

## БЕЗОПАСНОСТЬ В ВОЗДУХЕ: ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС БПЛА С ФУНКЦИЕЙ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ В ОБЩЕМ ВОЗДУШНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

**Салимжонов Бахтиёр Муминжон угли**

*Независимый исследователь Веремеенко Константин Константинович,  
Московский авиационный институт (национальный исследовательский  
университет), доцент, доцент МАИ*

**Аннотация:** В статье рассмотрена концепция интеграции функций предотвращения столкновений в состав пилотажно-навигационного комплекса (ПНК) беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Показана ограниченность применения традиционных систем, таких как TCAS, на малых и средних беспилотниках вследствие массогабаритных и энергетических ограничений. Предложено решение, основанное на использовании комплексной инерциально-спутниковой навигационной системы и алгоритмов обработки данных, включая фильтр Калмана и алгоритм взаимодействующих моделей (ИММ). Представлены результаты имитационного моделирования, подтверждающие достижимую точность навигационного обеспечения и своевременность формирования сигналов предупреждения. Сделан вывод о перспективности предлагаемого подхода для повышения безопасности полётов и снижения затрат на дополнительное оборудование.

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты; предотвращение столкновений; пилотажно-навигационный комплекс; АЗН-В; алгоритм ИММ; фильтр Калмана; навигационные системы; имитационное моделирование

### ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдается стремительное развитие технологий беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), что открывает новые перспективы в различных областях. В начале XX в. появились новые беспилотные устройства: лодки, автомобили, самолёты. Первоначально БПЛА использовались в качестве разведчиков и мишеней. С начала XXI века БПЛА стали активно использоваться и в гражданских целях. Следует отметить, что мировой рынок БПЛА демонстрирует устойчивый рост. Согласно прогнозам, в 2024 году его объём составил 30,2 млрд долларов США и достигнет 48,5 млрд долларов к 2029 году, что соответствует среднегодовому темпу роста (CAGR) в 9,9% за этот период [1].

Бурный рост сферы применения БПЛА, а также быстрое расширение их функциональных возможностей, предъявляют всё более высокие требования к безопасности полётов. Если ранее БПЛА применялись преимущественно в ограниченных зонах и выполняли задачи наблюдения, то сегодня они активно используются в густонаселённых районах, вблизи инфраструктурных объектов, в

зонах с интенсивным воздушным движением и даже вблизи аэродромов. Всё это увеличивает вероятность возникновения конфликтных ситуаций в воздухе, особенно при одновременной эксплуатации БПЛА и пилотируемых воздушных судов. Под конфликтом в данном контексте понимается ситуация, при которой прогнозируемые траектории двух ЛА приводят к нарушению установленных минимально допустимых дистанций (по вертикали и/или горизонтали).

Безопасная интеграция беспилотных авиационных систем (БАС) в воздушное пространство совместно с пилотируемой авиацией потребует разработки новых средств обнаружения и предотвращения столкновений (Detect and Avoid, DAA).

В рамках решения задачи создания DAA-систем были сформированы два подхода. Первый из них предполагает использование аппаратуры, изначально разработанной для пилотируемой авиации — например, систем TCAS или её модификаций. Хотя этот путь позволяет опереться на проверенные технологии и отработанные алгоритмы, он не учитывает специфики малогабаритных БПЛА, в частности ограничений по весу, энергопотреблению и стоимости, что делает подобные решения малоприменимыми для массового применения в лёгких и средних беспилотных платформах. Второй путь связан с разработкой специализированных DAA-систем для БПЛА, использующих компактные и недорогие датчики общего назначения. Такой подход позволяет адаптировать архитектуру и алгоритмы под особенности конкретного класса БПЛА и сделать решения доступными для широкого круга пользователей.

Целью настоящей работы является разработка и исследование структуры и алгоритма системы обнаружения и предотвращения столкновений на основе данных пилотажно-навигационного комплекса с последующим проведением имитационного моделирования и анализом влияния точности навигации на границы зоны предупреждения.

В отличие от пилотируемой авиации, где преобладает стандартизированная система TCAS, для БПЛА не существует единого общепринятого технического решения. Это обусловлено широким разнообразием типов и классов БПЛА, ограничениями по массе, габаритам и энергопотреблению, а также необходимостью автономной работы без участия пилота. В ответ на эти вызовы разрабатываются различные подходы к реализации систем предотвращения столкновений (СПС), основанные на использовании радиолокационных, оптических, акустических, навигационных и комбинированных методов.

#### Основная часть

В настоящее время на рынке присутствует ограниченное число коммерчески доступных СПС для БПЛА, а многие решения продолжают находиться на стадии испытаний.

В работе предполагается использование БПЛА группы «Средние БПЛА». БПЛА обладает следующими характеристиками:

1. Взлетная масса БПЛА 150-500 кг.

2. Крейсерская скорость полета 150-250 км/ч
3. Высота полета варьируется в диапазоне 3-4 км.
4. Средняя дальность полета 1000 км.

Предлагаемый подход заключается в интеграции функции предотвращения столкновений непосредственно в структуру пилотажно-навигационного комплекса (ПНК) БЛА. Реализация такой интеграции позволяет отказаться от установки дополнительных дорогостоящих и энергоемких транспондеров и радиолокационного оборудования. Функция предотвращения столкновений базируется на современных алгоритмах обработки информации, поступающей от встроенной инерциально-спутниковой навигационной системы БЛА.

На рисунке 1 представлена структура пилотажно-навигационного комплекса БПЛА. Голубым на рисунке обозначен комплекс КНС.

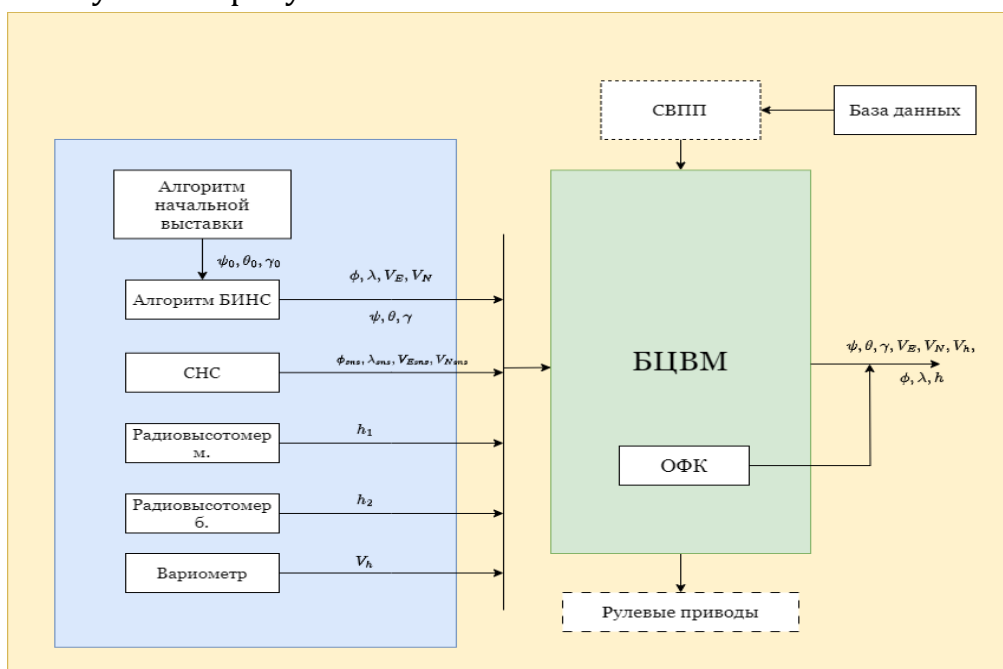


Рисунок 1 - Структура блока комплекса навигационных систем БПЛА

На рисунке 2 представлена структура блока DAA, входящего в состав ПНК. В рамках данной схемы определены ключевые алгоритмические модули, обеспечивающие прогнозирование движения, обнаружение потенциальных конфликтов и формирование траекторий маневров уклонения.

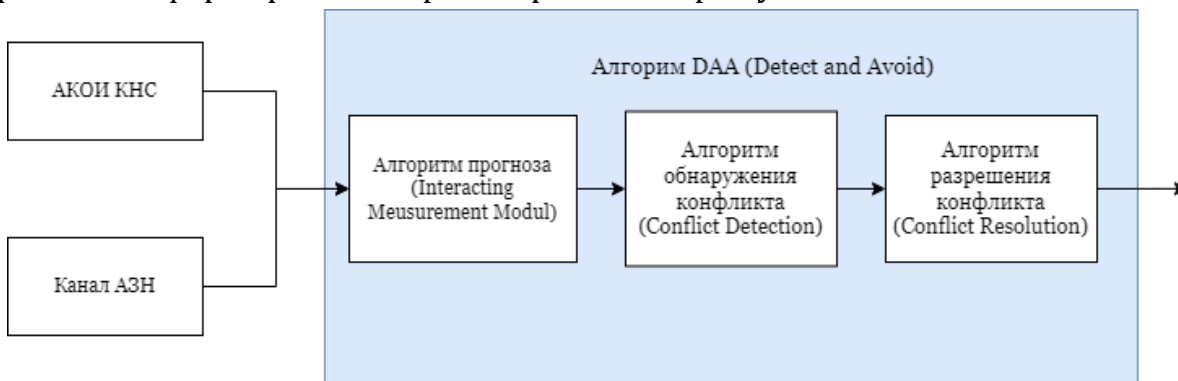


Рисунок 2 - Структура общего алгоритма системы обнаружения и предотвращения

Алгоритм взаимодействующих моделей основан на одновременной работе нескольких параллельных фильтров, каждый из которых соответствует определённой динамической модели поведения объекта. Принцип действия IMM заключается в интегрировании оценок состояния, полученных от каждого из этих фильтров, с учётом вероятностей режимов, которые описываются цепью Маркова. Благодаря этому достигается высокая точность оценки состояний динамических объектов, движение которых включает непредсказуемые манёвры, что особенно актуально для систем обнаружения и предотвращения столкновений БПЛА.

Структурная схема алгоритма IMM представлена на рисунке 3 [13]. На схеме демонстрируются основные этапы алгоритма, которые последовательно выполняются на каждом шаге времени  $k$ .

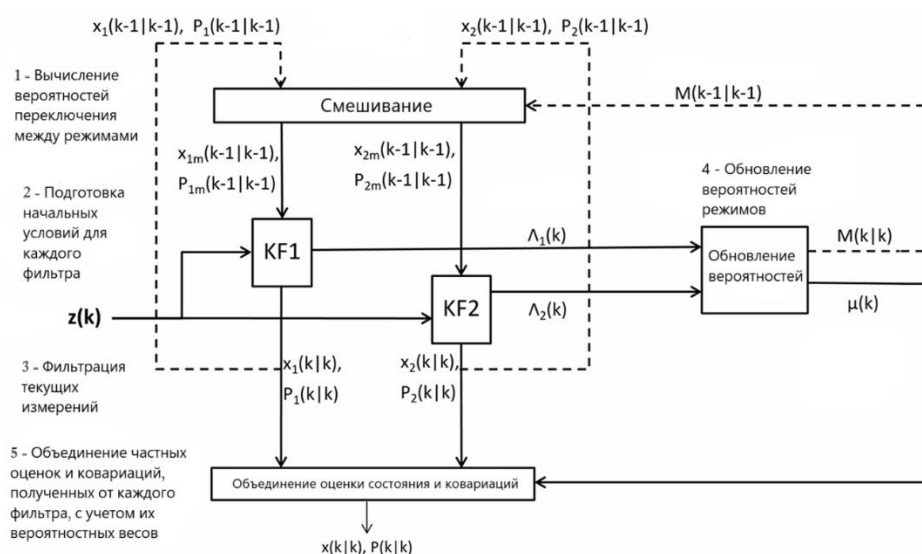


Рисунок 3 - Алгоритм IMM

Методологической основой реализации алгоритма обнаружения конфликта служит определение параметров точки максимального сближения (Closest Point of Approach, CPA), а также расчёт метрик минимального горизонтального и вертикального расстояниями между траекториями. Выявление конфликта осуществляется путём сравнения этих метрик с пороговыми значениями, определяющими границы безопасного полёта. В случае превышения критических порогов генерируется сигнал о возможном конфликте, который в дальнейшем может использоваться подсистемой разрешения конфликтов для расчёта траектории уклонения.

После обнаружения потенциального конфликта между собственным БПЛА и нарушителем на основе алгоритма прогнозирования траекторий, следующим этапом является формирование рекомендаций по манёвру уклонения. Алгоритм разрешения конфликтов направлен на определение такой модификации траектории собственного ЛА, которая обеспечивает восстановление условий безопасного разделения (well clear) при сохранении устойчивости полета.

Выбор направления вертикального уклонения — набор или снижение высоты — осуществляется на основании анализа взаимного положения БПЛА и нарушителя, их прогнозируемых траекторий и оценки времени до максимального сближения  $t_{сра}$ . Предпочтение отдаётся тому варианту манёвра, который позволяет быстрее восстановить безопасное разделение (well clear). При этом учитывается текущая высота полёта, допустимые эшелоны, а также возможные ограничения воздушного пространства.

Один из блоков общей структуры алгоритмов ПНК для БПЛА является блок алгоритма комплексной обработки информации (КОИ). КОИ повышает точность работы основной системы - БИНС, в нашем случае. После первичной обработки информации в КНС, формируется вектор измерений комплекса.

В рамках работы проводится имитационное моделирование функционирования системы предотвращения столкновений беспилотного летательного аппарата среднего класса в условиях возможного конфликта с «нарушителем». Моделирование направлено на подтверждение корректности работы алгоритма прогнозирования движения, обнаружения конфликта на основе критериев безопасного разделения (well clear) и разрешения конфликта вертикальным манёвром. Дополнительно исследуется влияние ошибок комплексной навигационной системы (БИНС+СНС) на своевременность обнаружения угрозы.

Блок-схема алгоритма имитационного моделирования представлена на рисунке 4.

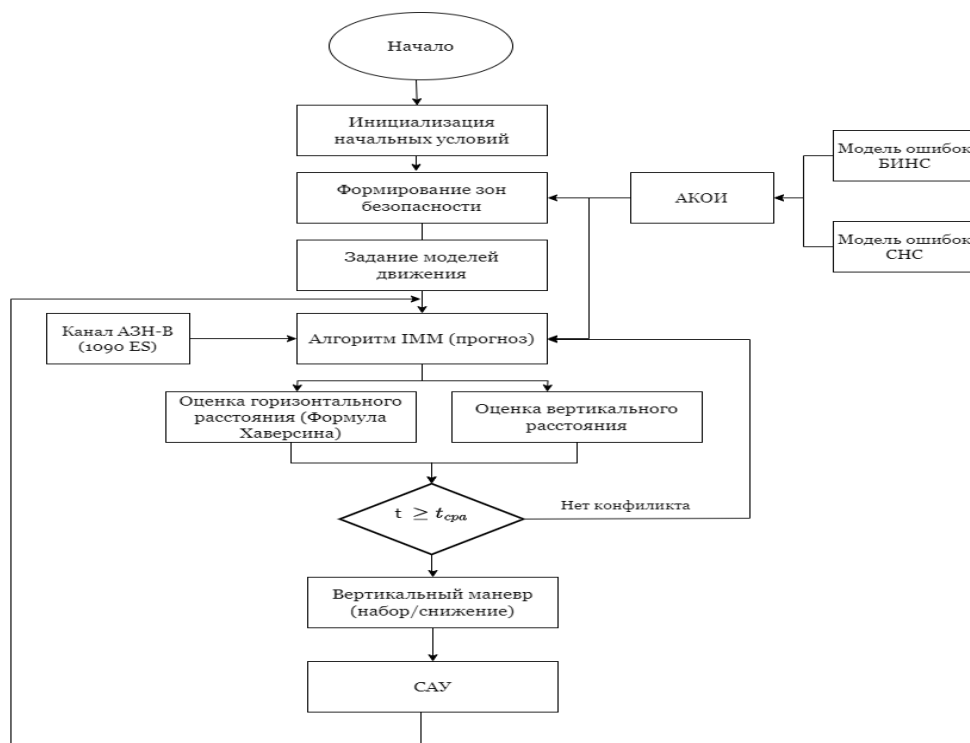


Рисунок 4 – Блок-схема имитационного моделирования

Графическая реализация оценки точности комплексной навигационной системы представлена на рисунках 5 и 6 в виде зависимостей ошибок оценок и

предсказанных стандартных отклонений (2 СКО) по координатам и компонентам скорости.

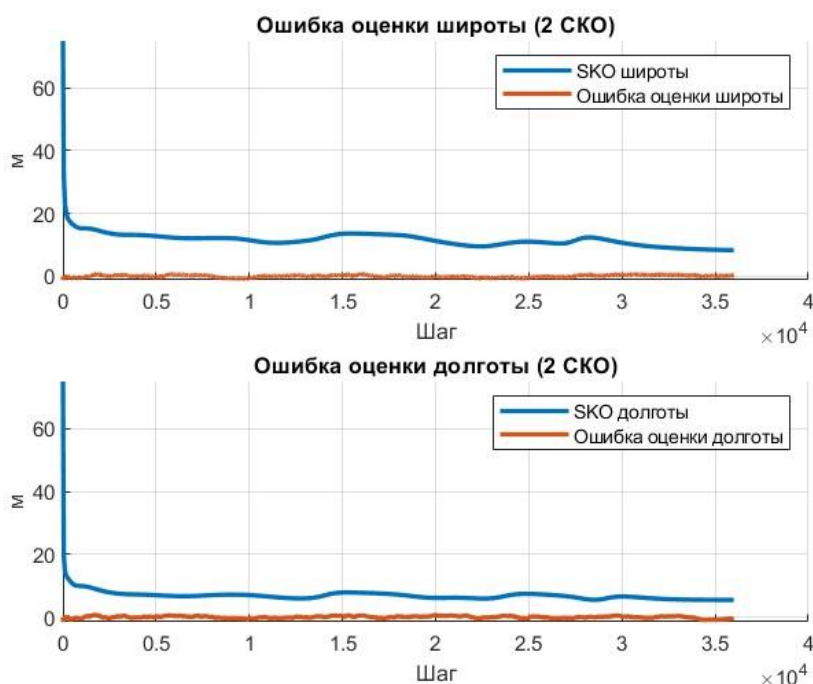


Рисунок 5 - СКО ошибки (синяя кривая) и ошибка оценки определения местоположения (оранжевая кривая)

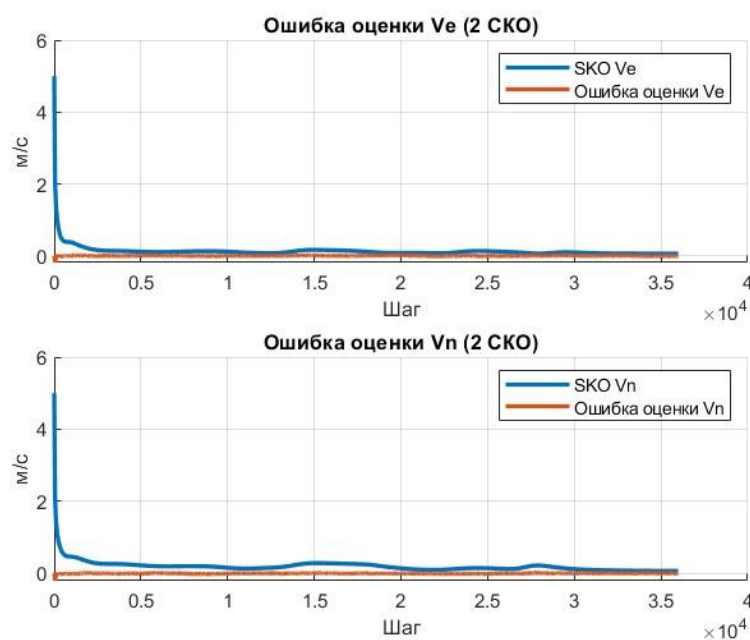


Рисунок 6 - СКО ошибки (синяя кривая) и ошибка оценки определения компонентов скорости (оранжевая кривая)

Это означает, что реализованная модель комплексной навигационной системы обеспечивает требуемую точность в соответствии с предъявляемыми к ПНК требованиями: погрешность определения координат — не более 20–30 м, путевой скорости — в пределах 0.5–1 м/с (по 2 СКО).

В результате выполнения моделирования получена пространственная траектория движения обоих БПЛА. Как видно на рисунке 7, собственный аппарат своевременно осуществляет вертикальный манёвр, обеспечивая восстановление безопасного разделения по вертикали и предотвращая вход в критическую зону NMAC.

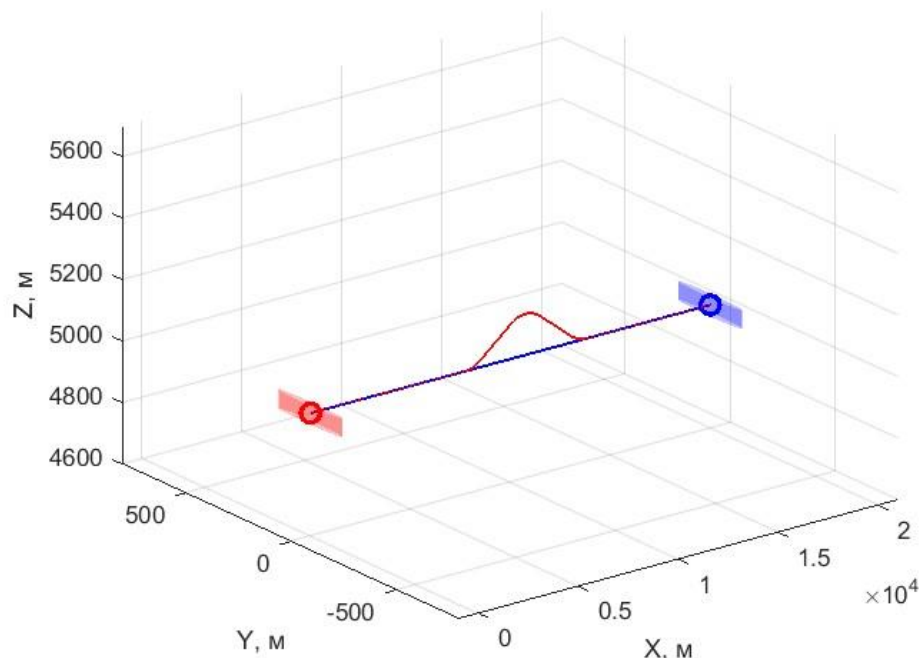


Рисунок 7 - Трёхмерное представление движения собственного БПЛА с вертикальным манёвром уклонения (красная кривая) и “нарушителя”

#### Заключение

В рамках работы предложена структура и алгоритм системы предотвращения столкновений для беспилотного летательного аппарата среднего класса. Обзор современных решений показал отсутствие универсальных стандартов, применимых ко всем классам БПЛА и условиям полёта, что подчёркивает актуальность разработки адаптированных к конкретным сценариям архитектур СПС.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. MarketsandMarkets. UAV Market Research Report [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/unmanned-aerial-vehicles-uav-market-662.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/unmanned-aerial-vehicles-uav-market-662.html?utm_source=chatgpt.com) (дата обращения: 13.03.2025).

2. 12-я Национальная выставка и форум инфраструктуры гражданской авиации NAIS: материалы выставки (5–6 февраля 2025 года, Москва, МВЦ «Крокус Экспо»). – М., 2025.

3. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Под ред. Б.С. Алёшина, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморского. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 424 с. – ISBN 5-9221-0735-6.

4. FAA regulations. Traffic collision avoidance system (TCAS) protected volume calculation – Aviation Stack Exchange [Электронный ресурс]. – URL: <https://aviation.stackexchange.com> (дата обращения: 15.04.2025).

5. Lai K., Lone M., Thomas P., Whidborne J.F., Cooke A.K. On-board trajectory generation for collision avoidance in unmanned aerial vehicles // In Proc. IEEE Aerospace Conference. – 2011.

6. Manfredi G., Jestin Y. An Introduction to ACAS Xu and the Challenges Ahead // IEEE DASC. – 2016.