения задержки сигнала в ионосфере / Ю. Л. Фатеев, А. С. Курносков // Научные технологии. – 2016. – Т. 17. – № 8. – С. 44–47

95. Федеральная целевая программа № 05.578.21.0270 «Разработка роботизированного беспилотного летательного аппарата мультироторного типа с использованием бесплатформенной инерциальной навигационной системы» (шифр заявки 2018-14-000-0001-255) : утв. Министерством науки и высшего образования Российской Федерации от 20.12.2018. – Режим доступа: [http://www.fcpir.ru/participation\\_in\\_program/contracts/05.578.21.0270/](http://www.fcpir.ru/participation_in_program/contracts/05.578.21.0270/) (дата обращения: 14.08.2020).

96. Федосеева, Н. А. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов / Н. А. Федосеева, М. В. Загвоздкин // Научный журнал. – 2017. – № 9 (22). – С. 26–29.
97. Фокин, Л. А. Об анализе погрешностей интегрированной навигационной системы и методах их оценивания / Л. А. Фокин, В. И. Ширяев, Е. О. Подвилова // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2012. – № 35 (17). – С. 127–134.
98. Функции Бесселя : учебно-методическое пособие / Сост.: В. И. Зубов. – М. : МФТИ, 2007. – 51 с.
99. Храменков, А. С. Сопоставительный анализ радиолокационных обнаружителей, основанных на критерии Неймана Пирсона и последовательном критерии отношения вероятностей / А. С. Храменков, С. Н. Ярмолик // Доклады БГУИР. – 2013. – № 6 (76). – С. 72–78
100. Церна, И. Состояние и регулирование международного рынка беспилотных летательных аппаратов / И. Церна // Актуальные проблемы экономики и права. – 2016. – Т. 10. – № 3. – С. 92–100.
101. Ahmed, B. Flight control of a rotary wing UAV using backstepping / B. Ahmed, H. R. Pota, M. Garratt // International Journal of Robust and Nonlinear Control. – 2009. – №. 20. – С. 639–658.
102. Bishop, C. M. Pattern recognition and machine learning / C. M. Bishop. – New York : Springer Science + Business Media, 2006. – 758 с.
103. Castro-Kuriss, C. On some goodness-of-fit tests and their connection to graphical methods with uncensored and censored data / C. Castro-Kuriss, M. Huerta, V. Leiva, A. Tapia // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – № 1001. – С. 157–183
104. Critical infrastructures [Электронный ресурс] // Azur drones [сайт]. – Режим доступа: <https://www.azurdrones.com/critical-infrastructures/> (дата обращения: 14.08.2020).

105. Gaiduk, A. R. Self-organization in groups of intelligent robots / A. R. Gaiduk, S. G. Kapustyan, I. O. Shapovalov // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2015. – №. 345. – С. 171–181.
106. Gemini [Электронный ресурс] // Geoscan [сайт]. – Режим доступа: <https://www.geoscan.aero/ru/products/gemini> (дата обращения: 14.08.2020).
107. Hawker Q800X [Электронный ресурс] // Aeraccess [сайт]. – Режим доступа: <https://www.aeraccess-group.com/product/outdoor/hawker-q800x.html> (дата обращения: 14.08.2020).
108. Huang, N. E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung, H. H. Liu // *Proceedings of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*. – 1998. – №. 454. – С. 903–995.
109. Кас, М. On tests of normality and other tests of goodness of fit based on distance methods / М. Кас, J. Kiefer, J. Wolfowitz // *The annals of mathematical statistics*. – 1955. – № 26. – С. 189-211.
110. Klein, G. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces / G. Klein, D. Murray // *Proceedings of the 2007 6th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (Washington, DC, USA. 13–16 November 2007)*. – С. 1–10.
111. Laurenson, D. Indoor radio channel propagation modelling by ray tracing techniques : PhD Doctor of Philosophy / David Irvine Laurenson ; University of Edinburgh. – Edinburgh, 1994. – 171 с.
112. Linets, G. Decrease of energy consumption of transport telecommunication networks using stage-by-stage controlling procedure / G. Linets, S. Melnikov // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2019. – №. 171. – С. 299–322
113. Linets, G. I. Decrease energy consumption of transport telecommunication networks due to the usage of stage-by-stage controlling procedure / G. I. Linets, S. V. Melnikov, S. V. Govorova, V. V. Medenec, M. A. Lapina // *2018 Multidisciplinary*

symposium on computer science and ICT, REMS 2018 (15–20 October 2018, Stavropol; Russian Federation) / North–Caucasus Federal University. – Stavropol, 2018. – P. 181–190.

114. Linets, G. I. Optimization of classification thresholds for states of transionospheric radio links described by the normal distribution for ensuring the accuracy of uav positioning / G. I. Linets, S. V. Melnikov, A. M. Isaev // 9th Computer Science On-line Conference, CSOC 2020 (Zlin, Czech Republic; 15 July 2020). – Zlin, 2020. – P. 453–469.

115. Linets, G. I. Optimizing classification thresholds of status of transionospheric communication channel distributed according to rayleigh distribution law for decreased quadrocopter's positioning errors / G. I. Linets, M. A. Isaev, A. M. Isaev, S. V. Melnikov // CEUR Workshop Proceedings : 3rd International Workshop on Young Scientist's Trends in Information Processing, YSIP3 2019 (Stavropol and Arkhyz; Russian Federation; 17 September 2019 - 20 September 2019). – 2019. – №. 2500. – C. 1–8

116. Linets, G. I. Optimizing classification thresholds of status of transionospheric communication channel distributed according to rayleigh distribution law for decreased quadrocopter's positioning errors / G. I. Linets, S. V. Melnikov, M. A. Isaev, A. M. Isaev // 3rd international workshop on young scientist's trends in information processing, YSIP3 2019 (Stavropol and Arkhyz, 17-20 september 2019.). – Stavropol, 2019. – P. 1–8.

117. Linets, G. I. Optimizing thresholds of classification system for identifying status of transport communication systems / G. I. Linets, S. N. Sandryan, S. V. Melnikov // International conference on Information technologies in business and industry 2018 (17–20 January 2018, Tomsk, Russian Federation)/ Tomsk Polytechnic University. – Tomsk, 2018. – Art. number 022011.

118. Linets, G. Optimization of the classification thresholds of the state of transionospheric communication channels to ensure accuracy of the positioning RBLA /

G. Linets, V. Nikulin, A. Isaev, S. Melnikov // AIP Conference Proceedings. – 2019. – №. 2171. – Art. number 060006

119. Linets, G. Optimizing classification thresholds of status of transionospheric communication channel for decreased quadrocopter's positioning errors / G. Linets, S. Melnikov, V. Mironov // Proceedings of the 7th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2019). (Ufa, Russia, May 28–29, 2019) / USATU. – Ufa, 2019. – С. 212–218

120. Mavic Air 2 [Электронный ресурс] // DJI [сайт]. – Режим доступа: <https://www.dji.com/ru/mavic-air-2/specs> (дата обращения: 14.08.2020).

121. Mur-Artal R. ORB-SLAM: A versatile and accurate monocular SLAM system / R. Mur-Artal, J. M. Montiel, J. D. Tardos // IEEE Transactions on Robotics. – 2015. – № 31 (5). – С. 1147–1163.

122. Mur-Artal, R., ORB-SLAM 2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and RGB-D cameras / R. Mur-Artal, J. D. Tardos // IEEE Transactions on Robotics. – 2017. – № 33 (5). – С. 1255–1262.

123. Nakagami, M. The m-Distribution, a general formula of intensity of rapid fading / M. Nakagami // Statistical Methods in Radio Wave Propagation : Proceedings of a Symposium (June 18-20, 1958). – Oxford : Pergamon Press, 1960. – С. 3–36.

124. Parsons, J. D. The mobile radio propagation channel / J. D. Parsons. – New York : Wiley, 1992. – 433 с.

125. Performance Based Navigation Sub-Group [Электронный ресурс] // ИКАО. Объединение авиации [сайт]. – Режим доступа: <https://www.icao.int/MID/Documents/2018/PBN%20SG3/IP3.pdf> (дата обращения: 14.08.2020).

126. Skeyetech [Электронный ресурс] // Azur Drones [сайт]. – Режим доступа: <https://www.azurdrones.com/product/skeyetech/> (дата обращения: 14.08.2020).

127. Smart aerial monitoring system (SAMS) [Электронный ресурс] // Icaros.Remote Sensing Solutions [сайт]. – Режим доступа: <https://icarosgeospatial.com/sams/> (дата обращения: 14.08.2020).

128. u-blox 8 / u-blox M8. Receiver description. Including protocol specification [Электронный ресурс] // IoT Security [сайт]. – Режим доступа: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox8-M8\\_ReceiverDescrProtSpec\\_%28UBX-13003221%29.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox8-M8_ReceiverDescrProtSpec_%28UBX-13003221%29.pdf) (дата обращения: 14.08.2020).

129. Van Diggeken F. GPS and GPS+GLONASS RTK [Электронный ресурс] // Geneva International Centre for Humanitarian Demining [сайт]. – Режим доступа: [https://www.gichd.org/fileadmin/pdf/LIMA/RTK\\_survey2.pdf](https://www.gichd.org/fileadmin/pdf/LIMA/RTK_survey2.pdf) (дата обращения: 14.08.2020).



## Приложение А

### Акты внедрения результатов исследования

УТВЕРЖДАЮ  
И.о. директора института  
Информационных технологий и  
телекоммуникаций  
*Петренко* В. И. Петренко  
«11» июня 2020 г.

АКТ

О реализации в учебном процессе научных результатов диссертации  
Мельникова С.В. «Повышение точности позиционирования РБЛА с использованием  
оптимизации порогов классификации состояния трансионосферных каналов связи»

Комиссия в составе:

Председатель комиссии	Азаров Иван Валерьевич	И.о. заместителя директора по учебной работе ИИТТ, кандидат экономических наук, доцент кафедры прикладной информатики
Члены	Мочалов Валерий Петрович	доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой инфокоммуникаций
	Яковлев Сергей Владимирович	кандидат технических наук, профессор кафедры инфокоммуникаций

составили настоящий акт об использовании результатов диссертации Мельникова С.В. в учебном процессе Института Информационных Технологий и Телекоммуникаций Северо-Кавказского Федерального Университета.

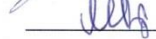
На кафедре инфокоммуникаций, по направлению подготовки 11.04.02, Инфокоммуникационные технологии и системы связи, направленность (профиль) «Системы и устройства радиотехники и связи» в рамках лабораторного практикума дисциплины «Спутниковая связь и навигация» использованы следующие научные результаты диссертации Мельникова С.В.: метод оптимизации порогов классификации состояния трансионосферных каналов связи; алгоритм идентификации состояния трансионосферных каналов связи; способ определения факта и типа искажения навигационного поля.

Председатель комиссии:



И.В. Азаров

Члены комиссии: :



В.П. Мочалов



С.В. Яковлев

Рисунок А1.1 – Акт внедрения результатов исследования в учебный процесс  
кафедры инфокоммуникаций СКФУ



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «Стилсофт»

Ю.П. Стоянов

2020 г.

## АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы Мельникова С.В.  
«Повышение точности позиционирования беспилотных летательных аппаратов в условиях  
искажения или подавления навигационного поля GPS/ГЛОНАСС»

Комиссия в составе:

Председатель комиссии	Заместитель главного конструктора	А.В. Шипулин
Члены комиссии	Ведущий инженер	Н.А. Шульга
	Руководитель отдела разработки РЭА	В.В. Зенин
	Руководитель группы разработки БЛА	В.В. Куликов

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Повышение точности позиционирования беспилотных летательных аппаратов в условиях искажения или подавления навигационного поля GPS/ГЛОНАСС», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в процесс разработки навигационной аппаратуры БЛА ООО «Стилсофт». Предложенные автором научные результаты позволяют:

1. С необходимой достоверностью принимать решение о наличии факта искажения навигационного поля и идентифицировать тип искажения.
2. Идентифицировать закон распределения, описывающий состояние спутниковых каналов связи.
3. Осуществлять расчет и оптимизацию порогов классификации состояния спутниковых каналов связи при обнаружении сигнала GPS/ГЛОНАСС.
4. Осуществлять автоматическое управления БЛА при отсутствии командного радиоканала дистанционного управления.

Реализация указанных результатов позволяет повысить эффективность работы и точность позиционирования навигационной аппаратуры РБЛА.

Председатель  
комиссии

А.В. Шипулин

Члены комиссии

Н.А. Шульга

В.В. Зенин

В.В. Куликов

Рисунок А1.2 – Акт внедрения результатов исследования в ООО «СТИЛСОФТ»

**Приложение Б.****Программа идентификации закона распределения трассы распространения  
СРНС**

```
#!/usr/bin/env python3

import warnings
import numpy as np
import pandas as pd
import scipy.stats as st
import statsmodels as sm
import statsmodels.datasets as datasets
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
from astropy.stats import kuiper

def xi_2(data, distribution, bins=200, ax=None):
    # Get histogram of original data
    y, x = np.histogram(data, bins=bins, density=True)
    x = (x + np.roll(x, -1))[:-1] / 2.0

    # fit dist to data
    params = distribution.fit(data)

    # Separate parts of parameters
    arg = params[:-2]
    loc = params[-2]
    scale = params[-1]

    # Calculate fitted PDF and error with fit in distribution
    pdf = distribution.pdf(x, loc=loc, scale=scale, *arg)
    sse = np.sum(np.power(y - pdf, 2.0))
```

```

# if axis pass in add to plot
try:
    if ax:
        pd.Series(pdf, x).plot(ax=ax)
except Exception:
    pass

return sse

# Create models from data
def best_fit_distribution(data, bins=200, ax=None):
    """Model data by finding best fit distribution to data"""

    # Best holders
    best_distribution = st.norm
    best_params = (0.0, 1.0)
    best_sse = np.inf

    # Estimate distribution parameters from data
    for distribution in DISTRIBUTIONS:

        # Try to fit the distribution
        try:
            # Ignore warnings from data that can't be fit
            with warnings.catch_warnings():
                warnings.filterwarnings('ignore')

            sse = xi_2(data, distribution, bins, ax)

            # identify if this distribution is better
            if best_sse > sse > 0:
                best_distribution = distribution
                best_params = params
                best_sse = sse

```

```

except Exception:
    pass

return (best_distribution.name, best_params)

def make_pdf(dist, params, size=10000):
    """Generate distributions's Probability Distribution Function """

    # Separate parts of parameters
    arg = params[:-2]
    loc = params[-2]
    scale = params[-1]

    # Get sane start and end points of distribution
    start = dist.ppf(0.01, *arg, loc=loc, scale=scale) if arg else dist.ppf(0.01, loc=loc,
scale=scale)
    end = dist.ppf(0.99, *arg, loc=loc, scale=scale) if arg else dist.ppf(0.99, loc=loc, scale=scale)

    # Build PDF and turn into pandas Series
    x = np.linspace(start, end, size)
    y = dist.pdf(x, loc=loc, scale=scale, *arg)
    pdf = pd.Series(y, x)

    return pdf

matplotlib.rcParams['figure.figsize'] = (16.0, 12.0)
matplotlib.style.use('ggplot')

DISTRIBUTIONS = [st.rice, st.norm, st.nakagami, st.rayleigh]
METHODS = [st.kstest, kuiper, xi_2]
NUM_OF_SETS = 100
SET_SIZE = 1000000

```

```

if __name__ == '__main__':
    import csv
    from timeit import timeit

    import pprint
    pp = pprint.PrettyPrinter(width=140)

    from collections import namedtuple
    TableKey = namedtuple("TableKey", ("m", "d", "i", "dd"))
    TableVal = namedtuple("TableVal", ("s", "t"))

    Table2Key = namedtuple("TableKey", ("m", "d", "i"))

    result = {}
    for cdf in DISTRIBUTIONS:
        for i in range(NUM_OF_SETS):
            if cdf is st.rice:
                data = pd.Series(cdf.rvs(size=SET_SIZE, b=1))
            elif cdf is st.norm:
                data = pd.Series(cdf.rvs(size=SET_SIZE))
            elif cdf is st.nakagami:
                data = pd.Series(cdf.rvs(size=SET_SIZE, nu=1))
            elif cdf is st.rayleigh:
                data = pd.Series(cdf.rvs(size=SET_SIZE))

            # Find best fit distribution
            for m in METHODS:
                for h in DISTRIBUTIONS:
                    # fit dist to data
                    params = h.fit(data)
                    # Separate parts of parameters
                    arg = params[:-2]
                    loc = params[-2]
                    scale = params[-1]

```

```

current = TableKey(m=m.__name__, d=cdf.name, i=i, dd=h.name)

if m == xi_2:
    time = timeit('globals()["tmp"] = m(data, h)', globals=globals(), number=1)
    result[current] = TableVal(s=tmp, t=time)
else:
    time = timeit('globals()["tmp"] = m(data, h.cdf, arg)[0]', globals=globals(),
number=1)
    result[current] = TableVal(s=tmp, t=time) #, arg, loc, scale)

with open('results.csv', 'w') as f:
    fields = ("Method", "Distr", "Iternum", "DistD", "P", "t")
    writer = csv.writer(f)
    writer.writerow(fields)
    for key, val in sorted(result.items()):
        line = list(key)
        line.extend(list(val))
        writer.writerow(line)

for cdf in DISTRIBUTIONS:
    for i in range(NUM_OF_SETS):
        for m in METHODS:
            best = min((result[TableKey(m=m.__name__, d=cdf.name, i=i, dd=dd.name)] for dd
in DISTRIBUTIONS), key=lambda x: x.s)
            for h in DISTRIBUTIONS:
                current = TableKey(m=m.__name__, d=cdf.name, i=i, dd=h.name)
                if result[current].s <= best.s:
                    result[current] = result[current]._replace(s=1)
                else:
                    result[current] = result[current]._replace(s=0)

with open('results2.csv', 'w') as f:
    fields = ("Method", "Distr", "Iternum", "DistD", "p", "t")

```

```

writer = csv.writer(f)
writer.writerow(fields)
for key, val in sorted(result.items()):
    line = list(key)
    line.extend(list(val))
    writer.writerow(line)

result2 = {}
for cdf in DISTRIBUTIONS:
    for i in range(NUM_OF_SETS):
        for m in METHODS:
            items = [result[TableKey(m=m.__name__, d=cdf.name, i=i, dd=dd.name)] for dd in
DISTRIBUTIONS]

            new_tpl = [None] * 2

            # calc score for test result
            it_scores = tuple(map(lambda x: x.s, items))
            if it_scores.count(1) > 1:
                new_tpl[0] = 0.5
            elif it_scores.count(1) == 1 and result[TableKey(m=m.__name__, d=cdf.name, i=i,
dd=cdf.name)].s == 1:
                new_tpl[0] = 1
            else:
                new_tpl[0] = 0

            #calc aver time for gueses
            it_times = list(map(lambda x: x.t, items))
            new_tpl[1] = sum(it_times)/len(it_times)

            result2[Table2Key(m=m.__name__, d=cdf.name, i=i)] = TableVal(*new_tpl)
del result

with open('results3.csv', 'w') as f:

```



```
fields = ("Method", "Distr", "Iternum", "Score")
writer = csv.writer(f)
writer.writerow(fields)
for key, val in sorted(result2.items()):
    line = list(key)
    line.extend(list(val))
    writer.writerow(line)

for m in METHODS:
    keys = [key for key in result2 if key.m == m.__name__]
    times = list(map(lambda x: result2[x].t, keys))
    aver_time = sum(times)/len(times)

    results = list(map(lambda x: result2[x].s, keys))
    aver_score = sum(results)/(NUM_OF_SETS * len(DISTRIBUTIONS))
    print(m.__name__, aver_score, aver_time)
```

## Приложение В

### Программа идентификации состояний трассы распространения СРНС

```
#!/usr/bin/env python3
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib as mpl
import seaborn as sns
from pyhht.visualization import plot_imfs
from pyhht import EMD
import csv
# Используемые файлы
INPUT_FILE = 'data.csv'
OUTPUT_FILE = 'output.csv'
def main(in_file, out_file):
    mpl.rcParams['agg.path.chunksize'] = 10000
    mpl.rcParams['legend.fontsize'] = 7
    print("Chunk size = " + str(mpl.rcParams['agg.path.chunksize']))
    with open(in_file, "r", encoding="utf-8") as f:
        data = list(csv.reader(f))
    data.pop(0)
    signal = [float(p[2]) for p in data[:10000]]
    t = [int(p[3]) - int(data[0][3]) for p in data[:10000]]
    decomposer = EMD(np.array(signal))
    imfs = decomposer.decompose()
    for i, mode in enumerate(imfs):
        sns.distplot(np.array(mode)).get_figure().savefig(str(i) + '_density')
    plot_imfs(np.array(signal), np.array(imfs), np.array(t))
    # Обратная сумма
    fig, axs = plt.subplots(1, 2)
    for i in range(1, len(imfs) + 1):
        s = slice(-1-i, -1)
        t = np.sum(imfs[s], axis=0)
```

```

    lbl = 'Sum of ' + s.__str__() + ' el.'
    axs[0].plot(t, label=lbl, zorder=-i)
    axs[1] = sns.distplot(t, label=lbl, vertical=True)
axs[0].legend()
axs[1].legend()
plt.show()
fig, axs = plt.subplots(1, 2)
for i in range(1, len(imfs) + 1):
    s = slice(0, i)
    t = np.sum(imfs[s], axis=0)
    lbl = 'Sum of ' + s.__str__() + ' el.'
    axs[0].plot(t, label=lbl)
    axs[1] = sns.distplot(t, label=lbl, vertical=True)
axs[0].legend()
axs[1].legend()
plt.show()
fig, axs = plt.subplots(1,2)
s = slice(0, 8)
t = np.sum(imfs[s], axis=0)
lbl = 'Sum of ' + s.__str__() + ' el.'
axs[0].plot(t, label=lbl)
axs[1] = sns.distplot(t, label=lbl, vertical=True)
axs[0].legend()
axs[1].legend()
plt.show()
with open(out_file, 'w', encoding="utf-8") as f:
    writer = csv.writer(f, delimiter=',')
    for line in t:
        writer.writerow((line,))
if __name__ == '__main__':
    import os
    proc_dir = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
    os.chdir(proc_dir)
    main(INPUT_FILE, OUTPUT_FILE)    exit(0)

```

## Приложение Г.

### Программа оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС для нормального закона распределения

```

signu = ((0.4472135955, 2.0), (1.0, 2.0), (2.236, 2.0))
# нормальное распределение
def f(x:float, sigma:float, nu:float):
    from math import exp, pow, sqrt, pi
    return (1/(sigma * sqrt(2 * pi))) * exp(-pow(x - nu, 2))/(2.0 * pow(sigma, 2.0))
    # производная по z в sympy: pprint(diff((1/(sigma * sqrt(2 * pi))) * exp(-pow(x - nu,
2))/(2.0 * pow(sigma, 2.0)), x))

# Интеграл нормального распределения
def B(x:float, sigma:float, nu:float):
    from scipy import integrate
    from math import exp, pow, sqrt, pi
    f = lambda t: exp(-pow(t - nu, 2))/(2 * pow(sigma, 2))
    return 0.5 - (1/sqrt(2 * pi)) * integrate.quad(f, 0, x)[0]

def B_1der(x:float, sigma:float, nu:float):
    from scipy import integrate
    from math import exp, pow, sqrt, pi
    return (-sqrt(2)/(2 * sqrt(pi))) * exp(-pow(-nu + x, 2)/(2 * pow(sigma, 2)))

# Решение
def show_norm():
    import numpy as np
    import matplotlib.pyplot as plt
    plt.grid(True)
    xgraph = np.linspace(0, 6, 1000)
    for sn in signu:
        y = np.linspace(0, 6, len(xgraph))
        for j in range(len(y)):
            y[j] = f(xgraph[j], sn[0], sn[1])

```

```

        plt.plot(xgraph, y)
    plt.show()

def show_multiple(delta:float, sig:float, nu:float):
    import numpy as np
    import matplotlib.pyplot as plt
    plt.grid(True)
    xgraph = np.linspace(0, 6, 1000)
    for i in (nu, delta + 3 * sig):
        y = np.linspace(0, 6, len(xgraph))
        for j in range(len(y)):
            y[j] = f(xgraph[j], sig, i)
        plt.plot(xgraph, y)
    plt.show()

if __name__ == "__main__":
    show_norm()

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Импорт констант
import norm
from norm import signu

# Система уравнений и матрица Якоби
def newton_1(variables, a, b, C_1_div_P, sig, nu):
    x0, y0 = variables
    B = norm.B
    return (B(x0, sig, nu) * B(y0, sig, nu)) - C_1_div_P

def newton_2(variables, a, b, C_1_div_P, sig, nu):
    from math import exp
    x0, y0 = variables
    B = norm.B

```

```

#f = norm.f
#return (f(x0, sig, nu) * f(x0 - b, sig, nu) * B(x0, sig, nu) * B(x0 - a, sig, nu)
#       - f(y0, sig, nu) * f(y0 - b, sig, nu) * B(y0, sig, nu) * B(y0 - b, sig, nu))
return (exp(x0 * a - (pow(a, 2)/2))
        * B(x0, sig, nu)
        * B(y0 - b, sig, nu)
        - exp(y0 * b - (pow(b, 2)/2))
        * B(y0, sig, nu)
        * B(x0 - a, sig, nu))

def newton(variables, a, b, C_1_div_P, sig, nu):
    return [newton_1(variables, a, b, C_1_div_P, sig, nu),
            newton_2(variables, a, b, C_1_div_P, sig, nu)]

def jac(variables, a, b, C_1_div_P, sig, nu):
    x0, y0 = variables
    B = norm.B
    #f = norm.f
    B_1der = norm.B_1der
    #f_1der = norm.f_1der
    from math import pi, sqrt, exp

    return np.array([[B(y0, sigma, nu)*B_1der(x0, sigma, nu),
                     B(x0, sigma, nu)*B_1der(y0, sigma, nu)],
                    [a * B(x0) * B(-b + y0) * exp((-pow(a, 2)/2) + a * x0) -
                     B(y0) * exp((-pow(b, 2)/2) + b * y0) * B_1der(-a + x0) + B(-b + y0) * exp((-pow(a, 2)/2) + a * x0) *
                     B_1der(x0),
                     -b * B(y0) * B(-a + x0) * exp((-pow(b, 2)/2) + b * y0) +
                     B(x0) * exp((-pow(a, 2)/2) + a * x0) * B_1der(-b + y0) - B(-a + x0) * exp((-pow(b, 2)/2) + b * y0) *
                     B_1der(y0)]]])

# Методы решения
def powell(variables, constants):
    from scipy.optimize import root

```

```

args=tuple(list(constants))
return root(newton, variables, args=args)

```

# Method krylov does not use the jacobian (jac).

```

def krylov(variables, constants):
    from scipy.optimize import root
    args=tuple(list(constants))
    return root(newton, variables, method='krylov',
                options={'maxiter': 1000}, args=args)

```

#Method broyden1 does not use the jacobian (jac).

```

def broyden(variables, constants):
    from scipy.optimize import root
    args=tuple(list(constants))
    return root(newton, variables, method='broyden1',
                options={'maxiter': 1000}, args=args)

```

def draw(constants):

```

    from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
    from matplotlib import cm
    x = np.linspace(-6, 6, 100)
    y = np.linspace(-6, 6, 100)

    Z1 = np.array([newton_1((i, j), *constants)
                   for i in x for j in y]).reshape(len(x), len(y))
    Z2 = np.array([newton_2((i, j), *constants)
                   for i in x for j in y]).reshape(len(x), len(y))

    X, Y = np.meshgrid(x, y)

    fig = plt.figure()
    plt.grid(True)

    ax = fig.gca(projection = '3d')

```

```
ax.plot_wireframe(X, Y, Z1, cstride=2, rstride=1, color='C0',
                 linewidth=0.1, antialiased=False)
```

```
ax.set_xlabel('x')
```

```
ax.set_ylabel('y')
```

```
ax.set_zlabel('z')
```

```
ax = fig.gca(projection = '3d')
```

```
ax.plot_wireframe(X, Y, Z2, cstride=2, rstride=1, color='C1',
                 linewidth=0.1, antialiased=False)
```

```
ax.set_xlabel('x')
```

```
ax.set_ylabel('y')
```

```
ax.set_zlabel('z')
```

```
plt.show()
```

```
def solve(guess, constants):
```

```
    powell_res = powell(guess, constants)
```

```
    print("Решение методом Powell:\n", powell_res)
```

```
    print("Значения функций:", newton_1(powell_res.x, *constants),
          newton_2(powell_res.x, *constants))
```

```
    krylov_res = krylov(guess, constants)
```

```
    print("Решение методом Krylov:\n", krylov_res)
```

```
    print("Значения функций:", newton_1(krylov_res.x, *constants),
          newton_2(krylov_res.x, *constants))
```

```
    broyden_res = broyden(guess, constants)
```

```
    print("Решение методом Broyden1:\n", broyden_res)
```

```
    print("Значения функций:", newton_1(broyden_res.x, *constants),
          newton_2(broyden_res.x, *constants))
```

```
    return krylov_res
```



**Приложение Д****Программа оптимизации порогов классификации состояний трассы  
распространения СРНС для закона Релея**

```
From math import *
print("Ввод констант:")
a = float(input("a: "))
b = float(input("b: "))
C = float(input("P/C: "))
X=sqrt((2*(math.log(C))/(1+pow((b/a),2))
Y= sqrt((2*(math.log(C))/(1+pow((a/b),2))
Print("X0=",X)
Print("Y0=",Y)
```

## Приложение Е

### Программа оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС для закона Райса

```

from rice_solve import *

print("Ввод констант:")
a = float(input("a: "))
b = float(input("b: "))
C = float(input("C/P: "))
sig = float(input("mu: "))
nu = float(input("om: "))

# Пересечение
rice.show_multiple(a, sig, nu)
rice.show_multiple(b, sig, nu)

# Общий вид систему уравнений
draw((a, b, C, sig, nu))

print("Ввод стартовой точки решения системы уравнений:")
x0 = float(input("x0: "))
y0 = float(input("y0: "))

# tuple(a, b, C/P, mu, om)
solve((x0, y0), (a, b, C, sig, nu))

signu = ((1.00, 0.0), (1.00, 0.5), (1.00, 1.0), (1.00, 2.0), (1.00, 4.0),
          (0.25, 0.0), (0.25, 0.5), (0.25, 1.0), (0.25, 2.0), (0.25, 4.0))

# Распределение Райса
def f(x:float, sigma:float, nu:float):
    from math import exp, pow
    from scipy.special import i0
    return ((x / pow(sigma, 2.0))
            * exp(-(pow(x, 2.0) + pow(nu, 2.0))/(2.0 * pow(sigma, 2.0)))
            * i0((x * nu)/pow(sigma, 2.0)))
    # производная по z в sympy: pprint(diff(x/pow(sigma, 2) * exp(-(pow(x, 2) + pow(nu,
2))/(2 * pow(sigma, 2))) * i0((x * nu)/pow(sigma, 2)), x))

def f_1der(x:float, sigma:float, nu:float):
    from scipy.special import ivp, i0
    from math import exp
    return ((nu*x*exp((-nu**2.0 - x**2.0)/(2.0*sigma**2))*ivp(0.0, x*nu/sigma**2.0) *
nu/sigma**2.0)/sigma**4.0
            +
            i0(nu*x/sigma**2.0)*exp((-nu**2.0
x**2.0)/(2.0*sigma**2.0))/sigma**2.0
            -
            x**2.0*i0(nu*x/sigma**2.0)*exp((-nu**2.0
x**2.0)/(2.0*sigma**2.0))/sigma**4.0)

```

```

# Интеграл распределения Райса
def B(t:float, sigma:float, nu:float):
    from scipy import integrate
    # i0(x > 700) -> Inf
    return integrate.quad(lambda x: f(x, sigma, nu), t, 700)[0]

def B_1der(t:float, sigma:float, nu:float):
    return -f(t, sigma, nu)

# Решение
def show_rice():
    import numpy as np
    import matplotlib.pyplot as plt
    plt.grid(True)
    xgraph = np.linspace(0, 6, 1000)
    for sn in signu:
        y = np.linspace(0, 6, len(xgraph))
        for j in range(len(y)):
            y[j] = f(xgraph[j], sn[0], sn[1])
        plt.plot(xgraph, y)
    plt.show()

def show_multiple(delta:float, sig:float, nu:float):
    import numpy as np
    import matplotlib.pyplot as plt
    plt.grid(True)
    xgraph = np.linspace(0, 6, 1000)
    for i in (0, delta):
        y = np.linspace(0, 6, len(xgraph))
        for j in range(len(y)):
            y[j] = f(xgraph[j] - i, sig, nu)
        plt.plot(xgraph, y)
    plt.show()

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Импорт констант
import rice
from rice import signu

# Система уравнений и матрица Якоби
def newton_1(variables, a, b, C_1_div_P, sig, nu):
    x0, y0 = variables
    B = rice.B
    return (B(x0, sig, nu) * B(y0, sig, nu)) - C_1_div_P

def newton_2(variables, a, b, C_1_div_P, sig, nu):

```

```

x0, y0 = variables
B = rice.B
f = rice.f
return (f(x0, sig, nu) * f(x0 - b, sig, nu) * B(x0, sig, nu) * B(x0 - a, sig, nu)
        - f(y0, sig, nu) * f(y0 - b, sig, nu) * B(y0, sig, nu) * B(y0 - a, sig, nu))

def newton(variables, a, b, C_1_div_P, sig, nu):
    return [newton_1(variables, a, b, C_1_div_P, sig, nu),
            newton_2(variables, a, b, C_1_div_P, sig, nu)]

def jac(variables, a, b, C_1_div_P, sig, nu):
    x0, y0 = variables
    B = rice.B
    f = rice.f
    B_1der = rice.B_1der
    f_1der = rice.f_1der
    #[[B(y0, sigma, nu)*Derivative(B(x0, sigma, nu), x0), B(x0, sigma,
nu)*Derivative(B(y0, sigma, nu), y0)],
    #
    [B(x0, sigma, nu)*B(-a + x0, sigma, nu)*f(x0, sigma,
nu)*Subs(Derivative(f(_xi_1, sigma, nu), _xi_1), _xi_1, -b + x0) + B(x0, sigma, nu)*B(-a #+ x0,
sigma, nu)*f(-b + x0, sigma, nu)*Derivative(f(x0, sigma, nu), x0) + B(x0, sigma, nu)*f(x0, sigma,
nu)*f(-b + x0, sigma, nu)*Subs(Derivative(B(_xi_1, #sigma, nu), _xi_1), _xi_1, -a + x0) + B(-a + x0,
sigma, nu)*f(x0, sigma, nu)*f(-b + x0, sigma, nu)*Derivative(B(x0, sigma, nu), x0), ]]
    return np.array([[B(y0, sigma, nu)*B_1der(x0, sigma, nu),
                    B(x0, sigma, nu)*B_1der(y0, sigma, nu)],
                    [B(x0, sigma, nu)*B(-a + x0, sigma, nu)*f(x0, sigma,
nu)*f_1der(-b + x0, sigma, nu)
                    + B(x0, sigma, nu)*B(-a + x0, sigma, nu)*f(-b +
x0, sigma, nu)*f_1der(x0, sigma, nu)
                    + B(x0, sigma, nu)*f(x0, sigma, nu)*f(-b + x0,
sigma, nu)*B_1der(-a + x0, sigma, nu)
                    + B(-a + x0, sigma, nu)*f(x0, sigma, nu)*f(-b + x0,
sigma, nu)*B(x0, sigma, nu),
                    -B(y0, sigma, nu)*B(-b + y0, sigma, nu)*f(y0, sigma,
nu)*f_1der(-b + y0, sigma, nu)
                    - B(y0, sigma, nu)*B(-b + y0, sigma, nu)*f(-b +
y0, sigma, nu)*f_1der(y0, sigma, nu)
                    - B(y0, sigma, nu)*f(y0, sigma, nu)*f(-b + y0,
sigma, nu)*B(-b + y0, sigma, nu)
                    - B(-b + y0, sigma, nu)*f(y0, sigma, nu)*f(-b + y0,
sigma, nu)*B(y0, sigma, nu)]]])

# Методы решения
def powell(variables, constants):
    from scipy.optimize import root
    args=tuple(list(constants))
    return root(newton, variables, args=args)

# Method krylov does not use the jacobian (jac).
def krylov(variables, constants):
    from scipy.optimize import root

```

```

args=tuple(list(constants))
return root(newton, variables, method='krylov',
            options={'maxiter': 1000}, args=args)

#Method broyden1 does not use the jacobian (jac).
def broyden(variables, constants):
    from scipy.optimize import root
    args=tuple(list(constants))
    return root(newton, variables, method='broyden1',
                options={'maxiter': 1000}, args=args)

def draw(constants):
    from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
    from matplotlib import cm
    x = np.linspace(-3, 3, 50)
    y = np.linspace(-3, 3, 50)

    Z1 = np.array([newton_1((i, j), *constants)
                   for i in x for j in y]).reshape(len(x), len(y))
    Z2 = np.array([newton_2((i, j), *constants)
                   for i in x for j in y]).reshape(len(x), len(y))

    X, Y = np.meshgrid(x, y)

    fig = plt.figure()
    plt.grid(True)

    ax = fig.gca(projection = '3d')
    ax.plot_wireframe(X, Y, Z1, cstride=2, rstride=1, color='C0',
                     linewidth=0.1, antialiased=False)

    ax.set_xlabel('x')
    ax.set_ylabel('y')
    ax.set_zlabel('z')

    ax = fig.gca(projection = '3d')
    ax.plot_wireframe(X, Y, Z2, cstride=2, rstride=1, color='C1',
                     linewidth=0.1, antialiased=False)

    ax.set_xlabel('x')
    ax.set_ylabel('y')
    ax.set_zlabel('z')

    plt.show()

def solve(guess, constants):
    powell_res = powell(guess, constants)
    print("Решение методом Powell:\n", powell_res)
    print("Значения функций:", newton_1(powell_res.x, *constants),
          newton_2(powell_res.x, *constants))

    krylov_res = krylov(guess, constants)

```

```
print("Решение методом Krylov:\n", krylov_res)
print("Значения функций:", newton_1(krylov_res.x, *constants),
      newton_2(krylov_res.x, *constants))

broyden_res = broyden(guess, constants)
print("Решение методом Broymen1:\n", broyden_res)
print("Значения функций:", newton_1(broyden_res.x, *constants),
      newton_2(broyden_res.x, *constants))
```

## Приложение Ж

### Программа оптимизации порогов классификации состояний трассы распространения СРНС Накагами

```
#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf-8 -*-

from nakagami_solve import *

print("Ввод констант:")
a = float(input("a: "))
b = float(input("b: "))
C = float(input("C/P: "))
mu = float(input("mu: "))
om = float(input("om: "))

# Пересечение
nakagami.show_multiple(a, mu, om)
nakagami.show_multiple(b, mu, om)

# Общий вид систему уравнений
draw((a, b, C, mu, om))

print("Ввод стартовой точки решения системы уравнений:")
x0 = float(input("x0: "))
y0 = float(input("y0: "))

# tuple(a, b, C/P, mu, om)
solve((x0, y0), (a, b, C, mu, om))
```

Листинг файла «nakagami.py»:

```
#!/usr/bin/env python3
# -*- coding: utf-8 -*-

from cheb import cheb

muom = ((0.5,1.0), (1.0,1.0), (1.0,2.0), (1.0,3.0), (2.0,1.0), (2.0,2.0),
        (5.0,1.0))

# Распределение Накагами
def f(x:float, mu:float, om:float):
    from math import gamma, exp
    return (((2.0 * pow(mu, mu))/(gamma(mu) * pow(om, mu)))
            * pow(x, (2.0 * mu) - 1) * exp((-mu/om) * pow(x, 2.0)))
    #          производная      по      x      в      sympy:
pprint(diff(((2*mu**mu)/(gamma(mu)*om**mu))*(x**(2*mu-1))*(exp(-mu*x**2/om)), x))

def f_1der(x:float, mu:float, om:float):
```

```

from math import gamma, exp
return ((x * -4.0 * mu * pow(mu, mu) * pow(om, (-mu)) * x * pow(x, (2.0 * mu - 1)) *
exp(-mu * pow(x, 2.0)/om)/(om*gamma(mu)))
        + (2.0 * pow(mu, mu) * pow(om, (-mu))
        * pow(x, (2.0*mu - 1.0)) * (2.0*mu - 1) * exp(-mu * pow(x,
2.0)/om)/(gamma(mu))))

# Интеграл распределения Накагами
def H(z:float, mu:float, om:float):
    from math import gamma, exp
    I = (1 - cheb(lambda x: pow(x, (2.0 * mu) - 1.0) * exp((-mu/om) * pow(x, 2.0)), 0.0, z))
    return ((2.0 * pow(mu, mu))/(gamma(mu) * pow(om, mu))) * I
    # производная по x в sympy: pprint(diff(((2*mu**mu)/(gamma(mu)*om**mu))*(1 -
Integral((x**(2*mu-1))*(exp(-mu*x**2/om)), (x,0,z))), z))

def H2(z:float, mu:float, om:float):
    from math import gamma, exp
    from scipy import integrate
    I = integrate.quad(lambda z: pow(z, (2 * mu) - 1) * exp((-mu/om) * pow(z, 2)), z,
1000)[0]
    return ((2 * pow(mu, mu))/(gamma(mu) * pow(om, mu))) * I
    #
    # производная
    #
    # sympy:
    pprint(diff(((2*mu**mu)/(gamma(mu)*om**mu))*Integral((x**(2*mu-1))*(exp(-mu*x**2/om)), (x,
z, oo)), z))

def H_1der(z:float, mu:float, om:float):
    return -f(z, mu, om)

# Решение
def show_nakagami():
    import numpy as np
    import matplotlib.pyplot as plt
    plt.grid(True)
    xgraph = np.linspace(0, 6, 1000)
    for mm in muom:
        y = np.linspace(0, 6, len(xgraph))
        for j in range(len(y)):
            y[j] = f(xgraph[j], mm[0], mm[1])
        plt.plot(xgraph, y)
    plt.show()

def show_multiple(delta:float, mu:float, om:float):
    import numpy as np
    import matplotlib.pyplot as plt
    plt.grid(True)
    xgraph = np.linspace(0, 6, 1000)
    for i in (0, delta):
        y = np.linspace(0, 6, len(xgraph))
        for j in range(len(y)):
            y[j] = f(xgraph[j] - i, mu, om)
        plt.plot(xgraph, y)

```



```

plt.show()

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Импорт констант
import nakagami
from nakagami import muom

# Система уравнений и матрица Якоби
def newton_1(variables, a, b, C_1_div_P, mu, om):
    x0, y0 = variables
    H = nakagami.H2
    return (H(x0, mu, om) * H(y0, mu, om)) - C_1_div_P

def newton_2(variables, a, b, C_1_div_P, mu, om):
    x0, y0 = variables
    H = nakagami.H2
    f = nakagami.f
    return (f(y0, mu, om) * f(x0 - a, mu, om) * H(x0, mu, om) * H(y0 - b, mu, om)
            - f(x0, mu, om) * f(y0 - b, mu, om) * H(y0, mu, om) * H(x0 - a, mu, om))

def newton(variables, a, b, C_1_div_P, mu, om):
    return [newton_1(variables, a, b, C_1_div_P, mu, om),
            newton_2(variables, a, b, C_1_div_P, mu, om)]

def jac(variables, a, b, C_1_div_P, mu, om):
    x0, y0 = variables
    H = nakagami.H
    f = nakagami.f
    H_1der = nakagami.H_1der
    f_1der = nakagami.f_1der
    return np.array([[H(y0, mu, om) * H_1der(x0, mu, om),
                     H(x0, mu, om) * H_1der(y0, mu, om)],
                    [H(x0, mu, om) * H(y0 - b, mu, om) * f(y0, mu,
om) * H_1der(x0 - a, mu, om)
                     - H(y0, mu, om) * H(x0 - a, mu, om) * f(y0 - b, mu,
om) * f_1der(x0, mu, om)
                     - H(y0, mu, om) * f(x0, mu, om) * f(y0 - b, mu,
om) * H_1der(x0 - a, mu, om)
                     + H(y0 - b, mu, om) * f(y0, mu, om) * f(x0 - a, mu,
om) * H_1der(x0, mu, om),
                    [H(x0, mu, om) * H(y0 - b, mu, om) * f(x0 - a, mu,
om) * f_1der(y0, mu, om)
                     + H(x0, mu, om) * f(y0, mu, om) * f(x0 - a, mu,
om) * H_1der(y0 - b, mu, om)
                     - H(y0, mu, om) * H(x0 - a, mu, om) * f(x0, mu,
om) * f_1der(y0 - b, mu, om)
                     - H(x0 - a, mu, om) * f(x0, mu, om) * f(y0 - b, mu,
om) * H_1der(y0, mu, om)]]])

```

```

# Методы решения
def powell(variables, constants):
    from scipy.optimize import root
    args=tuple(list(constants))
    return root(newton, variables, args=args)

# Method krylov does not use the jacobian (jac).
def krylov(variables, constants):
    from scipy.optimize import root
    args=tuple(list(constants))
    return root(newton, variables, method='krylov',
                options={'maxiter': 1000}, args=args)

#Method broyden1 does not use the jacobian (jac).
def broyden(variables, constants):
    from scipy.optimize import root
    args=tuple(list(constants))
    return root(newton, variables, method='broyden1',
                options={'maxiter': 1000}, args=args)

def draw(constants):
    from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
    from matplotlib import cm
    x = np.linspace(-3, 3, 50)
    y = np.linspace(-3, 3, 50)

    Z1 = np.array([newton_1((i, j), *constants)
                   for i in x for j in y]).reshape(len(x), len(y))
    Z2 = np.array([newton_2((i, j), *constants)
                   for i in x for j in y]).reshape(len(x), len(y))

    X, Y = np.meshgrid(x, y)

    fig = plt.figure()
    plt.grid(True)

    ax = fig.gca(projection = '3d')
    ax.plot_wireframe(X, Y, Z1, cstride=2, rstride=1, color='C0',
                     linewidth=0.1, antialiased=False)

    ax.set_xlabel('x')
    ax.set_ylabel('y')
    ax.set_zlabel('z')

    ax = fig.gca(projection = '3d')
    ax.plot_wireframe(X, Y, Z2, cstride=2, rstride=1, color='C1',
                     linewidth=0.1, antialiased=False)

    ax.set_xlabel('x')
    ax.set_ylabel('y')
    ax.set_zlabel('z')

    plt.show()

```

```

def solve(guess, constants):
    powell_res = powell(guess, constants)
    print("Решение методом Powell:\n", powell_res)
    print("Значения функций:", newton_1(powell_res.x, *constants),
          newton_2(powell_res.x, *constants))

    krylov_res = krylov(guess, constants)
    print("Решение методом Krylov:\n", krylov_res)
    print("Значения функций:", newton_1(krylov_res.x, *constants),
          newton_2(krylov_res.x, *constants))

    broyden_res = broyden(guess, constants)
    print("Решение методом Broyden1:\n", broyden_res)
    print("Значения функций:", newton_1(broyden_res.x, *constants),
          newton_2(broyden_res.x, *constants))

from nakagami_solve import *
import time
import numpy as np

x = np.linspace(0.0, 2.0, 5)
y = np.linspace(0.0, 2.0, 5)

X, Y = np.meshgrid(x, y)

print('| Начальн. |           Решение           |           Затраченное время           |)
print('| значение | Powell | Krylov | Broyden | Powell | Krylov |
Broyden |)
for i in zip(list(X.ravel()), list(Y.ravel())):
    p = time.process_time()
    pwl = powell(i)
    pwl_time = time.process_time() - p

    p = time.process_time()
    krl = krylov(i)
    krl_time = time.process_time() - p

    p = time.process_time()
    br = broyden(i)
    br_time = time.process_time() - p
    print('{0}|{1}|{2}|{3}|{4}|{5}|'.format(
        i, tuple(pwl.x), tuple(krl.x), tuple(br.x), pwl_time, krl_time, br_time))

#!/usr/bin/env python
# -*- coding: utf-8 -*-

### Интегрирование по Чебышеву:
def cheb(func, a:float, b:float, maxdiv=-1):
    t = ((0.707107, 0.0, -0.707107),

```

```

(0.794654, 0.187592, -0.187592, -0.794654),
(0.832498, 0.374541, 0.0, -0.374541, -0.832498),
(0.866247, 0.422519, 0.266635, -0.266635, -0.422519, -0.866247),
(0.883862, 0.529657, 0.323912, 0.0, -0.323912, -0.529657, -0.883862),
(0.911589, 0.601019, 0.528762, 0.167906, 0.0, -0.167906, -0.528762, -
0.601019, -0.911589))
    t = t[maxdiv]
    X = list(); y = list()
    for x_i in t:
        X.append(float(((b + a)/2.0) + (((b - a)/2.0) * x_i)))
    for x in X:
        y.append(func(x))
    h:float = (b - a)/len(t)
    return (h * sum(y))

def show_integ():
    from math import pi, sin, cos
    from scipy import integrate

    def quad(f, a, b, maxdiv=None):
        if maxdiv is None:
            return integrate.quad(f, a, b)[0]
        else:
            return integrate.quad(f, a, b, limit=maxdiv)[0]

    def romberg(f, a, b, maxdiv=None):
        if maxdiv is None:
            return integrate.romberg(f, a, b)
        else:
            return integrate.romberg(f, a, b, divmax=maxdiv)

    print("Тест при изменении количества шагов.")
    print("Чебышев:")
    for i in range(0, 6):
        print(i, cheb(sin, 0, 2 * pi, i), cheb(cos, 0, 2 * pi, i))

    print("Quad:")
    for i in [i*i for i in range(1, 11)]:
        print(i, quad(sin, 0, 2 * pi, i), quad(cos, 0, 2 * pi, i))

    print("Romberg:")
    for i in [i*i for i in range(1, 11)]:
        print(i, romberg(sin, 0, 2 * pi, i), romberg(cos, 0, 2 * pi, i))

    print("Тест при изменении предела интегрирования.")
    for func in [sin, cos]:
        print('\tfunc =', func.__name__)
        for b in [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 200, 400, 600, 800, 100]:
            print('b =', b, 'pi', cheb(func, 0, b * pi), quad(func, 0, b * pi),
romberg(func, 0, b * pi))

```

Приложение И

Алгоритм управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС

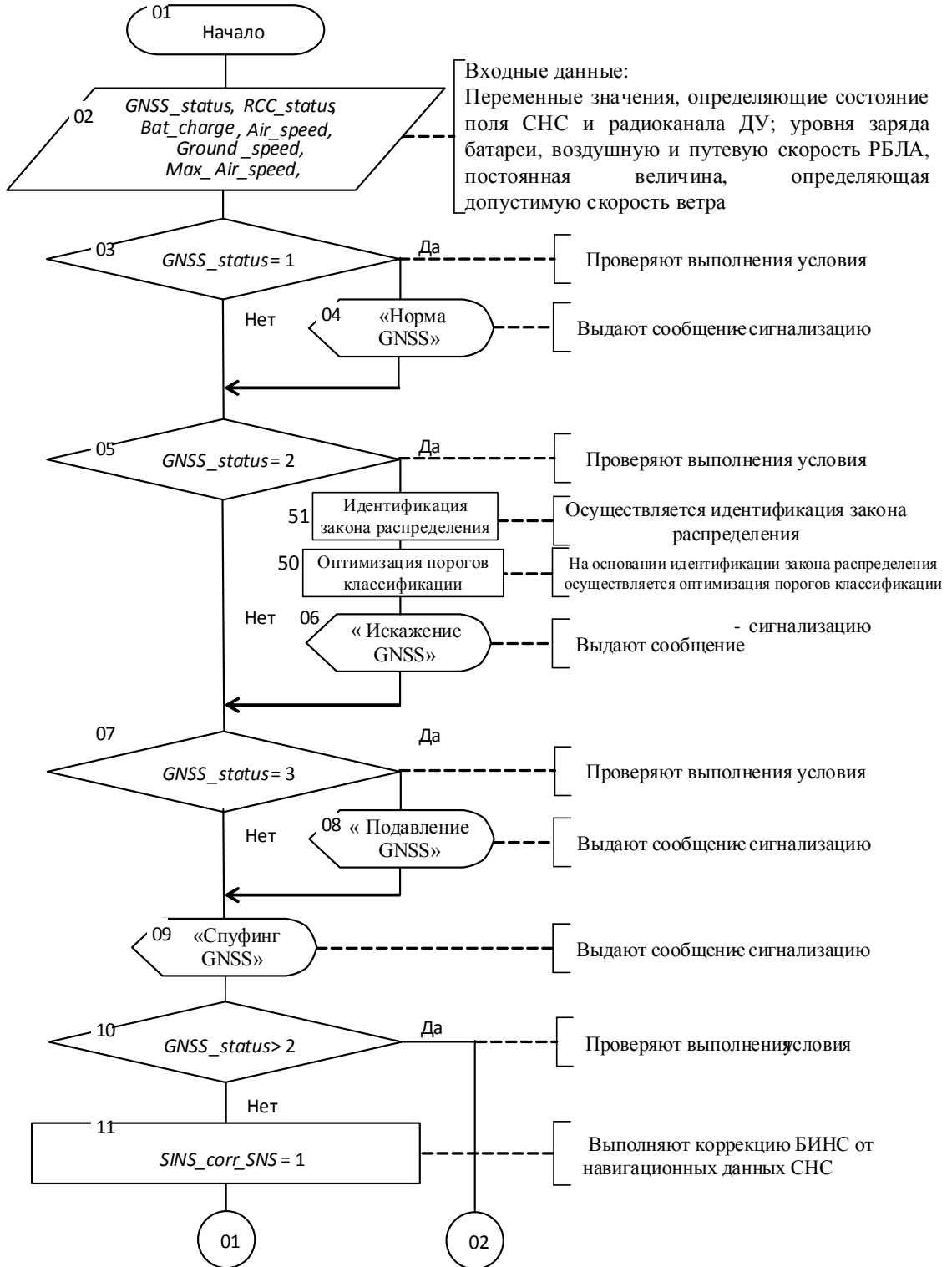


Рисунок И.1 – Алгоритм управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС

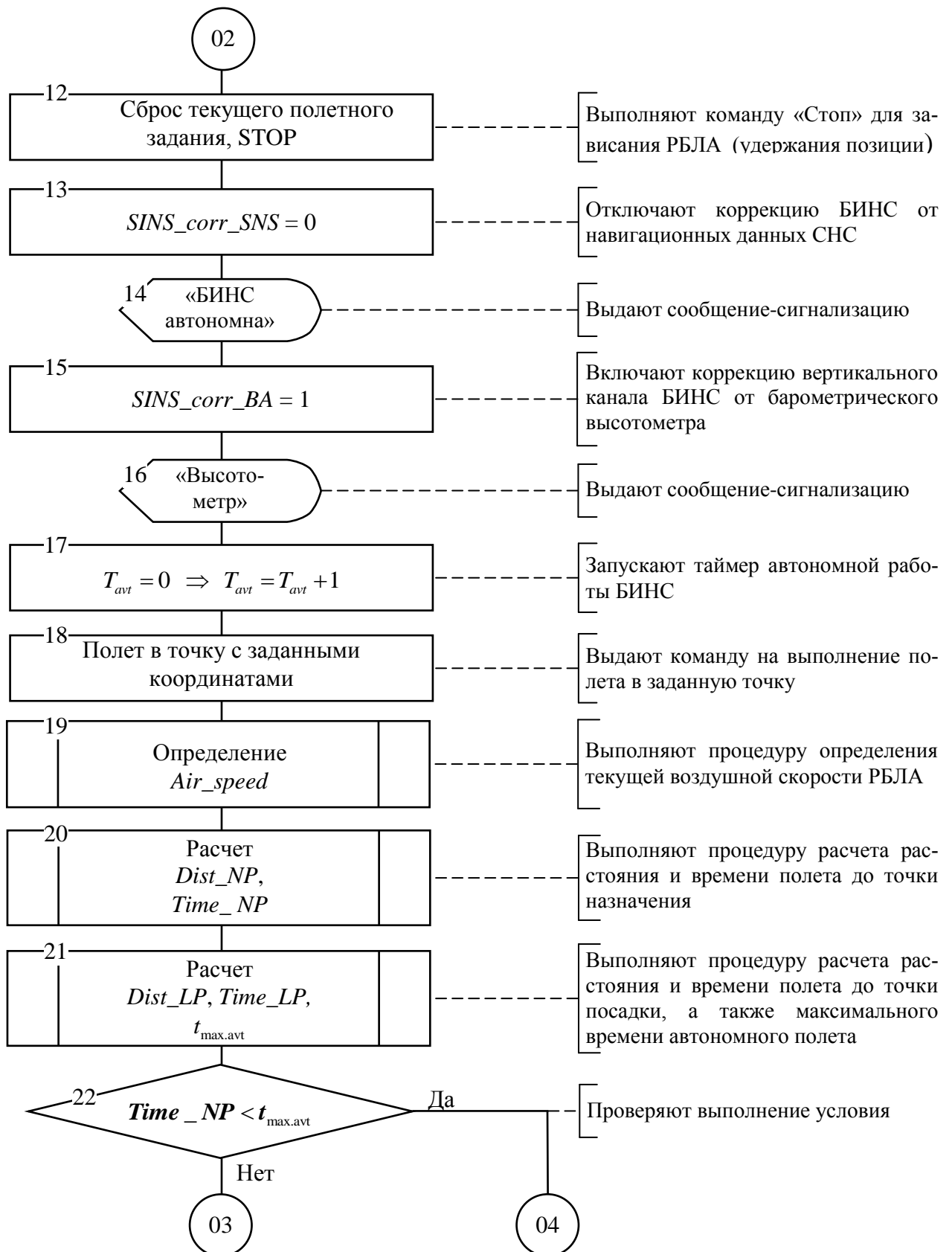


Рисунок И.2 – Алгоритм управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС (продолжение)

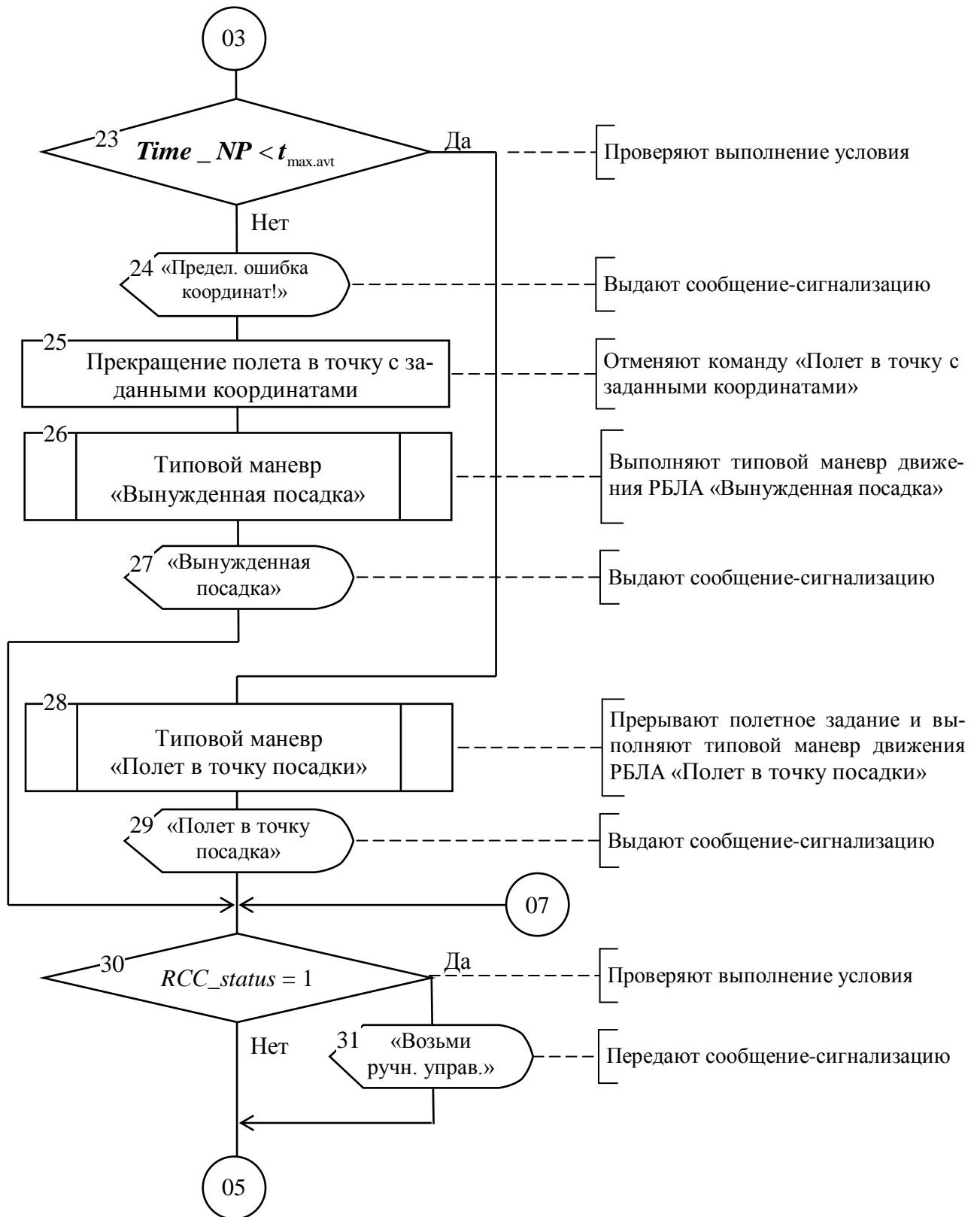


Рисунок И.3 – Алгоритм управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС (продолжение)

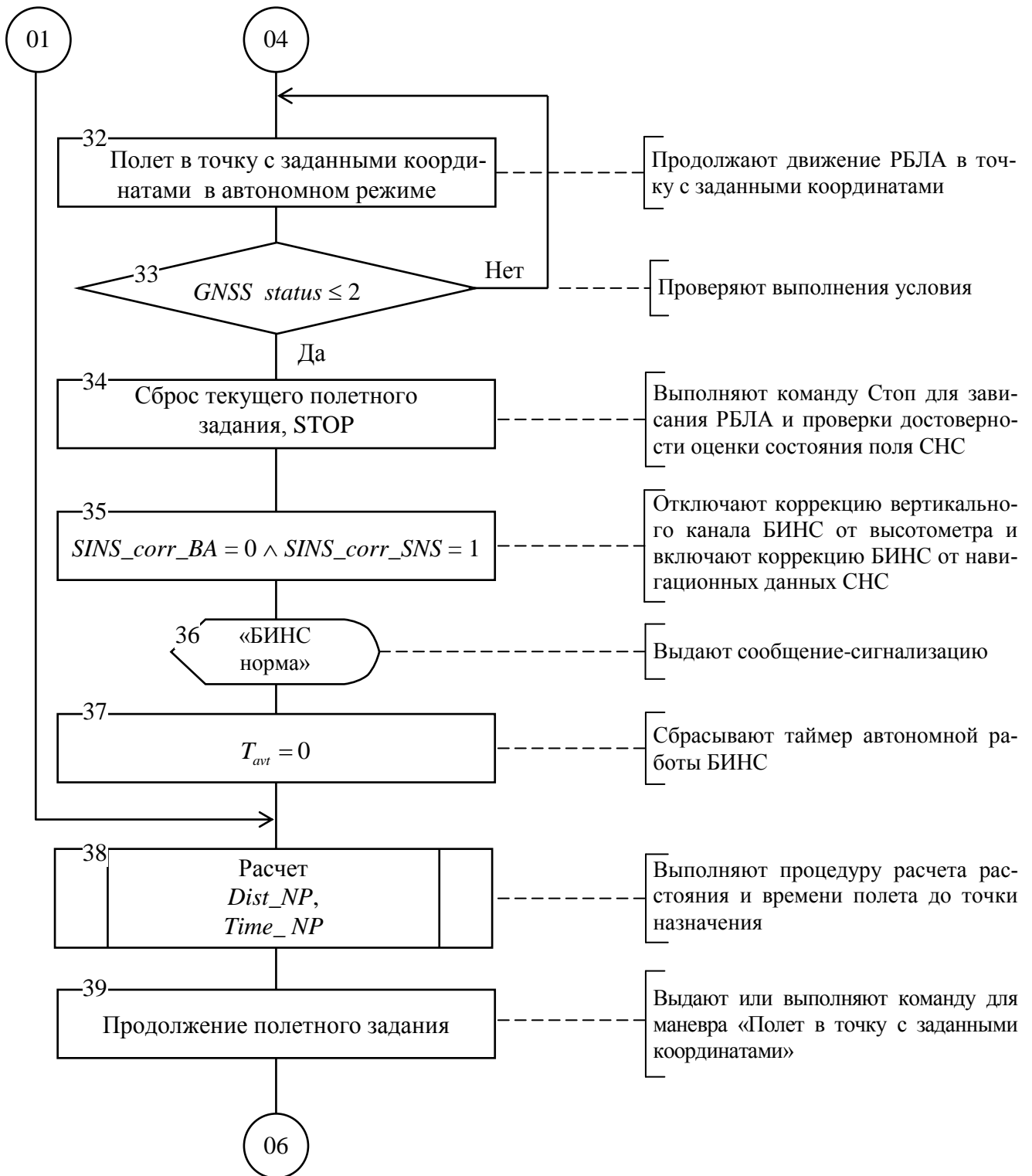


Рисунок И.4 – Алгоритм управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС (продолжение)



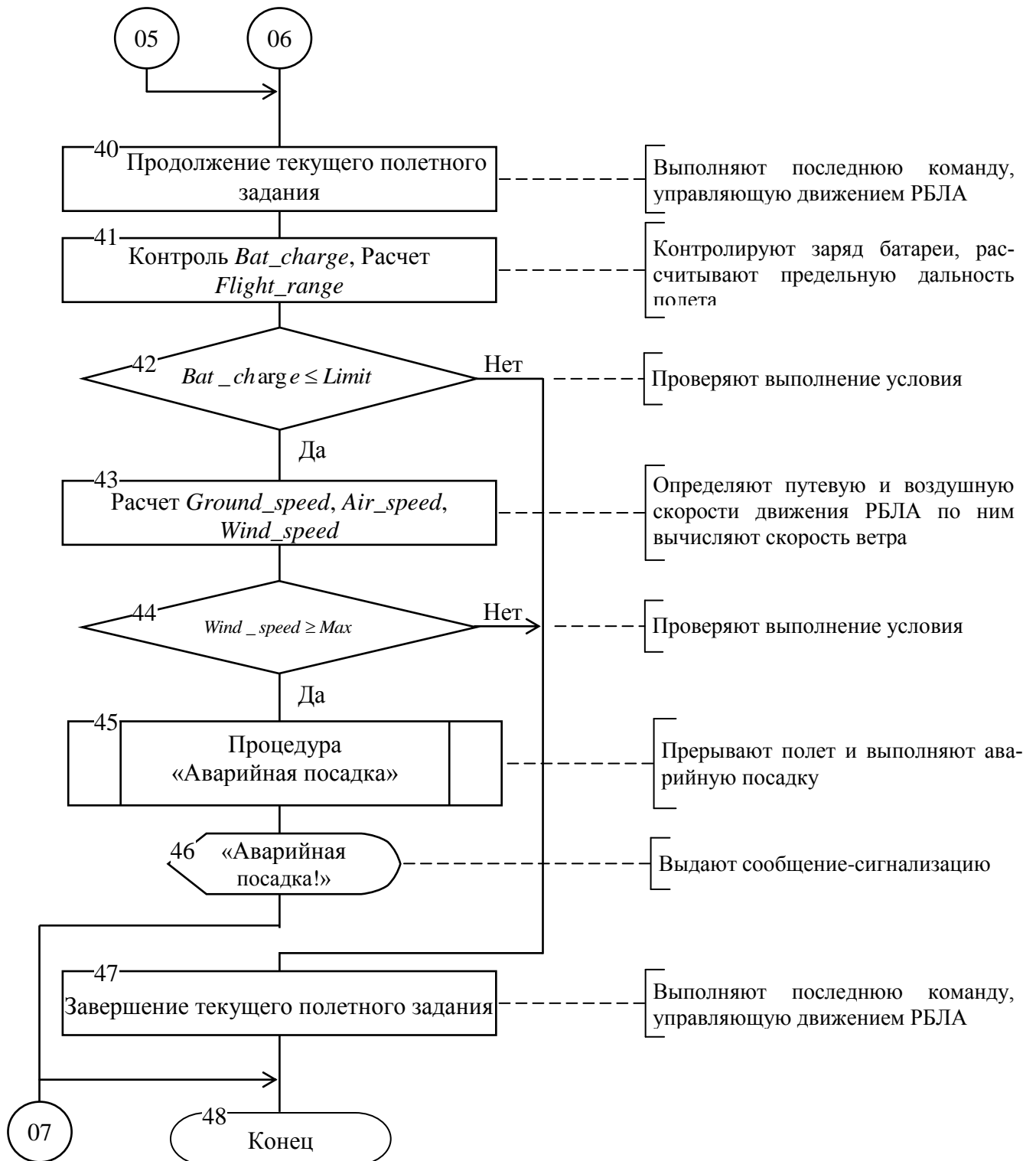


Рисунок И.5 – Алгоритм управления БЛА в режиме автономного полета при подавлении/искажении навигационного поля GPS/ГЛОНАСС (продолжение)