

На правах рукописи

ЧЭНЬ ХАО

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С  
ДИСКРЕТНЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО  
НАЗЕМНОГО АППАРАТА**

Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка  
информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2026

*Чэнь Хао*

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана).

Научный руководитель: **Селезнева Мария Сергеевна**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологий приборостроения МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Официальные оппоненты: **Корсун Олег Николаевич** — доктор технических наук, руководитель научно-образовательного центра федерального автономного учреждения «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ФАУ «ГосНИИАС»).  
**Андриков Дмитрий Анатольевич** — кандидат технических наук, доцент федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы».

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина».**

Защита состоится «8» декабря 2026 г. в 16 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.331.14 при МГТУ им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Госпитальный пер., 10, ауд. 613м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования МГТУ им. Н. Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1 на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Учёный секретарь  
диссертационного  
совета к.т.н., доцент

Глазков Виталий Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** С развитием автономных беспилотных систем и многоплатформенной робототехники кооперативная навигация получила широкое применение в промышленной автоматизации, интеллектуальном транспорте и роботизированной логистике, в особенности в задачах автономного перемещения беспилотных наземных аппаратов (БНА) в сложных внутренних средах. Эффективность функционирования таких систем во многом определяется способностью получать высокоточную и устойчивую навигационную информацию. В практических приложениях навигационная информация, как правило, формируется посредством обмена данными между несколькими узлами.

Однако в реальных инженерных условиях системы кооперативной навигации неизбежно функционируют при существенных ограничениях связи. Беспроводные каналы передачи данных часто характеризуются ограниченной пропускной способностью, потерями данных и наличием дискретного запаздывания. Указанное дискретное запаздывание может возникать на входе, на выходе и при комплексировании. В совокупности эти факторы нарушают классические условия наблюдаемости традиционных динамических систем, что приводит к существенному снижению точности и устойчивости оценивания состояния.

Существующие методы навигационной фильтрации и комплексирования в основном ориентированы на моделирование и компенсацию локальных характеристик погрешностей измерений, как правило, предполагая идеальные условия связи или пренебрежимо малое дискретное запаздывание. При этом структурные свойства систем и вопросы наблюдаемости в условиях дискретного запаздывания, характерных для внутренней среды эксплуатации БНА, остаются недостаточно исследованными. Непосредственное применение традиционных алгоритмов в сложных коммуникационных средах нередко приводит к увеличению ошибок оценивания, замедлению сходимости и в ряде случаев — к расходимости фильтрации.

**Степень разработанности темы.** Большой вклад в развитие теории систем с дискретным запаздыванием внесли В. Б. Колмановский, Sinopoli B., Nilsson J., Xing Z., Sun S. и др. Проблемами наблюдаемости и структурного анализа сложных систем успешно занимались Р. Э. Калман, Liu Y.-Y., М.С. Селезнёва, Шень Кай, Чжан Лифей и др. Разработке алгоритмов повышения точности навигационных систем посвящены работы Н. Т. Кузовкова, О. А. Степанова, О. С. Салычева, К.А. Неусыпина и др.

**Целью диссертационной работы** является разработка методов и алгоритмов повышения точности совместной навигации БНА в условиях дискретной задержки и неопределённости информации.

Для достижения этой цели в работе были поставлены и решены

**следующие задачи:**

1. Разработать математическую модель системы совместной навигации БНА с дискретным запаздыванием на входе и на выходе.
2. Разработать критерий степени наблюдаемости состояния систем с дискретным запаздыванием.
3. Разработать метод повышения точности навигационной информации, учитывающий выбор конфигурации сети передачи данных между БНА.
4. Разработать алгоритм оценивания состояния для систем с дискретным запаздыванием на входе, применимый в условиях задержек управляющих сигналов БНА.
5. Разработать алгоритм оценивания для систем с дискретным запаздыванием на выходе, ориентированный на обработку измерительных сигналов в сложной внутренней среде.
6. Разработать метод комплексирования с улучшенными характеристиками для навигационного комплекса с дискретным запаздыванием.

**Научная новизна работы** заключается в том, что:

1. Разработан оригинальный численный критерий степени наблюдаемости переменных состояния систем с дискретным запаздыванием с использованием фактора забывания, который, в отличие от существующих аналогов, позволяет более корректно отражать качество оценивания состояния в системах с дискретным запаздыванием.
2. Разработан метод повышения точности навигационной информации, учитывающий выбор конфигурации сети передачи данных между БНА на основе графового метода.
3. Разработан модифицированный фильтр Калмана для систем со случайным и фиксированным дискретным запаздыванием, применимый в условиях задержек управляющих сигналов БНА при движении в сложной внутренней среде.
4. Разработан модифицированный скалярный фильтр Калмана с механизмом буферизации для систем с дискретным запаздыванием на выходе, который по сравнению с прототипом обеспечивает более высокую точность оценивания за счёт эффективного использования измерений в буфере.
5. Разработана модификация федеративного фильтра Калмана для систем с дискретным запаздыванием, которая по сравнению с прототипом обеспечивает адаптивную корректировку весовых коэффициентов локальных фильтров на основе критерия степени наблюдаемости системы с запаздыванием в условиях задержек и потери измерительных сигналов.

**Достоверность и обоснованность** полученных теоретических и практических результатов диссертационной работы обеспечиваются строгими математическими выводами, выполненными при разработке

алгоритмов оценивания и соответствующих критериев, результатами численного моделирования и моделирования на основе данных лабораторных экспериментов, а также согласованностью полученных результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными.

#### **Теоретическая значимость диссертации:**

Развиты методы повышения точности совместной навигации беспилотных наземных аппаратов при дискретных задержках и неопределённости информации. Предложен численный критерий степени наблюдаемости с фактором забывания для оценки сходимости и точности оценивания состояния. Развита методика повышения точности навигации на основе предложенного метода выбора конфигурации сети передачи данных с использованием графового подхода. Разработаны модифицированные алгоритмы для систем со случайным или фиксированным запаздыванием на входе и дискретным запаздыванием на выходе. Предложены принципы построения модифицированного федеративного фильтра Калмана с адаптивной корректировкой весов по критерию степени наблюдаемости и обнаружением аномальных измерений.

#### **Практическая значимость диссертации:**

Разработанные в диссертационной работе модели и алгоритмы предназначены для повышения эффективности систем совместной навигации БНА в условиях внутренней среды и коммуникационных ограничений. Предложенные методы оценивания для систем с дискретным запаздыванием на входе и выходе позволяют повысить точность оценивания состояния при ограниченной пропускной способности каналов связи. Разработанные численные критерии степени наблюдаемости обеспечивают количественную оценку информационной обеспеченности системы и повышают эффективность алгоритмов фильтрации и комплексирования. Предложенные методы позволяют оценивать качество информации и выбирать конфигурацию сети передачи данных между БНА.

Результаты работы использованы в ООО «Fujian Qichen Information Technology» (КНР) и в учебном процессе кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н. Э. Баумана.

**Методология и методы исследования.** При решении сформулированных задач использовались методы теории навигационных систем, теории оценивания состояния и фильтр Калмана, теории наблюдаемости, графового подхода, системного анализа, математического моделирования, численного моделирования и обработки экспериментальных данных, а также программные пакеты MATLAB.

#### **На защиту выносятся следующие положения диссертации:**

1. Численный критерий степени наблюдаемости состояния систем совместной навигации с дискретным запаздыванием, обеспечивающий количественную оценку информационной обеспеченности системы в условиях коммуникационных ограничений.

2. Метод повышения точности навигационной информации, учитывающий выбор конфигурации сети передачи данных между БНА на основе графового метода.

3. Алгоритм оценивания состояния для системы с дискретным запаздыванием на входе для систем навигации БНА.

4. Модифицированный скалярный фильтр Калмана с механизмом буферизации для системы с дискретным запаздыванием на выходе, обеспечивающий повышение точности оценивания.

5. Функциональная схема комплексирования и усовершенствованная модификация федеративного фильтра Калмана с использованием критериев степени наблюдаемости и механизмов обнаружения аномалий.

**Личный вклад автора** состоит в разработке математических моделей систем совместной навигации с дискретным запаздыванием на входе и выходе, а также в анализе их наблюдаемости в условиях коммуникационных ограничений. Предложен оригинальный численный критерий степени наблюдаемости с использованием фактора забывания и разработаны алгоритмы оценки состояния для систем с дискретным запаздыванием, применимые в задачах внутренней навигации БНА. Кроме того, разработаны модифицированный скалярный фильтр Калмана с использованием буфера, метод определения минимально необходимого объёма буфера и метод кооперативного комплексирования с механизмом обнаружения измерительных аномалий.

На основании теоретических и экспериментальных исследований предложенные алгоритмы доказывают их применимость на практике.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ряде конференций: 31st Saint Petersburg International Conference On Integrated Navigation Systems (Санкт-Петербург, 2024г); Будущее машиностроения России: XVII Всероссийская конференция молодых учёных и специалистов (Москва, 2024г); Русский инженер. 2024 (Москва, 2024г); Международная научно-техническая конференция "Автоматизация" (Сочи, 2025г); 10th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (Пекин, 2025г); XVIII Международной научно-практической конференции «Роль науки в развитии общества (перспективные технологии, науки о жизни)» (п. Листвянка (озеро Байкал), 2025г); Будущее машиностроения России 2025 (Москва, 2025г).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 14 научных работ, в том числе 6 работ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 2 работы в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, общим объёмом 10,79 п.л./ 5,55 п.л.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, общих выводов и заключения, списка используемой литературы. Текст диссертации изложен на 135 машинописных страницах, содержит 43 рисунка. Список литературы содержит 137 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассматриваются предпосылки и актуальность исследования систем кооперативной навигации, анализируется влияние дискретных временных запаздываний и неопределённости информации, формулируются цель и задачи работы, выделяется научная новизна, а также обосновываются достоверность и практическая значимость полученных результатов и структура диссертации.

В главе 1 представлен систематический обзор современных автономных беспилотных платформ. Основное внимание уделено анализу принципов функционирования и характеристик погрешностей инерциальных навигационных систем (ИНС) и систем сверхширокополосного позиционирования (СШП). Рассматриваются базовые принципы и методы информационного взаимодействия в системах совместной навигации, а также анализируется влияние задержек связи и потерь данных на производительность навигационных систем в контексте практических инженерных приложений, что формирует теоретическую основу для последующих исследований.

В главе 2, исходя из свойств динамических систем, проводится анализ наблюдаемости систем совместной навигации в условиях коммуникационных ограничений.

Рассмотрим систему с дискретным запаздыванием на выходе:

$$x_{k+1} = A_k x_k + w_k, z_{k,t} = \gamma_{k,t} (C_t x_t + v_t), \gamma_{k,t} = \begin{cases} 1, & \text{сигнал приходит до/в момент,} \\ 0, & \text{другой.} \end{cases} \quad (1)$$

Предложен рекурсивный механизм вычисления с фактором забывания, обеспечивающий непрерывную динамическую оценку индекса наблюдаемости (ИН, observability index, OI) и степень наблюдаемости (degree of observability, DoO) при прерывании последовательности измерений.

Для систем с дискретным запаздыванием на выходе  $LOI_{\diamond k}$  определяется с учётом вероятности поступления измерений и вычисляется для каждой переменной состояния  $i$  по выражению

$$OI_{\diamond k}^i = \frac{P_{x,k}^i R^i}{P_{y,k}^i R_{\diamond}^{*i}}. \quad (2)$$

Если в момент времени измерение недоступно ( $P_{y,k}^i R_{\diamond}^{*i} \rightarrow \infty$ ), то система считается ненаблюдаемой, и  $OI_{\diamond k}^i = 0$ .

$$R_{\diamond 1}^{*i} = [\alpha_{i1} \quad \cdots \quad \alpha_{il_1}] R_{\diamond} [\alpha_{i1} \quad \cdots \quad \alpha_{il_1}]^T, \quad (3)$$

где  $R_0 = \begin{bmatrix} \gamma_1 R & 0_{m \times m} & \cdots & 0_{m \times m} \\ 0_{m \times m} & \gamma_2 (CQC^T + R) & \cdots & \gamma_{2,L} CQ(CA^{L-2})^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0_{m \times m} & \gamma_{L,2} CA^{L-2} QC^T & \cdots & \gamma_L \left( \sum_{i=0}^{L-2} CA^i Q(CA^i)^T + R \right) \end{bmatrix}$ , а вероятность

передачи определяется как  $\Pr[\gamma_i = 1] = \theta_i$ ,  $\Pr[\gamma_{i,j} = 1] = \Pr[\gamma_{j,i} = 1] = \theta_i \theta_j$ .

В условиях разрывных измерений классическая формула скользящего усреднения становится неприменимой, в связи с чем для систем со случайным дискретным запаздыванием используется рекурсивная форма вычисления степени наблюдаемости:

$$DoO_k^i = (1 - dt) DoO_{k-1}^i + dt OI_{\phi_k}^i, dt = \frac{1-b}{1-b^{k+1}}, (0.95 < b < 0.99). \quad (4)$$

На основе теории графов проводится анализ свойств системы, что позволяет определить конфигурации сети передачи данных.

Для модели на рисунке 1 матричное представление строится по формуле (5).

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1} & a_{N2} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix}, \begin{cases} B = S \text{diag}\{b_1, \dots, b_N\} \\ S = [e_{i_1} \cdots e_{i_m}]^T \\ \mathcal{I} = \{i \in \{1, \dots, n\} : b_i \neq 0\} = \{i_1, i_2, \dots, i_m\} \\ m = |\mathcal{I}| \end{cases}. \quad (5)$$

где  $a_{ij}$  обозначает наличие направленной связи от узла  $j$  к узлу  $i$ ; матрица  $B$  указывает узлы, получающие управляющие или наблюдательные сигналы; а символы  $i_k$  обозначают номера таких узлов.

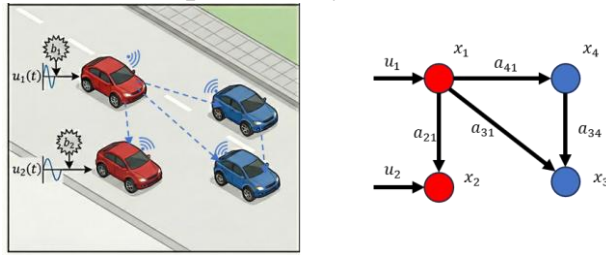


Рисунок 1 – Граф передачи информации

Предложен коэффициент  $\rho_{ij}$ , характеризующий качество передачи сигнала по направленному пути в следующем виде:

$$\rho_{ij} = \frac{P_{\text{signal}}^0}{P^{ij}} \quad (6)$$

причём чем больше  $\rho_{ij}$ , тем меньше доля шума и тем выше качество полученной информации.

Предложен численный показатель качества информации (Node information quality, NIQ):

$$NIQ_i = \sum_{j=1}^R \Omega_j v_j(x), \quad (7)$$

где  $\Omega_j = (\sum_{i=1}^N \alpha_{ji} \rho_{ji}^{-1})^{-1}$  - интегральный показатель приёма по  $j$ -му маршруту, а выражение для единичного маршрута принимает вид:

$$v_j(x) = k_j \prod_{i=1}^N e_i^{\alpha_{ji}}, \quad (8)$$

где коэффициент  $k_j = \alpha_{ji} \rho_{ji}^{-1}$  характеризует достоверность передачи по направленному маршруту;  $\alpha$  принимает значения  $\{0,1\}$ , обозначая наличие или отсутствие данного маршрута.

С учётом дискретного запаздывания структурная матрица сети определяется как

$$A^* = A \circ F \quad (9)$$

где  $A^*$  - структурная матрица сети с дискретным запаздыванием,  $A \circ F$  - произведение Адамара матрицы  $A$  и матрицы вероятностей запаздываний  $F = \{\mathcal{F}_{ij}\}$ ,  $\mathcal{F}_{ij}$  соответствует вероятности реализации канала  $j \rightarrow i$  на текущем шаге (выбирается из множества распределения запаздываний  $\{\alpha_{ij}^0, \dots, \alpha_{ij}^{\tau}\}$ ).

Исходя из вышесказанного, минимально необходимое число узлов управления в разреженной системе с запаздываниями определяется как:

$$N_D(k) = N - \mathbb{E}(\text{rank}(A^*(k))). \quad (10)$$

Одновременно выражение (7), учитывающее влияние разреженного дискретного запаздывания на структуру сети, может быть записано в виде:

$$\text{NIQ}_i(k) = \sum_{j=1}^R \Omega_j k_j \prod_{l=1}^N e_l \left( k - d_j \right)^{\alpha_{jl}} \quad (11)$$

где  $d_j$  - число шагов дискретного запаздывания на  $j$ -м маршруте.

**В главе 3**, опираясь на результаты главы 2, рассматриваются модели и алгоритмы оценки состояния навигационной системы с дискретным запаздыванием на входе и выходе.

Для систем с фиксированным дискретным запаздыванием на входе, не содержащих временных меток, используется модель:

$$x(t+1) = \Phi x(t) + Bu(t-d), z(t) = Hx(t). \quad (12)$$

Аналогично, для случайного дискретного запаздывания применяется модель (13):

$$x(t+1) = \Phi x(t) + Bu(t), z(t) = Hx(t). \quad (13)$$

С учётом шума процесса и измерений система приводится к эквивалентной форме:

$$x^*(t+1) = \Phi^* x^*(t) + u^*(t) + \omega^*(t), z^*(t) = H^* x^*(t) + v(t). \quad (14)$$

где  $x^*(t)$  - новый эквивалентный вектор состояния,  $z^*(t)$  - вектор эквивалентного выхода,  $u^*(t)$  - вектор эквивалентного входа,  $\omega(t), v(t)$  - белый гауссовский шум процесса и измерения,

$$\begin{aligned} x^*(t) &= \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix}, \quad \Phi^* = \begin{bmatrix} \Phi & BH_1 \\ 0 & \Phi_1 \end{bmatrix}, \quad u^*(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ B_1 \end{bmatrix} u(t), \\ \omega^*(t) &= \begin{bmatrix} \Gamma \\ 0 \end{bmatrix} \omega(t), \quad H^* = [H \quad 0], \end{aligned} \quad (15)$$

$$E(\omega(t)\omega(t)^T) = Q, E(v(t)v(t)^T) = R, E(v(j)w(k)^T) = 0 (j, k \in \mathbb{N}).$$

Предложен рекурсивный алгоритм оценки:

$$\begin{cases} x(t+1) = \Phi x(t) + BH_1 y(t) + K(t)(z(t+1) - H\Phi x(t) - HBH_1 y(t)) \\ y(t+1) = \Phi_1 y(t) + B_1 u(t) + U(t)(z(t+1) - H\Phi x(t) - HBH_1 y(t)) \end{cases} \quad (16)$$

Весовые коэффициенты фильтра определяются выражениями (17)

$$\begin{bmatrix} K(t-1) \\ U(t-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P^1(t) & P^2(t) \\ P^3(t) & P^4(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H^T \\ 0 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} H^T \\ 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} P^1(t) & P^2(t) \\ P^3(t) & P^4(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H^T \\ 0 \end{bmatrix} + R \right\}^{-1}, \quad (17)$$

$$K(t-1) = \bar{P}^1(t)H^T[H\bar{P}^1(t)H^T + R]^{-1}, \quad U(t-1) = \bar{P}^3(t)H^T[H\bar{P}^1(t)H^T + R]^{-1}.$$

И ковариационные соотношения — формулами (18).

$$\begin{cases} \bar{P}^1(t+1) = \Phi P^1(t)\Phi^T + BH_1 P^3(t)\Phi^T \\ + \Phi P^2(t)H_1^T B^T + BH_1 P^4(t)H_1^T B^T + \Gamma Q \Gamma^T \\ \bar{P}^2(t+1) = \Phi P^2(t)\Phi_1^T + BH_1 P^4(t)\Phi_1^T \\ \bar{P}^3(t+1) = \Phi_1 P^3(t)\Phi^T + \Phi_1 P^4(t)H_1^T B^T \\ \bar{P}^4(t+1) = \Phi_1 P^4(t)\Phi_1^T \end{cases}, \quad \begin{cases} P^1(t) = (I - K(t-1)H)\bar{P}^1(t) \\ P^2(t) = P^3(t) = (I - K(t-1)H)\bar{P}^2(t) \\ P^4(t) = \bar{P}^4(t) - U(t-1)H\bar{P}^2(t) \end{cases} \quad (18)$$

Для систем со случайным дискретным запаздыванием на входе строится стохастическая модель обновления входных данных:

$$\begin{aligned} Y_k(t) &= \theta_k(t)u(t) + (1 - \theta_k(t))Y_{k+1}(t-1), k = 1, 2, \dots, d-1 \\ Y_d(t) &= \theta_d(t)u(t), k = d \end{aligned} \quad (19)$$

где  $\theta_k(t)$  определяется случайными величинами  $\zeta_k$ , распределёнными по закону Бернулли:

$$\theta_k(t) = \left[ \prod_{j=0}^{k-1} (1 - \zeta_j(t+j)) \right] \zeta_k(t+k), k = 1, 2, \dots, d, \theta_0(t) = \zeta_0(t). \quad (20)$$

И позволяет переписать систему в единой эквивалентной форме (21)-(23):

$$y^*(t+1) = \Phi_1 y^*(t) + B_1 u(t), u(t) = H_1 y^*(t) + \theta_0(t)u(t), \quad (21)$$

где  $y^*(t) = [Y_1^T(t) \ Y_2^T(t) \ \dots \ Y_d^T(t)]$  - вектор состояния, включая входные сигналы и матрицы системы  $\Phi_1, B_1, H_1$ :

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} 0_{(d-1)m \times m} & \Phi^* \\ 0_{m \times m} & 0_{m \times (d-1)m} \end{bmatrix}, \quad \Phi^* = \text{diag}\{(1 - \theta_i(t))I_m\}, i = 1, \dots, d-1, \quad (22)$$

$$B_1^T = [\theta_1(t)I_m \quad \theta_2(t)I_m \quad \theta_3(t)I_m \quad \dots \quad \theta_d(t)I_m], H_1 = [(1 - \theta_0(t))I_m \quad 0 \quad \dots \quad 0],$$

и  $E[\Phi_1], E[B_1^T], E[H_1]$  приведены в (22), где  $\theta_k(t), k=1,2,\dots,d$ , заменяются их ожиданиями:

$$\begin{aligned}\bar{\theta}_0 &= E[\theta_0(t)] = \alpha_0, \bar{\theta}_k = E[\theta_k(t)] = \prod_{i=0}^{k-1} (1 - \alpha_i) \alpha_k, k=1,2,\dots,d, \\ E\left[(\theta_k(t) - \bar{\theta}_k)^2\right] &= \bar{\theta}_k(1 - \bar{\theta}_k), E[\theta_k(t)\theta_l(t)] = 0, k \neq l, \\ E[\theta_k(t)\theta_l(j)] &= \bar{\theta}_k \bar{\theta}_l, t \neq j, k, l = 0,1,\dots,d.\end{aligned}\quad (23)$$

Уравнение системы со случайным дискретным запаздыванием можно переписать как:

$$x^*(t+1) = \Phi^* x^*(t) + u^*(t) + \omega(t), z^*(t) = H^* x^*(t) + v(t). \quad (24)$$

Аналогично алгоритму оценки состояния системы с фиксированным запаздыванием, коэффициент усиления фильтра определяется следующим образом:

$$\begin{aligned}K(t-1) &= \bar{P}^1(t) H^T [H \bar{P}^1(t) H^T + R]^{-1}, U(t-1) = \bar{P}^3(t) H^T [H \bar{P}^1(t) H^T + R]^{-1}, \quad (25) \\ \begin{cases} \bar{P}^1(t+1) = \Phi P^1(t) \Phi^T + B H_1 P^3(t) \Phi^T \\ + \Phi P^2(t) H_1^T B^T + B H_1 P^4(t) H_1^T B^T + \Gamma Q \Gamma^T \\ \bar{P}^2(t+1) = \Phi P^2(t) \Phi_1^T + B H_1 P^4(t) \Phi_1^T \\ P^3(t+1) = \Phi_1 P^3(t) \Phi^T + \Phi_1 P^4(t) H_1^T B^T \\ \bar{P}^4(t+1) = \Phi_1 P^4(t) \Phi_1^T \end{cases} &, \begin{cases} P^1(t) = (I - K(t-1)H) \bar{P}^1(t) \\ P^2(t) = P^3(t) = (I - K(t-1)H) \bar{P}^2(t) \\ P^4(t) = \bar{P}^4(t) - U(t-1) H \bar{P}^2(t) \end{cases}. \quad (26)\end{aligned}$$

В случаях, когда выходные сигналы характеризуются дискретными временными задержками и измерительная информация содержит временные метки, исследуется механизм оценивания с использованием буфера для хранения задержанных измерений. Для повышения эффективности использования буферизованных данных предлагается модифицированный скалярный фильтр Калмана (МСФК).

Рассматривается линейная дискретная система вида (1). Предполагается, что каждое измерение  $z_k$  поступает с запаздыванием  $d_k$ , подчиняющимся вероятностному распределению. С учётом индикаторной переменной  $\gamma_{t,k}$ :

$$z_k^i = \gamma_{k,t}^i (C_k^i x_k + v_k^i). \quad (27)$$

Для их обработки система приводится к эквивалентному расширенному пространству состояний

$$x_{kl+1}^i = a_{ii} x_{(k-1)l+1}^i + s_{\diamond k}^i + w_{\diamond k}^{*i} y_{\diamond k+1}^i = x_{kl+1}^i + \zeta_{\diamond k+1}^i, \quad (28)$$

где  $w_{\diamond k}^{*i}$  - эквивалентный шум процесса,  $\zeta_{\diamond k}^i$  - эквивалентный шум измерения.

При допущении  $K_0^i = 0, p_{1,0}^i = M[(x_0^i)^2]$ , оценивание компонента фильтром Калмана:

$$\begin{cases} \hat{x}_{kl+1}^i = a_{ii} \hat{x}_{(k-1)l+1}^i + s_{\diamond k}^i + K_k^i (y_{\diamond k+1}^i - a_{ii} \hat{x}_{(k-1)l+1}^i - s_{\diamond k}^i), K_{\diamond k}^i = \frac{p_{k,k-1}^i}{p_{k,k-1}^i + r_{\diamond k}^i} \\ p_{k,k-1}^i = a_{ii}^2 (p_{k-1,k-2}^i - K_{k-1}^i p_{k-1,k-2}^i) + q_{\diamond k}^i, p_k^i = (1 - K_{\diamond k}^i) p_{k,k-1}^i \end{cases} \quad (29)$$

где  $K_k^i$  - коэффициент усиления Калмана,  $s_{\diamond k}^i$  - линейная комбинация измерений за период  $k$ ,  $q_{\diamond k}^i = E\{w_{\diamond k}^{*i} w_{\diamond k}^{*iT}\}$ ,  $r_{\diamond k}^i = E\{\zeta_{\diamond k}^i \zeta_{\diamond k}^{iT}\}$ .

Таким образом, модифицированный скалярный фильтр Калмана обеспечивает эффективное использование задержанных измерений при ограниченном объёме буфера.

Согласно теории информации Фишера, качество оценивания состояния может быть охарактеризовано через информационную матрицу, при этом дисперсия оценивания ограничивается снизу следующим образом:

$$P(x_k) = E\{(\hat{x}_k - x_k)(\hat{x}_k - x_k)^T\} \geq J(x_k)^{-1} \quad (30)$$

где  $J(x_k)$  - информационная матрица Фишера в момент  $k$ . Для предлагаемого алгоритма обновление  $J(x_k)$  может быть реализовано несколькими эквивалентными способами (варианты 1–3, приведённые на рисунке 2), приведёнными в выражении:

$$J_{k+1} = \begin{cases} A_k^{-1} J_k A_k^{-T} + C^T R^{-1} C & \text{вариант 1} \\ A_k^{-1} J_k A_k^{-T} & \text{вариант 2.} \\ (A^l)^{-1} J_{k+1-l} (A^l)^{-T} + S_{\diamond}^T R_{\diamond}^{*-1} S_{\diamond} & \text{вариант 3} \end{cases} \quad (31)$$

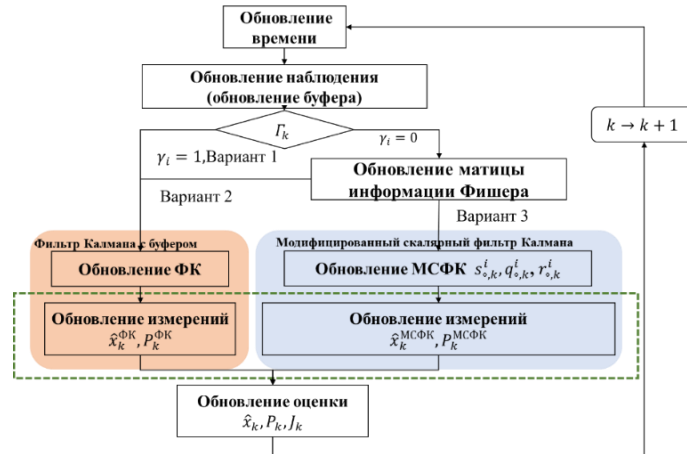


Рисунок 2 – Схема предлагаемого алгоритма

Кроме того, на основе показателя ИН, предлагается новый метод определения объёма буфера:

$$L = \operatorname{argmax}_L \{L_1, L_2\}, \quad (32)$$

$$L_1 = \{L_1 \mid \text{if } \exists L_1 \text{ s.t. } \Pr[\operatorname{rank}(S_{\diamond}) = n] \geq 1 - \epsilon\},$$

$$L_2 = \left\{L_2 \mid \text{if } \exists L_2 \text{ s.t. } \Pr\left[\sum_{i=1}^n \Omega^i(L_2, f) \geq M\right] \geq 1 - \epsilon\right\}. \quad (33)$$

Предложенный критерий позволяет выбирать объём буфера,

обеспечивающий необходимый уровень наблюдаемости и точности оценивания при минимальных вычислительных затратах.

С учётом дискретных запаздываний, характерных для многосенсорных систем, предлагается функциональная схема комплексирования на основе критерия степени наблюдаемости и федеративной фильтрации с механизмом обнаружения аномалий, повышающая устойчивость и точность оценивания. Процесс распределения информации между локальными и глобальными фильтрами описывается соотношением.

$$\mathbf{x}_{i,k-1} = \mathbf{x}_{g,k-1}, \mathbf{P}_{i,k-1}^{-1} = \beta_i \mathbf{P}_{g,k-1}^{-1}, \mathbf{Q}_{i,k-1}^{-1} = \beta_i \mathbf{Q}_{g,k-1}^{-1} \quad (34)$$

В процессе объединения информации в глобальном фильтре с учётом критерия степени наблюдаемости, отражающей точность оценивания и скорость сходимости каждого локального фильтра, поправочные коэффициенты определяются следующим образом:

$$\lambda_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^N DoO_i^j, \sigma_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N}, (0 < \sigma_i < 1, \sum_{j=1}^N \sigma_j = 1) \quad (35)$$

Модифицированный федеративный фильтр Калмана (МФФК) реализуется в соответствии со схемой и описывается выражениями:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{P}}_{g,k}^{-1} &= \sigma_1 \mathbf{P}_{1,k}^{-1} + \sigma_2 \mathbf{P}_{2,k}^{-1} + \dots + \sigma_N \mathbf{P}_{N,k}^{-1} \\ \bar{\mathbf{P}}_{g,k} \mathbf{x}_{g,k} &= \sigma_1 \mathbf{P}_{1,k}^{-1} \mathbf{x}_{1,k} + \sigma_2 \mathbf{P}_{2,k}^{-1} \mathbf{x}_{2,k} + \dots + \sigma_N \mathbf{P}_{N,k}^{-1} \mathbf{x}_{N,k} \end{aligned} \quad (36)$$

В случае обнаружения аномалий для предотвращения деградации оценивания через механизм распределения информации выполняется сброс ковариационной матрицы соответствующего локального фильтра. На рисунке 3 схема МФФК с обнаружением аномалий (МФФК-ОА).

$$P_{f,i} = \beta_{f,i}^{-1} P_g, \quad \beta_{f,i} = \frac{1}{n_N}. \quad (37)$$

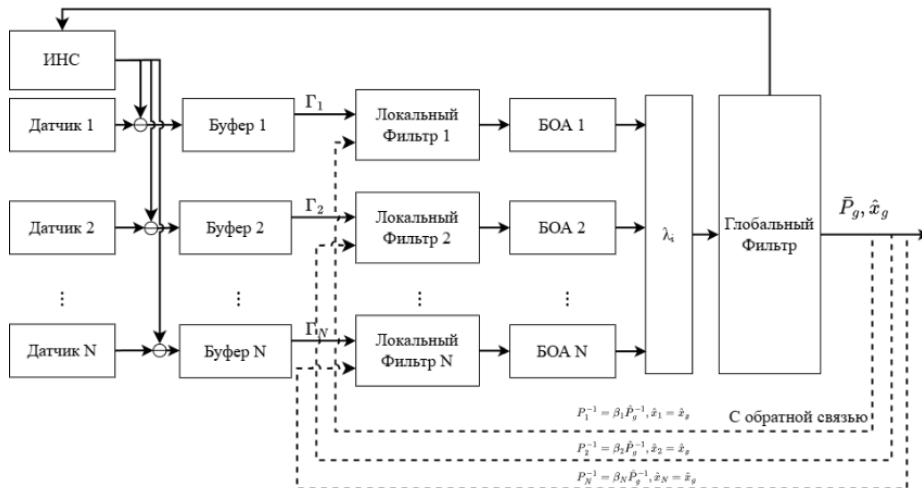


Рисунок 3 – Схема МФФК-ОА

В главе 4 представлены результаты моделирования для проверки работоспособности и эффективности предложенных алгоритмов.

1) Результаты математического моделирования алгоритмов оценивания

для систем с дискретным запаздыванием на входе.

На рисунке 4 и рисунке 5 показаны экспериментальные траектории и результаты движения БНА при наличии случайного и фиксированного дискретного запаздывания входных сигналов.

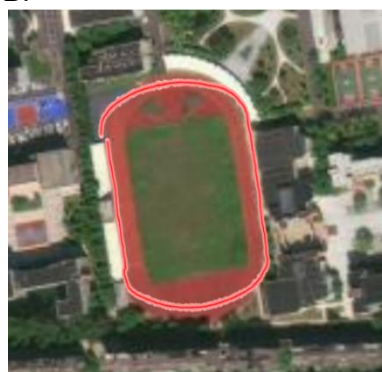
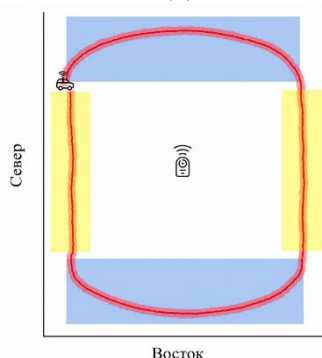


Рисунок 4 – Эталонная траектория

Рисунок 5 – Реальная траектория

На рисунке 6 и рисунке 7 представлены временные зависимости нормированных ошибок по координатам  $x$  и  $y$  соответственно. Чёрной линией обозначены нормированные ошибки измерений, красной линией — нормированные ошибки оценивания после применения алгоритма.

Полученные результаты показывают, что в условиях дискретного запаздывания на входе предложенный алгоритм обеспечивает существенное снижение амплитуды ошибок оценивания и более сглаженный характер их изменения по сравнению с исходными измерениями.

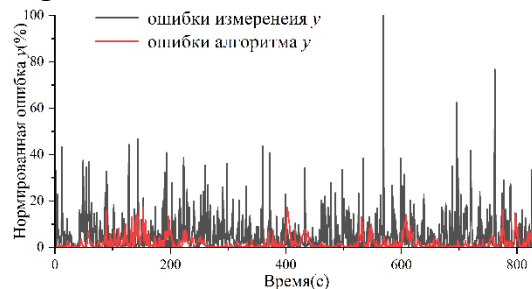
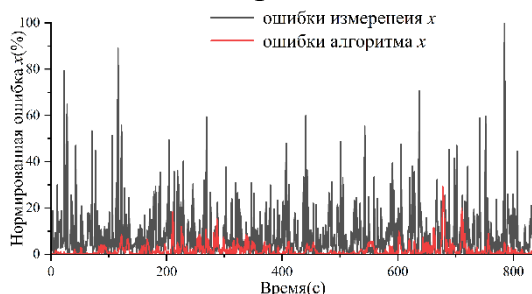


Рисунок 6 – Результат эксперимента  $x$

Рисунок 7 – Результат эксперимента  $y$

2) Результаты математического моделирования алгоритмов оценивания для систем с дискретным запаздыванием на выходе.

Экспериментальные исследования для навигационной системы с дискретным запаздыванием на выходе проведены в замкнутом помещении с использованием многосенсорной навигационной системы.

На рисунке 8 представлены временные зависимости СКО оценивания скорости в плоскости «восток–север» для различных алгоритмов; анализ экспериментальных результатов показывает, что применение алгоритма МСФК сопровождается снижением значений СКО и более стабильным характером оценивания. На рисунке 9 представлены реконструированные траектории движения БНА в двумерной плоскости; их сравнение в условиях дискретного запаздывания на выходе указывает на более близкое соответствие оценённой траектории истинной.

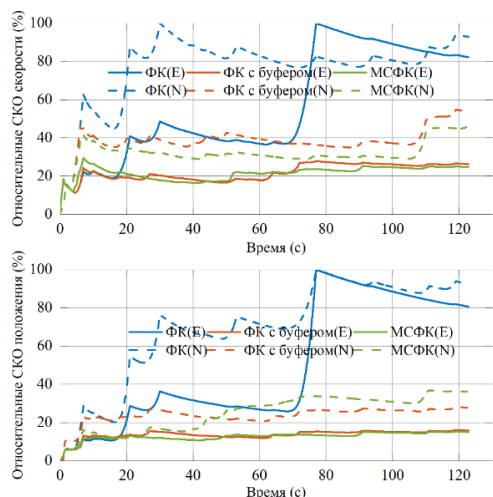


Рисунок 8 – СКО оценивания

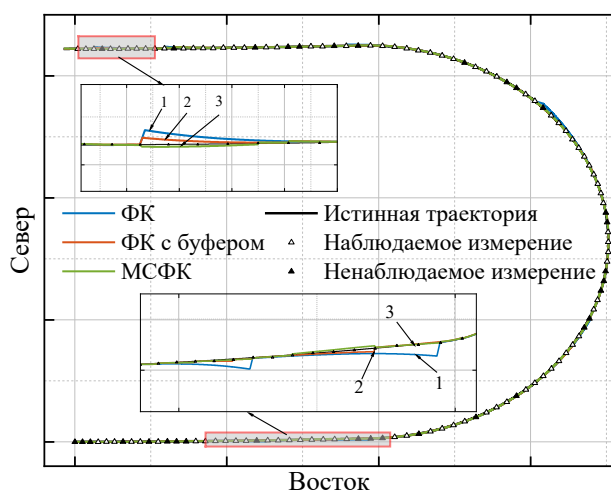


Рисунок 9 – Траектории движения

На рисунке 10 показано влияние различного объёма буфера (2, 4 и 6) на временные характеристики СКО оценивания положения и скорости. Результаты моделирования на рисунке 11 свидетельствуют о ярко выраженной нелинейной зависимости СКО от объёма буфера.

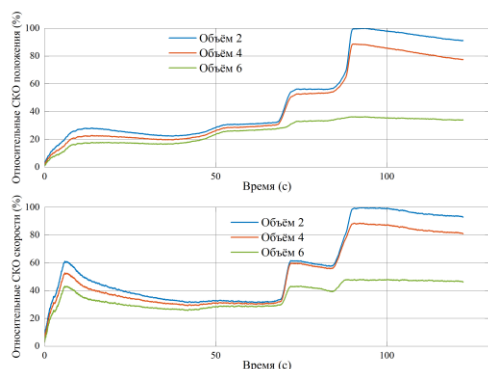


Рисунок 10 – СКО положения и скорости при различных объёмах буфера

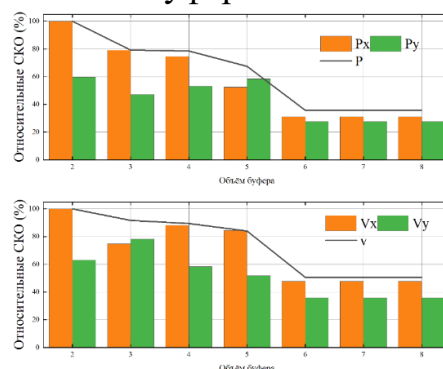


Рисунок 11 – Сравнение СКО при различных объёмах буфера

Полученные результаты подтверждают теоретические выводы третьей главы о том, что увеличение объёма буфера не всегда приводит к улучшению качества оценивания. Выбор рационального объёма буфера должен осуществляться с учётом компромисса между точностью оценивания и требованиями к реальному времени.

### 3) Анализ степени наблюдаемости систем с дискретным запаздыванием.

Результаты проверки подтвердили, что степень наблюдаемости компонент состояния существенно зависит от вероятности поступления задержанных измерений и точности измерений. При одинаковом объёме буфера изменение качества измерений приводит к изменению значений DoO, что отражает различие степени наблюдаемости соответствующих компонент состояния.

### 4) Результаты математического моделирования при различных методах комплексирования

Как видно из рисунка 12, после появления аномальных измерений значения СКО при использовании ФФК и МФФК возрастают и в течение

некоторого времени сохраняются на повышенном уровне, что указывает на влияние аномальных данных на процесс глобального оценивания; при этом сравнение траекторий движения, представленное на рисунке 13, показывает, что алгоритм МФФК-ОА позволяет получить более стабильную и близкую к истинной траектории в условиях наличия аномальных измерений.

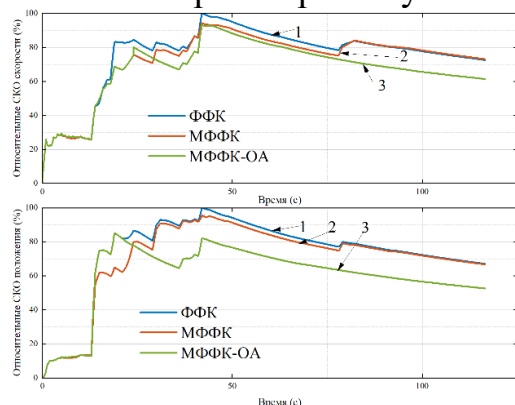


Рисунок 12 – СКО положения и скорости

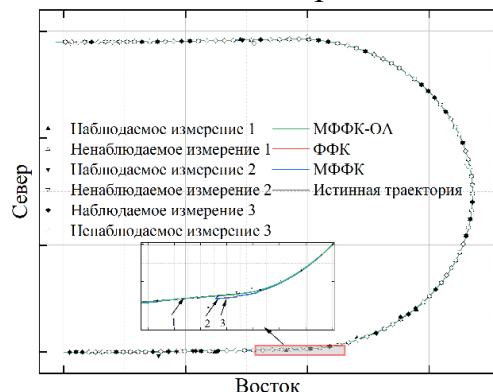


Рисунок 13 – Траектории при методах комплексирования

#### 5) Анализ показателя качества информации узлов в сложной сетевой системе

На основе сопоставления точности позиционирования при различных схемах выполнен анализ влияния каналов передачи на качество навигационных оценок, представленный в виде совмещённого анализа СКО и показателя NIQ (Рисунок 14), с помощью которого осуществляется выбор каналов передачи информации между БНА.

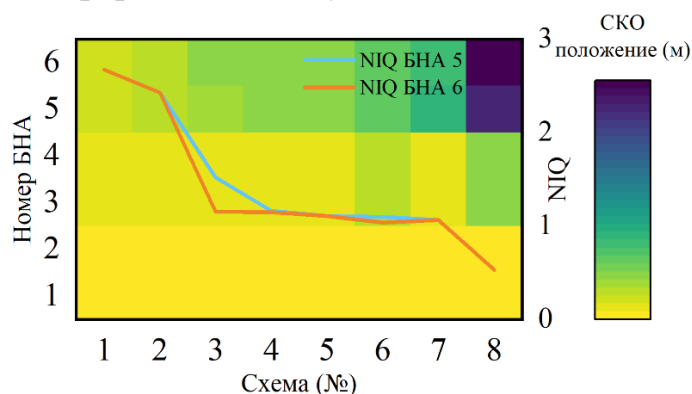


Рисунок 14 – NIQ и СКО позиционирования при различных схемах

**В заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертационной работе.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработана модель навигационной системы с дискретным запаздыванием на входе и выходе, обеспечивающая математическое описание навигационных систем беспилотных наземных аппаратов в условиях ограниченной связи за счёт учёта дискретных запаздываний.

2. Для навигационных систем с дискретным запаздыванием предложен численный критерий степени наблюдаемости состояния с

введением фактора забывания, позволяющий проводить количественный анализ результатов измерения с точки зрения времени сходимости и точности оценивания.

3. Предложен метод повышения точности навигационной информации, учитывающий выбор конфигурации сети передачи данных между беспилотными наземными аппаратами на основе графового метода.

4. Разработан модифицированный алгоритм фильтра Калмана для систем со случайным и фиксированным дискретным запаздыванием на входе, обеспечивающий снижение среднеквадратической ошибки оценивания состояния в среднем на 13% в условиях задержек и потерь управляющих сигналов при движении в сложной внутренней среде.

5. Предложен модифицированный скалярный фильтр Калмана для систем со случайным дискретным запаздыванием на выходе, обеспечивающий повышение точности позиционирования в среднем на 7–10% по сравнению с существующими методами, за счёт использования механизма буферизации.

6. Разработан модифицированный федеративный фильтр Калмана для систем с дискретным запаздыванием, включающий адаптивную корректировку весовых коэффициентов на основе критерия степени наблюдаемости и механизм обнаружения аномалий, обеспечивающий повышение точности оценивания в среднем на 10–12% по сравнению с аналогом.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. A buffer length selection method for system with random measurement delays/ H. Chen [et al.] // 2025 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. 2025. P. 94-100. (0,75 п.л./ 0,4 п.л.).

2. A Quality Evaluation Algorithm of Target Tracking Model Based on Observability/ H. Chen [et al.] // 31st Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems: Collection of plenary and poster paper (Saint-Petersburg, 27–29 may 2024). Saint-Petersburg: State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2024. P. 52-55. (0,5 п.л./0,2 п.л.).

3. Chen H., Zhong W., Selezneva M.S. UWB-INS Cooperative Navigation System for Multiple UGVs under Packet Delay and Loss // Intelligent Transportation Engineering: Proceedings of the 10th International Conference (ICITE 2025) (Beijing, China, 24-26 October 2025). SAGE Publications. 2026. P. 10–20. (0,46 п.л./ 0,25 п.л.).

4. Navigation System UWB-INS Based on Attention-LSTM / H. Chen [et al.] // Перспективы науки. 2025. No. 10(193). P. 139-143. (0,8 п.л./ 0,5 п.л.).

5. Ван Ч., Неусыпин К.А., Чэнь Х. Способы использования критерия степени наблюдаемости переменных состояния в интерактивном многомодельном алгоритме // Будущее машиностроения России: Сборник докладов XVII Всероссийской конференции молодых ученых и

специалистов (с международным участием) (Москва, 24–27 сентября 2024 г.). В 2 т. Т. 2. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. С. 131–134. (0,4 п.л./ 0,2 п.л.)

6. Хэ Б., Неусыпин К.А., Чэнь Х. Исследование по моделированию и управлению системой беспилотного летательного аппарата с подвесным грузом // Русский инженер: Сборник тезисов II Всероссийского конгресса с международным участием (Москва, 30 октября – 01 ноября 2024 г.). М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. С. 210–211. (0,15 п.л. / 0,05 п.л.).

7. Интерактивный многомодельный алгоритм с адаптивной вероятностью переходов на основе критерия наблюдаемости / Х. Чэнь [и др.] // Автоматизация. Современные технологии. 2026. Т. 80, № 3. С. 110–116. (0,83 п.л./ 0,25 п.л.).

8. Чэнь Х. Метод оптимальной оценки состояния системы с дискретным запаздыванием на входе без временной метки // Авиакосмическое приборостроение. 2026. №5. С. 16-23. (1,4 п.л.)

9. Чэнь Х., Ван Ч., Неусыпин К. А. Коррекция навигационной системы на основе самообучающегося кубатурного фильтра Калмана с использованием квадратного корня // Будущее машиностроения России: Сборник докладов XVII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) (Москва, 24–27 сентября 2024 г.). В 2 т. Т. 2. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. С. 173–176. (0,3 п.л./ 0,2 п.л.).

10. Чэнь Х., Селезнева М. С. Исследование тяжелых хвостов NLOS в навигационных системах UWB-ИНС на основе коррэнтропии // Будущее машиностроения России: Сборник докладов XVIII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) (Москва, 23–26 сентября 2025 г.) В 2 т. Т. 2. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026. С. 213–218. (1,0 п.л. / 0,9 п.л.)

11. Облегченная модифицированная сеть YOLO для детектирования объектов дорожной сцены/ Х. Чэнь [и др.]// Инженерный вестник Дона. 2025. №8(128). С. 173–180. (0,8 п.л./ 0,2 п.л.).

12. Оптимизация максимальной горизонтальной скорости беспилотного воздушного судна с учетом ветровых возмущений и вариаций плотности воздуха на основе улучшенного генетического алгоритма / Х. Чэнь [и др.]// Авиакосмическое приборостроение. 2025. №8. С. 13–22. (1,1 п.л. / 0,3 п.л.).

13. Разработка надежного алгоритма совместного позиционирования ведущих-ведомых беспилотных воздушных судов на основе относительного оценивания состояния / Х. Чэнь [и др.]// Авиакосмическое приборостроение. 2025. №12. С. 14–27. (1,0 п.л./0,3 п.л.)

14. Улучшенный генетический алгоритм с гарантированной глобальной сходимостью: теоретическое обоснование и экспериментальная верификация / Х. Чэнь [и др.]// Авиакосмическое приборостроение. 2025. №8. С. 37–48. (1,3 п.л./ 0,4 п.л.).