



Научная статья

УДК 004.4

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189164>

EDN: <https://www.elibrary.ru/AEPRDC>

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОБРАБОТКИ АЭРОНАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ С КОРРЕКЦИЕЙ НАВИГАЦИОННОГО РЕШЕНИЯ ПО ДАННЫМ ОТ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЯ В ВОЗДУХЕ

Д.Ю. Мациук  

Филиал публичного акционерного общества "Яковлев" - Центр комплексирования,

г. Москва, Россия

 daniil.matsiyuk@yandex.ru

Цитирование: Мациук Д.Ю. Разработка программно-алгоритмического обеспечения обработки информации с коррекцией навигационного решения по данным от системы предупреждения столкновения в воздухе Труды МАИ: электрон. журнал. № 149. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=189164>

Аннотация. Работа посвящена актуальной проблеме обеспечения устойчивости и точности навигационного решения современных гражданских воздушных судов в условиях динамично меняющейся среды. Основное внимание уделяется разработке и программной реализации специализированных алгоритмов, позволяющих осуществлять коррекцию текущих координат борта за счет обработки информации, поступающей от традиционных источников навигационной информации и от систем предупреждения столкновений совместно с модулем автоматического независимого наблюдения. В условиях нарастающей интенсивности воздушного движения и потенциальной уязвимости глобальных навигационных спутниковых систем к внешним помехам, создание альтернативных и резервных методов определения текущих координат местоположения самолета становится критически важным направлением развития авиационной отрасли.

В работе раскрывается архитектура программно-алгоритмического

комплекса, способного интегрировать разнородные потоки данных в единый навигационный контур. Основой предлагаемого решения выступает математический аппарат расширенного фильтра Калмана, который эффективно справляется с задачами фильтрации стохастических шумов и линеаризации уравнений измерения при работе с нелинейными координатами. Особое место в работе занимает описание механизмов временной синхронизации и экстраполяции данных, необходимых для компенсации задержек в каналах связи и приведения всех измерений к единому моменту времени.

В рамках реализации проекта внедрена система адаптивного оценивания геометрического фактора расположения окружающих целей, от которых система предупреждения столкновений в воздухе получает данные. Это позволяет программному комплексу приоритизировать информацию от наиболее выгодно расположенных воздушных судов, минимизируя влияние неблагоприятной геометрии на итоговую ошибку позиционирования. Применяемые алгоритмы контроля целостности и валидации данных обеспечивают предварительную фильтрацию от аномальных выбросов и ложных сигналов, повышая достоверность формируемого навигационного решения. Результаты проведенных имитационных экспериментов демонстрируют устойчивое снижение погрешностей определения координат, что подтверждает практическую эффективность предложенных алгоритмических подходов.

Ключевые слова: коррекция навигационного решения; целостность навигационного решения; избыточность навигационного решения; системы предупреждения столкновений; пилотажно-навигационный комплекс; расширенный фильтр Калмана; автоматическое зависимое наблюдение; алгоритмы обработки данных; бортовое оборудование.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR PROCESSING AERONAUTICAL INFORMATION WITH CORRECTION OF NAVIGATION DECISIONS BASED ON DATA FROM THE AIRBORNE COLLISION WARNING SYSTEM AIR

D.Y. Matsyuk 

Branch of Public Joint Stock Company Yakovlev – integration center, Moscow, Russia

 daniil.matsiyuk@yandex.ru

Abstract. The presented scientific paper focuses on the pressing challenge of ensuring the robustness and accuracy of navigational support for modern civil aircraft within a dynamically evolving environment. The primary emphasis is placed on the development and software implementation of specialized algorithms capable of correcting the aircraft's current coordinates through the intelligent processing of information supplied by airborne collision avoidance systems and automatic dependent surveillance-broadcast equipment. Amidst the rising intensity of air traffic and the potential vulnerability of global navigation satellite systems to external interference and technical failures, the creation of alternative and redundant positioning methods has emerged as a critically important direction for the aviation industry's advancement.

The text provides a detailed exploration of the architecture of the software-algorithmic complex, which is capable of integrating heterogeneous data streams into a unified navigation loop. The foundation of the proposed solution is the mathematical framework of the Extended Kalman Filter, which effectively manages the tasks of filtering stochastic noise and linearizing measurement equations when dealing with non-linear traffic coordinates. The described algorithm operates on a nine-dimensional state vector, allowing for the consideration of not only position and velocity but also dynamic acceleration characteristics, thereby ensuring high precision in trajectory calculations. A significant portion of the work is dedicated to describing the mechanisms for time synchronization and data extrapolation, which are essential for compensating for communication link delays and aligning all measurements to a single point in time.

As part of the project's execution, a system for the adaptive estimation of the geometric dilution of precision regarding surrounding targets was implemented. This allows the software complex to prioritize information from the most favorably positioned aircraft in real time, minimizing the impact of unfavorable geometry on the final positioning error. The integrated procedures for integrity monitoring and validation of incoming data packets provide protection against anomalous spikes

and false signals, guaranteeing the reliability of the generated navigation solution. The results of the conducted simulation experiments demonstrate a consistent reduction in coordinate determination errors, confirming the practical effectiveness of the proposed algorithmic approaches. The outcome of this activity is the creation of a flexible set of tools ready for scaling and integration into promising airborne computers, laying the groundwork for a qualitative enhancement in flight safety and the autonomy of aviation systems.

Keywords: navigation solution correction; navigation solution integrity; navigation solution redundancy; collision avoidance systems; flight navigation system; extended Kalman filter; automatic dependent surveillance; data processing algorithms; onboard equipment.

Введение

Современное развитие авиационной отрасли сопровождается устойчивым ростом интенсивности воздушного движения, усложнением структуры маршрутов и повышением требований к безопасности полётов. В этих условиях ключевую роль играет качество функционирования пилотажно-навигационных комплексов, обеспечивающих определение координат, параметров движения и формирование управляющих воздействий. Традиционные подходы к построению навигационного решения основаны на интеграции данных инерциальных (ИНС) и спутниковых (СНС) навигационных систем [2], дополненных радиотехническими средствами. Несмотря на высокую точность в штатных условиях, такие схемы остаются уязвимыми к помехам, экранированию сигналов и динамическим изменениям внешней обстановки или полной деградации сигналов, что приводит к снижению достоверности навигационной информации [8].

Одним из перспективных направлений повышения устойчивости навигационного решения является использование дополнительных источников данных, ранее применявшихся исключительно в смежных задачах. Особый интерес представляет система предупреждения столкновения в воздухе (СПСВ) [14], способная формировать относительные параметры движения воздушных

судов (ВС). Данные о дальности, пеленге и относительной высоте обладают высокой независимостью от спутниковой инфраструктуры и сохраняют работоспособность в условиях помех и высокой плотности воздушного движения. Это открывает возможности для их использования в качестве дополнительного информационного канала в составе комплексной обработки [13].

Актуальность работы обусловлена необходимостью разработки специализированного программно-алгоритмического обеспечения, интегрирующего данные системы предупреждения столкновения в контур навигационного решения. Цель работы заключается в повышении точности и устойчивости оценки параметров движения за счёт привлечения относительных измерений и их согласования с традиционными источниками [6]. В рамках поставленной задачи рассматриваются вопросы архитектурной организации, алгоритмов обработки информации и оценки эффективности предложенных решений.

Анализ современных навигационных систем и источников ошибок

Современные пилотажно-навигационные комплексы воздушных судов представляют собой интегрированные системы, объединяющие источники информации различной физической природы. Пример традиционной интегрированной схемы формирования комплексного навигационного решения представлен на рисунке 1 [2]. Ее основой является ИНС, обеспечивающая непрерывное определение координат и параметров движения за счёт интегрирования сигналов акселерометров и гироскопов. Ключевым преимуществом ИНС является ее автономность, однако характерный дрейф приводит к накоплению ошибок, что требует обязательного привлечения внешних корректирующих источников.

СНС выступает основным средством абсолютного позиционирования, обеспечивая высокую точность при благоприятных условиях приёма. Вместе с тем их функционирование зависит от геометрии спутникового созвездия, уровня помех и условий распространения радиосигналов [10]. Многолучевость,

ионосферные задержки и экранирование антенн способны существенно ухудшать точность измерений или приводить к временной потере навигационной информации, а в условиях активного радиопротиводействия данные ограничения становятся критическими [9].

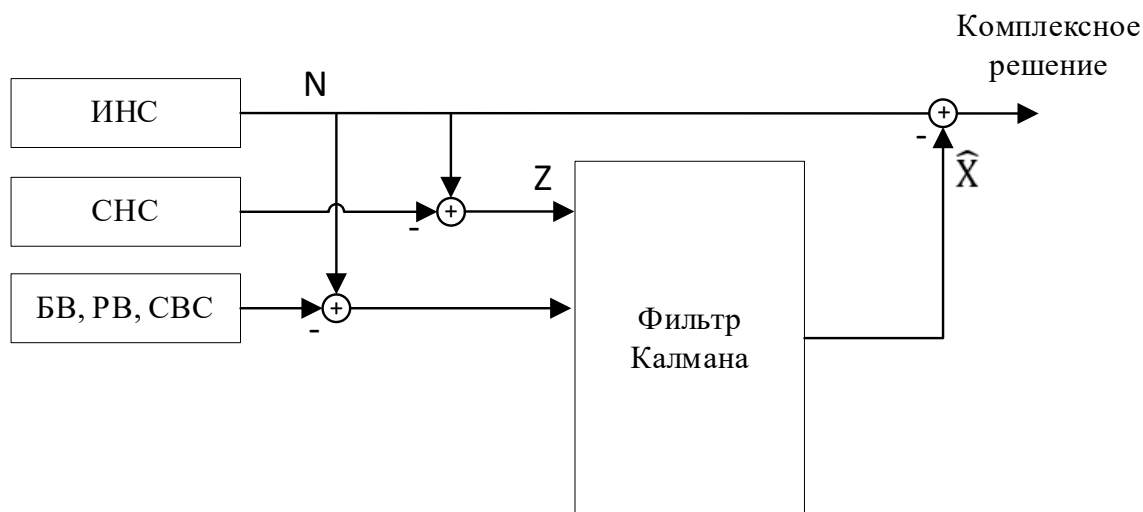


Рисунок 1 – традиционная схема формирования комплексного навигационного решения

Дополнительными источниками информации выступают радиотехнические системы, такие как VOR и DME. Радионавигационные средства характеризуются высокой надёжностью в пределах зоны покрытия, однако их применение ограничено географическим расположением наземной инфраструктуры. В результате каждый источник обладает собственным набором ограничений, влияющих на итоговую точность навигационного решения [11].

Особое внимание в работе уделяется системам наблюдения воздушной обстановки, таким как СПСВ и АЗН-В [15]. Они формируют информацию о взаимном положении воздушных судов и обеспечивают высокую устойчивость к внешним воздействиям. При этом точностные характеристики данных различаются: измерение дальности отличается высокой достоверностью, тогда как пеленг определяется с меньшей точностью из-за особенностей антенных систем. Несмотря на это, подобные данные обладают значительным потенциалом для использования в задачах навигации при условии корректной обработки полученных сигналов.

Ошибки навигационных систем классифицируются по источнику возникновения и характеру проявления. Систематические составляющие

обусловлены калибровочными параметрами и особенностями аппаратуры, случайные – шумами измерений, а грубые возникают вследствие отказов или помех. Существенное влияние оказывает временная несогласованность данных, возникающая при различной частоте обновления и задержках передачи информации. Накопление и сочетание перечисленных факторов формирует сложную структуру погрешностей, требующую применения адаптивных методов обработки и интеграции информации.

Анализ существующих навигационных средств показывает, что ни один из источников не способен обеспечить требуемый уровень точности и устойчивости во всех условиях эксплуатации. Ограничения, присущие конкретному каналу, проявляются в зависимости от внешней обстановки и режима полёта. Это обосновывает необходимость разработки методов, ориентированных на расширение информационной избыточности и привлечение альтернативных источников данных, способных повысить надёжность навигационного решения.

Постановка задачи

Рассматриваемые особенности современных навигационных систем и потенциал использования данных от СПСВ позволяют сформулировать задачу разработки программно-алгоритмического обеспечения, ориентированного на повышение устойчивости и точности навигационного решения. Ключевым направлением является включение относительных измерений в существующий контур комплексной обработки информации с сохранением требований к надёжности, быстродействию и предсказуемости работы.

Формализация задачи предполагает представление навигационного решения в виде оценки вектора состояния, включающего координаты, высоту, дальность и дополнительные параметры движения воздушного судна [5]. Входная информация формируется совокупностью данных от ИНС, СНС и дополнительных источников, среди которых рассматриваются измерения СПСВ. Особенностью последних является их относительный характер, что требует разработки процедур преобразования в псевдоизмерения,

согласованные с текущей системой координат и моделью движения [13]. На рисунке 2 представлена предлагаемая схема формирования комплексного навигационного решения, основанная на интегрировании СПСВ в традиционный навигационный контур.

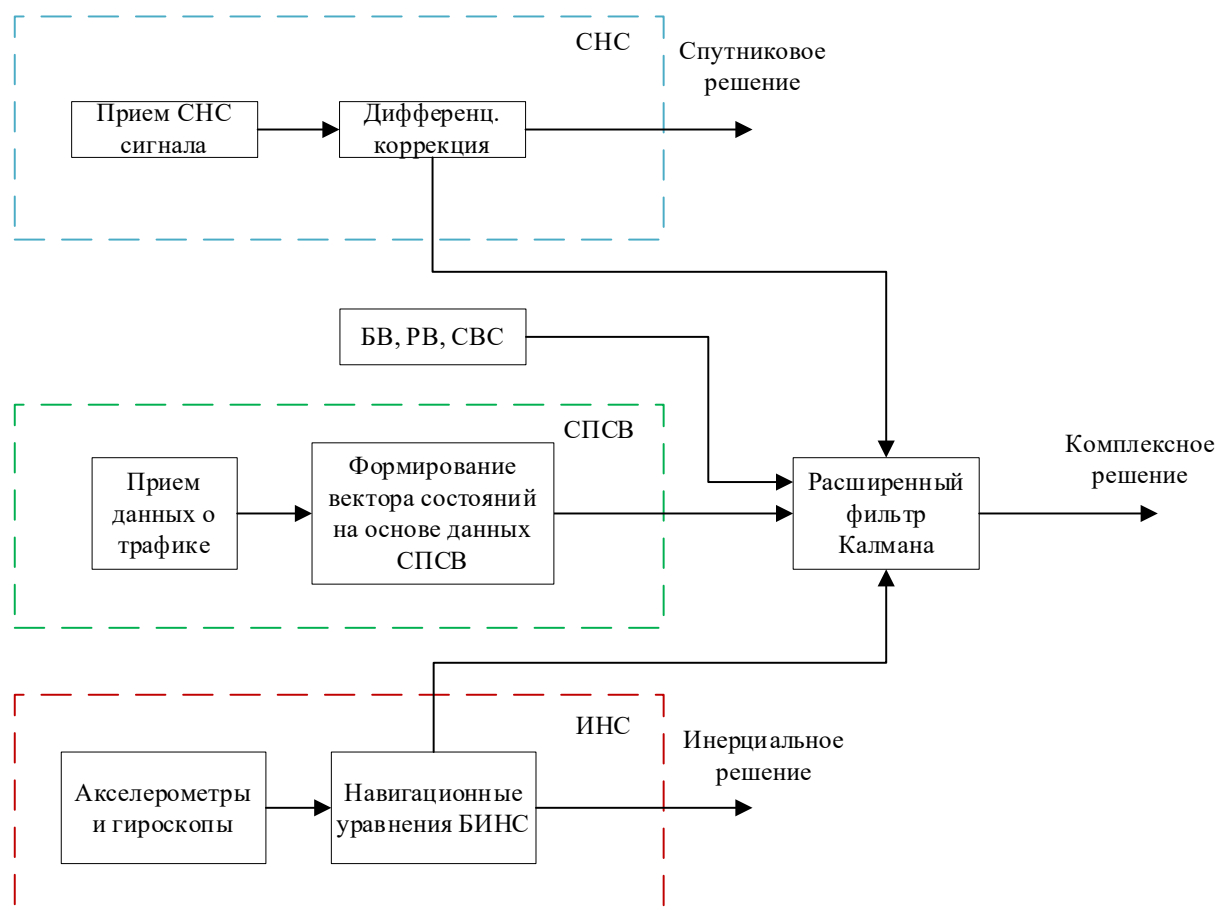


Рисунок 2 – предлагаемая схема формирования комплексного навигационного решения

Существенным аспектом предложенного решения является обеспечение корректной обработки данных различной природы и точностных характеристик. Алгоритмы должны учитывать неоднородность шумов, наличие систематических составляющих и возможность появления грубых ошибок. В связи с этим необходимо ввести требования к робастности, предполагающие устойчивость к выбросам и некорректным измерениям. Дополнительно необходимо обеспечить адаптивное взвешивание источников информации в зависимости от текущих условий полёта и качества входных данных.

Особое внимание уделяется временной согласованности информации. Данные СПСВ поступают с иной частотой и задержками по сравнению с инерциальными и спутниковыми измерениями, что требует реализации

механизмов синхронизации, интерполяции и учёта возраста данных. Нарушение этих условий способно привести к ухудшению оценки текущих координат [23].

В рамках поставленной задачи формируются требования к архитектуре программного обеспечения. Предполагается модульный подход, при котором выделяются блоки предобработки данных от СПСВ и АЗН-В, формирования вектора измерений, фильтрации и коррекции навигационного решения. Каждый из модулей должен функционировать в условиях ограниченных вычислительных ресурсов и удовлетворять требованиям, предъявляемым к системам реального времени [16]. Это накладывает ограничения на сложность алгоритмов и требует оптимизации вычислительных процедур [23], [28].

Дополнительно учитываются требования безопасности и целостности данных. Поскольку СПСВ функционирует на основе радиоканалов, возможны ситуации поступления некорректной или недостоверной информации. В алгоритмах должны быть предусмотрены механизмы валидации и кросс-проверки данных, исключающие их негативное влияние на навигационное решение [17], [18], [19].

Анализ возможностей использования данных СПСВ в навигационных задачах

СПСВ традиционно рассматривается как средство обеспечения безопасности полётов, ориентированное на выявление конфликтных ситуаций и выдачу рекомендаций по их разрешению. Однако функциональные возможности данной системы выходят за рамки исключительно предупреждения столкновений и позволяют рассматривать её как дополнительный источник навигационной информации. Формируемые СПСВ данные включают относительную дальность до цели, пеленг и разность барометрических высот, что в совокупности описывает взаимное положение воздушных судов в пространстве [25], [26].

Особенностью данных, выдаваемых СПСВ, является их независимость от спутниковой инфраструктуры и наземных радионавигационных средств. Измерения формируются на основе ответов транспондеров других воздушных судов, что обеспечивает устойчивость к ряду внешних воздействий, включая

затенение сигналов и ухудшение геометрии спутникового созвездия [27]. Это свойство делает систему особенно ценной в условиях деградации традиционных навигационных каналов, например при полётах в зонах с повышенным уровнем помех или при ограниченной видимости спутников [1].

Точностные характеристики измерений СПСВ неоднородны. Дальность определяется на основе времени распространения радиосигнала и характеризуется высокой точностью, тогда как оценка пеленга зависит от конфигурации антенной системы и имеет большую погрешность. Относительная высота формируется на основе барометрических данных другого воздушного судна, что может приводить к появлению систематических отклонений. При этом совокупность данных остаётся информативной, особенно при наличии нескольких целей, распределённых в пространстве [20].

Использование СПСВ в навигационных задачах требует преобразования относительных измерений в форму, пригодную для интеграции с текущим навигационным решением. Для этого применяются методы формирования псевдоизмерений, позволяющие связать координаты собственного воздушного судна с координатами наблюдаемых целей. Эффективность такого подхода зависит от геометрического расположения целей: чем более равномерно они распределены по азимуту и дальности, тем выше наблюдаемость и тем устойчивее процесс коррекции [21].

Дополнительным фактором является динамика обновления данных. Частота выдачи информации от СПСВ ниже, чем от инерциальных систем, и зависит от числа сопровождаемых объектов и активного режима работы [24]. Это накладывает требования на алгоритмы согласования по времени и интерполяции измерений. При некорректной синхронизации возможно возникновение значительных ошибок, особенно в условиях интенсивных манёвров.

Потенциал использования СПСВ существенно возрастает при интеграции выдаваемых им данных с одновременным учетом данных, получаемых по каналу автоматического зависимого наблюдения-вещания (АЗН-В) [27]. В этом случае относительные измерения дополняют абсолютные координаты, снижая

неопределённость оценки состояния и повышая устойчивость навигационного решения [24]. Вследствие этого формируется предпосылка для создания алгоритмов, способных адаптивно учитывать качество входных данных и эффективно использовать информацию о воздушной обстановке в задачах навигации.

Архитектура программно-алгоритмического обеспечения

Архитектура разрабатываемого программно-алгоритмического обеспечения ориентирована на интеграцию разнородных источников навигационной информации в едином контуре комплексной обработки с обеспечением требований реального времени, надёжности и масштабируемости. В основе построения лежит модульный принцип, позволяющий разделить функции по этапам обработки и обеспечить гибкость при расширении состава используемых данных, блок схема работы которого представлена на рисунке 3.

На первом уровне архитектуры располагается модуль приёма и предобработки информации. Его задачей является сбор данных от инерциальной системы, спутниковых приёмников и СПСВ, включая АЗН-В. На данном этапе выполняется контроль целостности, проверка диапазонов значений, фильтрация выбросов и приведение форматов данных к единому представлению. Дополнительно реализуется механизм временной привязки, обеспечивающий согласование измерений с учётом задержек передачи и различной частоты обновления [12]. Это позволяет сформировать корректный набор входных параметров для последующей обработки.

Следующий уровень представлен модулем формирования вектора измерений. Здесь осуществляется преобразование исходных данных в структуру, пригодную для использования в алгоритмах оценивания состояния. Особое место занимает обработка информации от СПСВ, поскольку её данные имеют относительный характер. На данном этапе формируются псевдоизмерения, связывающие параметры движения собственного воздушного судна с положением наблюдаемых целей [10]. При этом учитываются геометрия

расположения целей, точностные характеристики измерений и признаки их достоверности.

Центральным элементом архитектуры является модуль оценивания состояния, реализующий алгоритмы фильтрации. В качестве базового подхода используется рекурсивная схема, основанная на прогнозе состояния и его коррекции по поступающим измерениям. Модуль обеспечивает объединение данных различной природы с учётом их статистических характеристик и формирует оптимальную оценку параметров движения. Важной особенностью является возможность адаптивной настройки ковариационных параметров, позволяющая учитывать изменение условий полёта и качества входной информации. Это повышает устойчивость алгоритма и снижает влияние некорректных измерений.

Отдельный функциональный блок отвечает за управление качеством данных и робастность обработки. В его составе реализованы процедуры контроля согласованности измерений, обнаружения аномалий и исключения грубых ошибок. Для данных системы предупреждения столкновения вводятся дополнительные критерии достоверности, основанные на анализе динамики целей и согласовании с прогнозируемым состоянием. В случае выявления несоответствий измерения исключаются из процесса коррекции или получают пониженный вес.

Далее располагается модуль формирования выходного навигационного решения. Он обеспечивает выдачу оценок координат, скорости и других параметров движения в стандартизированном формате для использования в бортовых системах управления. Дополнительно формируются показатели точности и доверия к решению, позволяющие оценивать его пригодность для различных режимов полёта.

Разработанная архитектура предусматривает наличие подсистемы управления вычислительными ресурсами, обеспечивающей выполнение алгоритмов в условиях ограничений реального времени. Реализуется приоритетная диспетчеризация задач, распределение нагрузки между вычислительными модулями и контроль времени выполнения операций [22].

Это гарантирует предсказуемость работы системы и исключает превышение допустимых задержек.

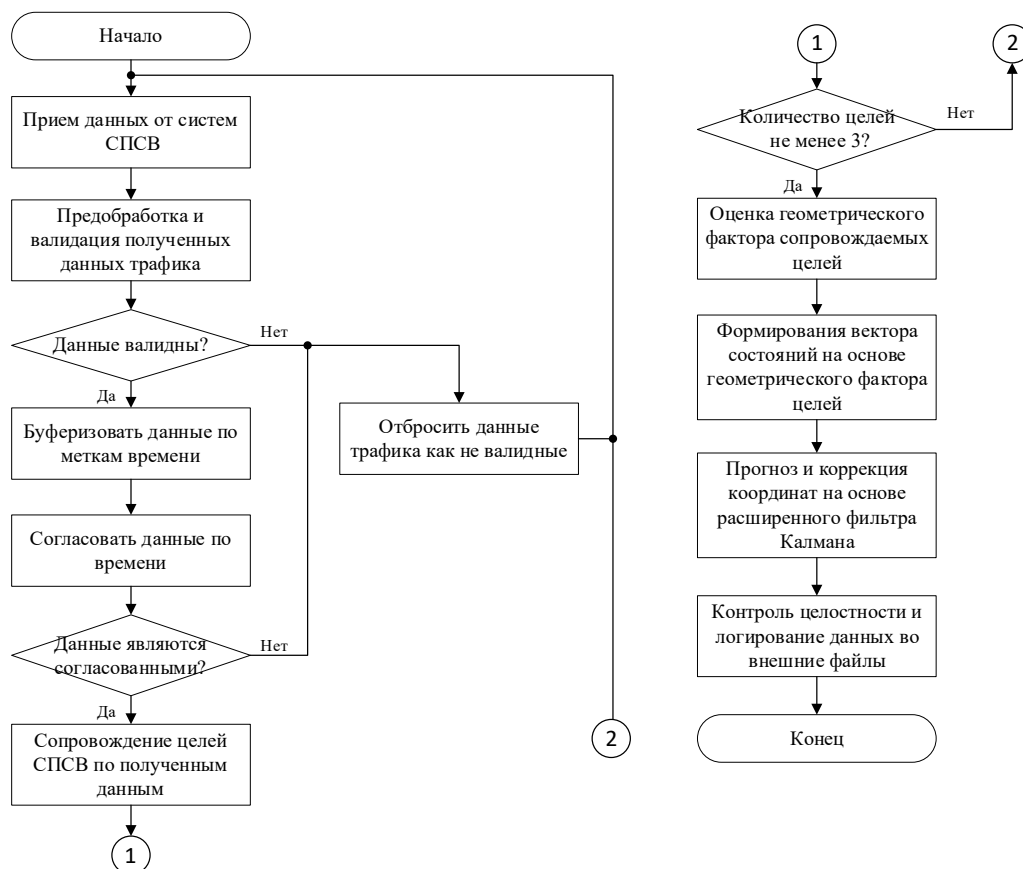


Рисунок 3 – модульный принцип работы программно-алгоритмического обеспечения

Моделирование функционирования разработанного программно-алгоритмического обеспечения

С целью оценки влияния данных системы предупреждения столкновения на точность и устойчивость навигационного решения в различных условиях полёта проведено моделирование функционирования разработанного программно-алгоритмического обеспечения. Экспериментальная среда сформирована в виде имитационной модели, воспроизводящей движение воздушного судна, характеристики бортовых датчиков и параметры внешней обстановки [3]. В качестве исходных данных используются сценарии, включающие прямолинейные участки полёта, манёвры с изменением курса и высоты, а также ситуации с ограниченной доступностью спутниковой навигации.

Модель измерений построена с учётом статистических характеристик ошибок каждого источника. Для ИНС заданы параметры дрейфа и шумов

датчиков, для СНС учтен геометрический фактор и возможные помехи, а для СПСВ смоделированы ошибки дальности [7]. Дополнительно введены задержки обновления данных и вероятностные пропуски измерений, отражающие реальные условия эксплуатации.

Экспериментальная часть включает серию численных испытаний, в ходе которых сравниваются два варианта навигационного решения: базовый (основанный на традиционной интеграции инерциальных и спутниковых данных) и расширенный (дополненный обработкой информации от СПСВ). Оценка эффективности проводится по ряду критериев, среди которых среднеквадратическая ошибка определения координат, устойчивость решения при деградации спутниковых сигналов и скорость сходимости алгоритма после возмущений [19].

Особое внимание уделяется сценариям с ухудшением условий приёма спутниковых сигналов. В таких ситуациях наблюдается рост ошибки базового решения вследствие увеличения вклада инерциального дрейфа. Включение данных СПСВ позволяет ограничить накопление ошибки за счёт использования относительных измерений, формирующих дополнительные ограничения на положение воздушного судна. Эффект наиболее выражен при наличии нескольких целей, равномерно распределённых в пространстве.

Результаты моделирования

Результаты моделирования показали, что включение данных СПСВ в контур обработки навигационной информации позволяет уменьшить накопление ошибки координат при ухудшении качества спутниковой навигации, что отражено на рисунке 4.

Начиная с 300-ой секунды моделирования, после намеренного повышения ошибки сигналов СНС (имитация деградации сигнала СНС), базовый алгоритм определения текущих координат местоположения самолёта демонстрировал постепенный рост ошибки по широте и долготе, тогда как предлагаемый алгоритм с использованием коррекции по данным от СПСВ

и АЗН-В показал, что ошибка по долготе и широте сохраняется на прежнем уровне и не подвержена ухудшению спутниковых сигналов.



Рисунок 4 – результаты моделирования разработанного программно-алгоритмического обеспечения

Дополнительно, полученные результаты демонстрируют, что предлагаемое решение не вносит дополнительной ошибки в определение координат, так как механизм адаптивного взвешивания измерений на основе геометрического фактора исключает влияние недостоверных векторов состояния от удаленных и не благоприятно расположенных целей. Вследствие этого обеспечивается стабильность навигационного контура и предотвращается накопление систематической ошибки. Это позволяет констатировать, что разработанный алгоритм отвечает функциональным требованиям к современным бортовым системам и может выступать в роли резервного канала навигационных данных при определении текущих координат местоположения самолёта.

Проведённая оценка результатов подтвердила целесообразность использования данных СПСВ и АЗН-В в задачах коррекции навигационного решения. Полученные результаты демонстрируют, что интеграция

дополнительных источников информации позволяет повысить надёжность и обеспечить более устойчивое функционирование навигационного контура в условиях неопределённости и ограниченности традиционных каналов.

Архитектура программной реализации, выполненная на модульной основе, доказала свою гибкость и готовность к масштабированию. В итоге разработано программно-алгоритмическое обеспечение пригодно для интеграции в бортовые пилотажно-навигационные комплексы. Практическая ценность полученных результатов заключается в возможности повышения автономности воздушных судов и обеспечении более безопасного эшелонирования в условиях интенсивного трафика.

Заключение

В рамках проведенной работы обоснована и реализована концепция программно-алгоритмического комплекса для уточнения навигационных параметров воздушного судна. В результате работы доказана принципиальная возможность эффективного использования данных от систем предупреждения столкновений и вещательного наблюдения в качестве дополнительного источника позиционирования. Предложенная архитектура на базе расширенного фильтра Калмана продемонстрировала устойчивость к зашумленным внешним измерениям. Вследствие этого достигнута стабильная работа навигационного контура даже в условиях деградации сигналов СНС. Разработанные методы фильтрации позволяют снизить вероятность появления критических ошибок координат. Установлено, что наличие нескольких сопровождаемых целей повышает устойчивость коррекции и снижает зависимость навигационного решения от отдельных источников информации. Результаты работы показывают перспективность дальнейшего развития алгоритмов совместной обработки данных СПСВ, АЗН-В и инерциальных систем в задачах построения устойчивых навигационных комплексов воздушных судов. Это позволяет рассматривать внедрение разработанного алгоритма как важный шаг к повышению автономности бортового оборудования.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Список источников

1. Авиационная радионавигация: Справочник / под ред. А.А. Сосновского. — М.: Транспорт, 1990. — 264 с.
2. Бабиц О.А. Обработка информации в навигационных системах. — М.: Машиностроение, 1991. — 512 с.
3. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
4. Неретин Е.С., Будков А.С. Архитектура и алгоритмическое обеспечение перспективных систем самолетовождения // Вестник МАИ. 2018. Т. 25. № 3. С. 145-156.
5. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms and Software. – New York: Wiley-Interscience, 2001. – 592 p.
6. Brown R. G., Hwang P. Y. C. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering with MATLAB Exercises. – 4th ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. – 400 p.
7. Gelb A. (ed.). Applied Optimal Estimation. – Cambridge, MA: The MIT Press, 1974. – 374 p.
8. Grewal M. S., Weill L. R., Andrews A. P. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration. – 2nd ed. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. – 552 p.
9. Groves P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. – 2nd ed. – Boston: Artech House, 2013. – 800 p.
10. Kaplan E. D., Hegarty C. J. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications. – 3rd ed. – Boston: Artech House, 2017. – 1064 p.
11. Kayton M., Fried W. R. Avionics Navigation Systems. – 2nd ed. – New York: Wiley-Interscience, 1997. – 800 p.
12. RTCA. DO-178C: Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification. – Washington, DC: RTCA, 2011. – 144 p.

13. RTCA. DO-185B: Minimum Operational Performance Standards for Traffic Alert and Collision Avoidance System II (СПСВ II) Airborne Equipment. – Washington, DC: RTCA, 2008. – Vol. I. – 548 p.; Vol. II. – 744 p.
14. RTCA. RTCA/DO-283B: Minimum Operational Performance Standards for Required Navigation Performance for Area Navigation. – Washington, DC: RTCA, 1997. – 250 p.
15. SAE International. ARP4754A: Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems. – Warrendale, PA: SAE International, 2010. – 115 p.
16. SAE International. ARP4761: Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment. – Warrendale, PA: SAE International, 1996. – 331 p.
17. Spitzer C. R. Avionics. – Boca Raton: CRC Press, 2006. – 228 p.
18. Spitzer C. R. (ed.). Digital Avionics Handbook. – 2nd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2006. – 446 p.
19. AIM Online. ARINC 429 Tutorial [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.aim-online.com/products-overview/tutorials/arinc-429-tutorial/> – Дата обращения: 14.04.2026.
20. EASA. Deviations for an ETSO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/certification-docs-deviation-ETSO.DevP.64-rev-A.pdf> – Дата обращения: 14.04.2026.
21. Electronic Code of Federal Regulations (eCFR). 14 CFR § 91.227 Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) Out equipment performance requirements [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-91/subpart-C/section-91.227> – Дата обращения: 14.04.2026.
22. EUROCONTROL. ACAS Guide – Airborne Collision Avoidance Systems. Version 5.0 (April 2025) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2025-09/eurocontrol-safety-acas-guide-5-0.pdf> – Дата обращения: 14.04.2026.
23. Federal Aviation Administration (FAA). Advisory Circular AC 20-115D: Airborne Software Development Assurance Using EUROCAE ED-12 and

RTCA DO-178 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_20-115D.pdf – Дата обращения: 14.04.2026.

24. Federal Aviation Administration (FAA). Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/avs/offices/afx/afs/afs400/afs410/ADS-B – Дата обращения: 14.04.2026.

25. Federal Aviation Administration (FAA). Installation (ADS-B equipage) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.faa.gov/air_traffic/technology/equipadsb/installation – Дата обращения: 14.04.2026.

26. Federal Aviation Administration (FAA). Introduction to TCAS II version 7.1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/СПСВ%20ii%20v7.1%20intro%20booklet.pdf – Дата обращения: 14.04.2026.

27. Legal Information Institute, Cornell Law School. 14 CFR § 91.225 Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) Out equipment and use [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/14/91.225> – Дата обращения: 14.04.2026.

28. RTCA. DO-178() Software Standards Documents & Training [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rtca.org/do-178/> – Дата обращения: 14.04.2026.

References

1. Aviation Radio Navigation: Handbook / ed. by A.A. Sosnovsky. Moscow: Transport, 1990, 264 pp.
2. Babich, O.A. Information Processing in Navigation Systems. Moscow: Mashinostroenie, 1991, 512 pp.
3. Bar-Shalom Y., Li X. R., Kirubarajan T. Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory, Algorithms and Software. New York, Wiley-Interscience, 2001, 592 p.

4. Besekerskiy V. A., Popov E. P. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory of Automatic Control Systems]. St. Petersburg, Professiya, 2003, 752 p.
5. Brown R. G., Hwang P. Y. C. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering with MATLAB Exercises. 4th ed. Hoboken, John Wiley & Sons, 2012, 400 p.
6. Gelb A. (ed.). Applied Optimal Estimation. Cambridge, MA, The MIT Press, 1974, 374 p.
7. Grewal M. S., Weill L. R., Andrews A. P. Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration. 2nd ed. Hoboken, John Wiley & Sons, 2007, 552 p.
8. Groves P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. 2nd ed. Boston, Artech House, 2013, 800 p.
9. Kaplan E. D., Hegarty C. J. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications. 3rd ed. Boston, Artech House, 2017, 1064 p.
10. Kayton M., Fried W. R. Avionics Navigation Systems. 2nd ed. New York, Wiley-Interscience, 1997, 800 p.
11. Neretin, E. S., & Budkov, A. S. Architecture and Algorithmic Support for Advanced Aircraft Guidance Systems // MAI Bulletin. 2018. Vol. 25, No. 3. pp. 145–156.
12. RTCA. DO-178C: Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification. Washington, DC, RTCA, 2011, 144 p.
13. RTCA. DO-185B: Minimum Operational Performance Standards for Traffic Alert and Collision Avoidance System II (CIPCB II) Airborne Equipment. Washington, DC, RTCA, 2008, vol. I, 548 p.; vol. II, 744 p.
14. RTCA. RTCA/DO-283B: Minimum Operational Performance Standards for Required Navigation Performance for Area Navigation. Washington, DC, RTCA, 1997, 250 p.
15. SAE International. ARP4754A: Guidelines for Development of Civil Aircraft and Systems. Warrendale, PA, SAE International, 2010, 115 p.
16. SAE International. ARP4761: Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment. Warrendale, PA, SAE International, 1996, 331 p.
17. Spitzer C. R. Avionics. Boca Raton, CRC Press, 2006, 228 p.

18. Spitzer C. R. (ed.). Digital Avionics Handbook. 2nd ed. Boca Raton, CRC Press, 2006, 446 p.
19. AIM Online. ARINC 429 Tutorial. Available at: <https://www.aim-online.com/products-overview/tutorials/arinc-429-tutorial/> (accessed: 14.04.2026).
20. EASA. Deviations for an ETSO. Available at: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/certification-docs-deviation-ETSO.DevP.64-rev-A.pdf> (accessed: 14.04.2026).
21. Electronic Code of Federal Regulations (eCFR). 14 CFR § 91.227 Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) Out equipment performance requirements. Available at: <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-91/subpart-C/section-91.227> (accessed: 14.04.2026).
22. EUROCONTROL. ACAS Guide – Airborne Collision Avoidance Systems. Version 5.0 (April 2025). Available at: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2025-09/eurocontrol-safety-acas-guide-5-0.pdf> (accessed: 14.04.2026).
23. Federal Aviation Administration (FAA). Advisory Circular AC 20-115D: Airborne Software Development Assurance Using EUROCAE ED-12 and RTCA DO-178. Available at: https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_20-115D.pdf (accessed: 14.04.2026).
24. Federal Aviation Administration (FAA). Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B). Available at: https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/avs/offices/afx/afs/afs400/afs410/ADS-B (accessed: 14.04.2026).
25. Federal Aviation Administration (FAA). Installation (ADS-B equipage). Available at: https://www.faa.gov/air_traffic/technology/equipADSb/installation (accessed: 14.04.2026).
26. Federal Aviation Administration (FAA). Introduction to TCAS II version 7.1. Available at: https://www.faa.gov/documentlibrary/media/advisory_circular/TCAS%20ii%20v7.1%20intro%20booklet.pdf (accessed: 14.04.2026).

27. Legal Information Institute, Cornell Law School. 14 CFR § 91.225 Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (A3H-B) Out equipment and use. Available at: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/14/91.225> (accessed: 14.04.2026).

28. RTCA. DO-178 Software Standards Documents & Training. Available at: <https://www.rtca.org/do-178/> (accessed: 14.04.2026).

Информация об авторах

Даниил Юрьевич Мациук, инженер-программист, Филиал публичного акционерного общества "Яковлев" - Центр комплексирования, г. Москва, Россия; ассистент кафедры 703 «Системное проектирование авиационных комплексов», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4985-6763>; e-mail: daniil.matsiyuk@yandex.ru

Information about the authors

Daniil Y. Matsyuk, Software Engineer, Branch of Public Joint Stock Company Yakovlev – integration center, Moscow, Russia; Assistant Professor, Department 703 “Aircraft System Design,” Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-4985-6763>; e-mail: daniil.matsiyuk@yandex.ru

Получено 28 мая 2026 ● Принято к публикации 20 июня 2026 ● Опубликовано 31 августа 2026
Received 28 May 2026 ● Accepted 20 June 2026 ● Published 31 August 2026
