

На правах рукописи

ЧЖАН МИНМИН

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ МАРШРУТА
ПЛАНЕТОХОДА И КОРРЕКЦИИ НАВИГАЦИОННОГО
КОМПЛЕКСА**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Чжан М.

Москва – 2024

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

Научный руководитель: **Неусыпин Константин Авенирович**,
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
систем автоматического управления МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Официальные оппоненты: **Саксонов Евгений Александрович**
Д.т.н., профессор кафедры математической
кибернетики и информационных технологий
Московского технического университета связи и
информатики

Зонов Николай Иванович, к.т.н., доцент
Московского авиационного института (МАИ)

Ведущая организация: **ООО "РТСофт-Смарт Грид"**

Защита состоится 25 февраля 2025 г. в 14.30 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 бюджетного 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 ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2024 г.

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



Муратов
Игорь Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Исследование небесных тел в космосе - важная область космических полетов, а также шаг, который человечество должно сделать в дальнейшем освоении Вселенной. Исследование объектов дальнего космоса началось еще в 1950-х годах. После вступления в XXI век космические державы начали активно реализовывать миссии по исследованию дальнего космоса. В последние годы ученые подвели итоги предыдущих миссий по исследованию поверхности Марса и запланировали большее количество районов исследования с высокой научной отдачей для будущих исследовательских миссий, но эти районы часто расположены в суровых условиях. Поэтому в будущих миссиях по исследованию планет необходимо значительно повысить точность навигации планетоходов, а также обеспечить их способность автономно воспринимать окружающую среду, планировать маршруты движения и обходить препятствия.

Планетоход должен обладать достаточной ситуационной осведомленностью об окружающей среде, чтобы получить как можно больше научных результатов, а также должен обладать определенной степенью автономности, чтобы справляться с возможными чрезвычайными ситуациями, такими как обход препятствий в режиме реального времени, определение областей с высокой потенциальной научной ценностью и так далее. Сочетание метода позиционирования с помощью инерциального измерительного блока (IMU) и одометра было подтверждено в ходе испытаний автономных беспилотных автомобилей. Комбинированная система IMU/одометры может использовать преимущества систем для достижения высокоточного автономного позиционирования. Однако в миссии по исследованию планет марсоход будет исследовать некоторые области со сложным рельефом (например, борта кратеров, наклонную местность и т. д.). Например, движение по склону вызовет пробуксовку колес, что приведет к ошибкам измерения одометра, поэтому в условиях сложного планетарного рельефа сочетанию IMU и одометра трудно удовлетворить потребности навигационной миссии.

Автономная навигация на основе комбинирования информации из нескольких источников не зависит от времени и уклона местности и может предоставить полную навигационную информацию, чтобы компенсировать суммарную ошибку, вызванную рекурсией траектории, поэтому данный метод постепенно привлекает внимание ученых и организаций. В последние годы навигация на основе комплексирования нескольких источников информации широко применяется в наземных роботах и беспилотных летательных аппаратах и постоянно совершенствуется. Однако эту же навигационную систему нельзя просто перенести на автономные исследовательские миссии на Марсе или астероидах. В отличие от естественной среды Земли, текстура поверхности Марса и астероидов бедна, а соответствующие особенности изображения поверхности не отличаются разнообразием, что повышает сложность сопоставления обнаруженных особенностей с одноименными точками в базе данных; сложные условия посадки на Марсе, где поверхность

подвергается выветриванию и эрозии круглый год, также повышают сложность поддержания согласованности базы данных признаков.

Поэтому для будущих миссий по исследованию планет повышение степени автономности планетоходов является неизбежной тенденцией. Методы позиционирования, основанные на объединении данных из нескольких источников, имеют большой потенциал для применения, но многие ключевые вопросы еще предстоит решить. Необходимо подробнее изучить алгоритм навигации и позиционирования на основе комплексирования информации из нескольких источников, фокусируясь на том, как использовать информацию из нескольких датчиков для упреждающего восприятия окружающей среды вокруг планетохода для достижения автономного избегания препятствий во время движения и автономного планирования пути планетохода для повышения точности навигации.

Целью работы является разработка методов и алгоритмов коррекции навигационного комплекса и планирования маршрута планетохода.

Задачи исследования:

1. Разработка алгоритма для повышения точности позиционирования планетохода в трехмерном пространстве с помощью метода комплексов датчиков и его применение к задаче адаптивного управления для процесса навигации;

2. Построение и исследование надежных алгоритмов автономной навигации и позиционирования с помощью варианта алгоритма фильтра Калмана;

3. Разработка алгоритма нелинейной оптимизации траектории планетохода на основе метода фильтра частиц по гауссовой сумме;

4. Исследование метода синтеза информации и его применение в задачах планирования маршрута и обхода препятствий во время движения планетохода.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан алгоритм SLAM для планирования пути с активным повторным наблюдением на основе алгоритма извлечения и сопоставления характеристик 3D облака точек, и предложенный алгоритм значительно повышает точность навигации по сравнению с традиционным алгоритмом автономной навигации и построения карт EKF-SLAM в среднем на 10%.

2. Разработан метод навигации по рельефу на основе фильтра частиц. По сравнению с аналогом - фильтром Байеса объем вычислений сокращается до 20%.

3. Разработан алгоритм навигации по рельефу на основе фильтра частиц по гауссовой сумме, который позволяет повысить скорость и точность в задаче построения маршрута. Поскольку процесс передискретизации отсутствует, вычислительные требования при выполнении снижаются в среднем на 8-15% при сохранении точности.

4. Разработана структура системы планирования маршрута на основе комплексирования визуально-инерциально-астрономических систем с использованием мультисенсорной информации, которая позволяет достичь повышения точности позиционирования в среднем на 5-8%.

Достоверность и обоснованность полученных теоретических и практических результатов подтверждаются результатами математического моделирования, а также математическими выводами при обработке данных, полученных в результате эксперимента.

Для исследований применялись методы теории управления и теории случайных процессов, теории навигации, а также вычислительные методы и математическое моделирование.

Практическая значимость результатов исследования

1. Метод планирования траектории с использованием фильтра частиц на основе гауссовых сумм позволяет планетоходам быстро планировать безопасные траектории движения, что обеспечивает более эффективное исключение опасных участков и поиск безопасных путей.

2. Разработан алгоритм отслеживания траектории с учетом рельефа местности, который повышает точность позиционирования планетохода во время движения и позволяет достичь более высокой точности непрерывной навигации с использованием низкоэнергетических датчиков.

3. Алгоритмы синтеза информации, разработанные с использованием информации от разных датчиков (IMU, камера, астродатчики), могут быть непосредственно применены для управления планированием траектории.

Результаты работы использованы в Научно-исследовательском институте аэрокосмической информации Цилу (КНР) и в учебном процессе кафедры систем автоматического управления МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Методы исследования. Использованы теория автоматического управления, методы обработки изображений, теории навигационных систем, теории системного анализа, математического моделирования и программные пакеты MATLAB и ROS.

Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.

1. Алгоритм автономной навигации и позиционирования во время движения планетохода на основе EKF-SLAM с активным повторным наблюдением обеспечивает эффективное формирование безопасных путей движения планетохода.

2. Алгоритм отслеживания траектории для навигации с учетом рельефа местности обеспечивает повышение точности непрерывной навигации.

3. Алгоритм навигации и позиционирования за счет комплексирования нескольких датчиков повышает точность планирования траектории планетохода.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XXI Всероссийская конференция «Информационные технологии, системный анализ и управление» (Таганрог, 2023г.), Международная конференция по цифровой трансформации (Фергана, Узбекистан, 2023г.), Международная научно-техническая конференция «Автоматизация» (Сочи, 2023г.), Международная научно-практическая конференция «Индустрия 4.0» (Сочи, 2024г.), XXXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (Санкт-Петербург, 2024).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, из них 2 статьи в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий – ВАК РФ и 5 статьи в Перечне международных научных изданий в системе Web Science и Scopus, общим объемом 6,79 п.л./3,1 п.л.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 112 наименований. Текст диссертации изложен на 132 страницах, содержит 55 рисунков и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели, задачи и методы исследования, отмечены научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации, внедрению результатов, публикациях, структуре и объему диссертации.

В первой главе представлен исторический экскурс создания планетоходов, тенденций развития и современного состояния исследований в области технологий автономной навигации. Выполнен обзор методов объединения информации от нескольких источников и классификация датчиков, используемых для зондирования окружающей среды. Определены задачи коррекции навигационного комплекса.

Во второй главе представлены различные системы координат и соотношения преобразований между ними, принцип работы и модель визуального одометра, а также представлен алгоритм обнаружения и сопоставления признаков для отслеживания особенностей визуальных изображениях. Представлены результаты моделирования датчиков.

Модель изображения камеры. Камера отображает наблюдаемые точки координат в трехмерном мире на двумерную физическую плоскость изображения. Процесс формирования изображения может быть описан геометрической моделью, а модель формирования изображения камера–обскуры является одной из наиболее часто используемых, простых и эффективных геометрических моделей.

По принципу подобия треугольника имеем:

$$\frac{z_c}{f} = \frac{x_c}{x'} = \frac{y_c}{y'}, \quad (1)$$

Связь между координатами в плоскостной системе координат $P' = (x', y')^T$ и соответствующими им координатами пикселей $(u, v)^T$ в пиксельной системе координат:

$$\begin{cases} u = f_x \frac{x_c}{z_c} + c_x \\ v = f_y \frac{y_c}{z_c} + c_y \end{cases}, \quad (2)$$

где f_x и f_y можно представить как горизонтальное и вертикальное фокусные расстояния камеры в пикселях, причем f - в метрах. Уравнение в виде однородных координат имеет вид:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{z_c} \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{pmatrix} = \frac{1}{z_c} K P_c = K \tilde{P}_c, \quad (3)$$

где K - внутренняя матрица отсчета камеры, значения параметров которой сообщены производителем или получены с помощью методов калибровки камеры. \tilde{P}_c - это нормализация P_c и представляет собой проекцию P_c на плоскость нормализации камеры (которую можно представить как лежащую на плоскости в $z = 1$ перед камерой), то есть нормализованные координаты.

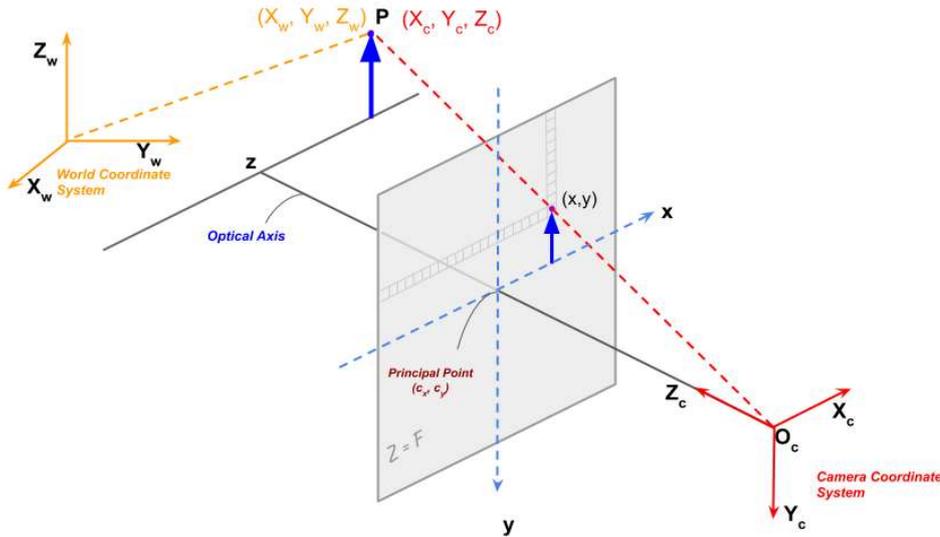


Рис. 1. Модель изображения камеры

В навигационной системе VO соотношение преобразования между координатной точкой камеры P_c и мировой координатной точкой P_w имеет вид:

$$P_c = R P_w + t, \quad (4)$$

где R и t - внешние параметры камеры и параметры положения, которые необходимо оценить в VO-навигации, представляющие собой изменение положения камеры между изображениями.

Модель камеры с малым отверстием имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{z_c} \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} (R P_w + t) = K [(R P_w + t) / z_c]. \quad (5)$$

В третьей главе разработаны алгоритмы навигационного комплекса планетохода.

Разработка алгоритма автономной навигации и позиционирования во время движения планетохода на основе EKF-SLAM с активным повторным наблюдением. Для реализации более точного и гибкого метода автономной навигации для планетохода, предложен алгоритм навигации планетохода в рамках навигационного алгоритма EKF-SLAM. Во-первых, траектория регрессии активного повторного наблюдения разработана в соответствии с эффектом оценки состояния в реальном времени, затем выполняется сопоставление 3D-характеристик в точке активного повторного

наблюдения с помощью алгоритма извлечения и сопоставления 3D-характеристик, и, наконец, оценка состояния и карты разведочного блока обновляется в соответствии с результатом сопоставления. Общая схема алгоритма представлена на Рис.2.

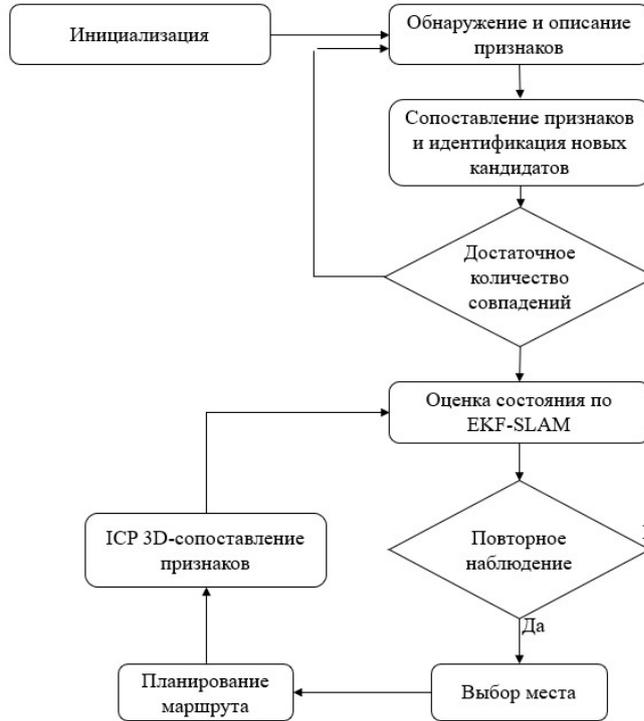


Рис. 2. Общая схема алгоритма на основе EKF-SLAM с активным повторным наблюдением

Рекурсивные уравнения состояния планетохода:

$$X_G(k+1) = X_G(k) + \Delta T \begin{bmatrix} C_B^G(k+1) & 0 \\ 0 & C_{\omega_B}^{\omega_G}(k+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_B(k+1) + \tilde{v}_B \\ \omega_B(k+1) + \tilde{\omega}_B \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где ΔT – дискретный интервал времени, а X_k – состояние системы в течение k времени, $\tilde{v}_B \sim N(0, Q_v)$ и $\tilde{\omega}_B \sim N(0, Q_\omega)$ – шумовые помехи в объеме управления, соответственно.

Прогнозируемое значение состояния планетохода $\hat{X}(k+1|k)$ в момент времени $k+1$ имеет вид:

$$\hat{X}(k+1|k) = \hat{X}_R(k|k) + \Delta T \begin{bmatrix} \hat{C}_B^G(k) & 0 & 0 \\ 0 & \hat{C}_{\omega_B}^{\omega_G}(k) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_B(k+1) \\ \omega_m(k+1) \\ 0 \end{bmatrix} + N_k \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \hat{n}_\omega \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где

$$N_k = \Delta T \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\hat{C}_{\omega_B}^{\omega_G}(k) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Трёхмерное положение на глобальной карте:

$$\begin{aligned}
m_j^G(k+1) &= g_{k+1}^G(z_j(k+1), \hat{X}_G(k+1)) \\
&= \hat{P}_R(k+1) + \hat{C}_B^G(k+1) \left(C_B^H C_L^H m_j^L(k+1) + d_B^H \right),
\end{aligned} \tag{9}$$

где m_j – в момент времени $k+1$ наблюдается новая точка объекта, и ее соответствующее наблюдение – $z_j(k+1)$, $d_B^H = [a, b, c]^T$ – вектор положения (постоянная величина) кардана под системой.

Повторное наблюдение обеспечивает объединение прогноза дисперсии состояния системы с текущим наблюдением. Этот процесс аналогичен EKF-фильтрации, за исключением того, что EKF-SLAM необходимо предсказать глобальную карту, используя текущее наблюдение, чтобы сгенерировать прогноз наблюдений $\hat{Z}(k+1)$. Уравнение прогнозирования для одной точки объекта, занесенной в карту, имеет вид:

$$\begin{aligned}
\hat{z}_i &= h_{k+1}(\hat{X}_G, m_i) = \begin{bmatrix} \sqrt{(q_x^C)^2 + (q_y^C)^2} \\ \arctan(q_y^C / q_x^C) \\ L_a \end{bmatrix}, \\
q^C &= \hat{C}_H^C \hat{C}_B^H \hat{C}_G^B m_i^G - \hat{C}_H^C \hat{C}_B^H (\hat{C}_G^B \hat{p}_G + b_B^H)
\end{aligned} \tag{10}$$

где q^C – информация о псевдорасстоянии, представляющая положение точки m_j объекта карты в системе бинокулярных камер.

Состояние системы дополняется массивом дисперсий:

$$\begin{aligned}
X_R(k+1) &\leftarrow \begin{bmatrix} X_R(k+1) \\ \mathcal{L}_{K+1} = \begin{bmatrix} m_1^G \\ m_2^G \\ \vdots \\ m_N^G \end{bmatrix} \end{bmatrix}, \\
P_{RR}(k+1) &\leftarrow \begin{bmatrix} P_{RR}(k+1) & P_{mx}^T \\ P_{mx} & P_{mm} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{11}$$

Отслеживание навигационной траектории на основе фильтра частиц по Гауссовой сумме. В момент t прогнозное распределение системы полагается в следующем виде:

$$p(x_t | Y^{t-1}) \approx \sum_{i=1}^G \hat{\omega}_i N(x_t, \hat{\mu}_i, \hat{\Sigma}_i), \tag{12}$$

Апостериорная функция плотности вероятности:

$$\begin{aligned}
p(x_t|Y^t) &= \sum_{i=1}^G \hat{\omega}_i \frac{p(y_t|x_t)p(x_t|Y^{t-1})}{p(y_t|Y^{t-1})} \\
&= \sum_{i=1}^G \hat{\omega}_i \frac{p(y_t|x_t)N(x_t, \hat{\mu}_i, \hat{\Sigma}_i)}{p(y_t|Y^{t-1})}, \\
&\propto \sum_{i=1}^G \hat{\omega}_i p(y_t|x_t)N(x_t, \hat{\mu}_i, \hat{\Sigma}_i)
\end{aligned} \tag{13}$$

где

$$\begin{cases}
\mu_{ii} = \hat{\mu}_i + K_{ii}[y_t - h(x_t)] \\
\Sigma_{ii} = \hat{\Sigma}_i - K_{ii}H_{ii}\hat{\Sigma}_i \\
\omega_{ii} = \hat{\omega}_i N[y_t, h(\hat{\mu}_i), H_{ii}^T \hat{\Sigma}_i H_{ii} + \sigma_e^2 I] / \sum_{i=1}^G \hat{\omega}_i N[y_t, h(\hat{\mu}_i), H_{ii}^T \hat{\Sigma}_i H_{ii} + \sigma_e^2 I] \\
K_{ii} = \hat{\Sigma}_i H_{ii} (H_{ii}^T \hat{\Sigma}_i H_{ii} + \sigma_e^2 I)^{-1} \\
H_{ii} = \partial h(x) / \partial x \Big|_{x=\hat{\mu}_i}
\end{cases}$$

Предполагается, что $p(x_{t+1}|Y^t)$ также является гауссовой смесью, т.е:

$$\begin{aligned}
p(x_{t+1}|Y^t) &= \int p(x_{t+1}|x_t)p(x_t|Y^t)dx_t \\
&\approx \int p(x_{t+1}|x_t) \sum_{i=1}^G \hat{\omega}_i N(x_t, \hat{\mu}_i, \hat{\Sigma}_i) dx_t \\
&= \sum_{i=1}^G \hat{\omega}_i \int p(x_{t+1}|x_t) N(x_t, \hat{\mu}_i, \hat{\Sigma}_i) dx_t, \\
&= \sum_{i=1}^G \hat{\omega}_{(t+1)i} N(x_{t+1}, \hat{\mu}_{(t+1)i}, \hat{\Sigma}_{(t+1)i})
\end{aligned} \tag{14}$$

где $\hat{\mu}_{(t+1)i} = \mu_{ii}$, $\hat{\Sigma}_{(t+1)i} = \Sigma_{ii} + \sigma^2 I$, $\hat{\omega}_{(t+1)i} = \omega_{ii}$.

Получина оценка состояния и оценка дисперсии:

$$\hat{x}_t = \sum_{i=1}^G \omega_{ii} \mu_{ii}, \tag{15}$$

$$\hat{\Sigma}_t = \sum_{i=1}^G \omega_{ii} [\Sigma_{ii} + (\hat{x}_t - \mu_{ii})(\hat{x}_t - \mu_{ii})^T]. \tag{16}$$

Блок–схема для навигации по рельефу на основе фильтра частиц с суммой Гаусса представлена на рис. 3.

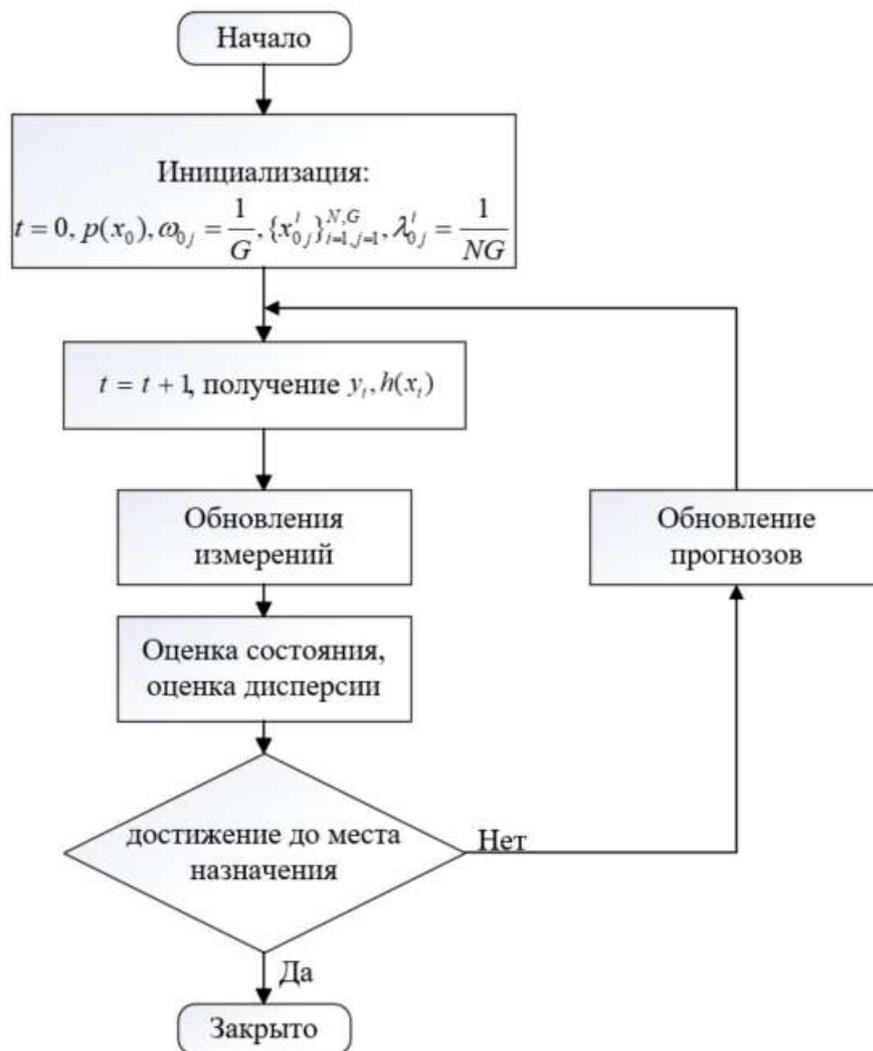


Рис. 3. Блок–схема навигации по рельефу на основе фильтра частиц с суммой Гаусса

Разработка алгоритма навигации и позиционирования с учетом рельефа местности на основе комплексирования информации. Предложена система восприятия на основе зрения и инерции, которая может обеспечить построение локальных карт рельефа и оценку собственного положения в реальном времени в условиях ограниченных вычислительных ресурсов. Блок–схема алгоритма представлена на рис. 4.

Входы системы включают входы датчиков и текущее положение, текущую карту. Входы датчиков включают бинокулярные изображения, ускорение и угловую скорость, измеренные IMU и векторы звездного света, наблюдаемые звездным датчиком. Выходные данные системы включают текущее положение робота относительно начального момента и локальную карту высот с центром на планетоходе.



Рис. 4. Общая схема алгоритма

Наблюдаемый вектор звездного света S выражается как:

$$S = \frac{1}{\sqrt{x_c^2 + x_y^2 + f^2}} (-x_c \quad -x_y \quad f)^T, \quad (17)$$

где (x_c, x_y) – координаты центра масс звезды в плоскости изображения звездного сенситива, а f – фокусное расстояние звездного датчика.

Погрешность измерения ориентации инерциальной навигационной системы относительно астрономической навигационной системы в момент времени t как:

$$Z(t) = (\gamma_s - \gamma_c, \theta_s - \theta_c, \phi_s - \phi_c), \quad (18)$$

где $(\gamma_c, \theta_c, \phi_c)$ – информация об ориентации несущей системы относительно навигационной системы, $(\gamma_s, \theta_s, \phi_s)$ – отношение выходного носителя инерциального наведения в инерциальной системе.

Модель визуального наблюдения имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \tilde{z}_{n,k+1} \\ \vdots \\ \tilde{z}_{n,k-m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{x,k+1} \\ \vdots \\ H_{x,k-m} \end{bmatrix} \tilde{x}_{k+1|k} + \begin{bmatrix} H_{f,k+1} \\ \vdots \\ H_{f,k-m} \end{bmatrix} \tilde{p}_f^G + \begin{bmatrix} n_{z,k+1} \\ \vdots \\ n_{z,k-m} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где $H_{x,j}$ и $H_{f,j}$ – матрицы Якоби модели наблюдения относительно априорных значений векторов состояний и оценок расположения собственных точек.

Соединение карт должен выполняться следующим образом:

$$h_{i,\min} = \hat{h}_i - 2\sigma_{h_i}, \quad (20)$$

$$h_{i,\max} = \hat{h}_i + 2\sigma_{h_i}, \quad (21)$$

где $h_{i,min}$ – нижняя граница высоты раstra, $h_{i,max}$ – верхняя граница высоты раstra, σ_{h_i} – стандартное отклонение оценки высоты \hat{h}_i .

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований разработанных алгоритмических решений.

Результаты математического моделирования модифицированного EKF–SLAM с активным планированием повторного наблюдения. На Рис.5 представлены результаты ошибок оценки EKF–SLAM с активным планированием повторного наблюдения по сравнению с ошибкой оценки EKF–SLAM без активного повторного наблюдения и ошибкой оценки UKF–SLAM.

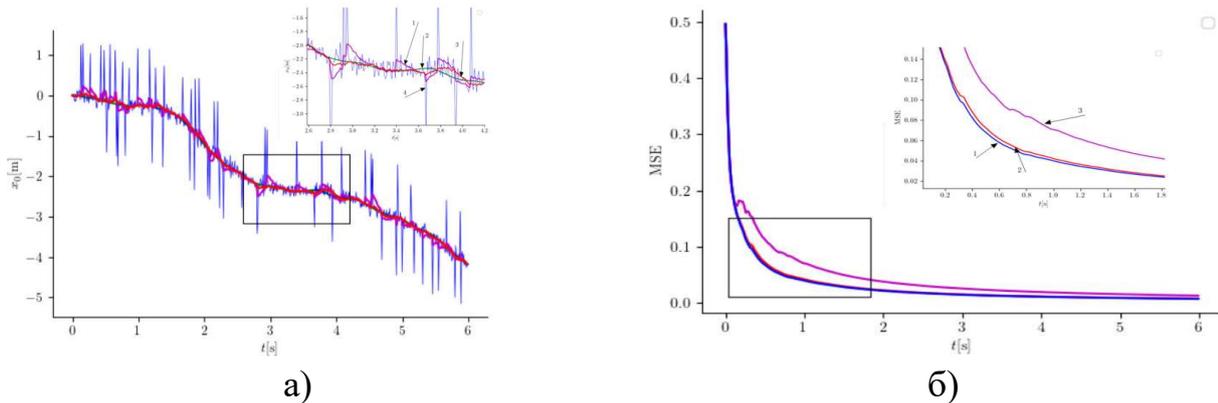


Рис. 5. Ошибки оценки: а) Сравнение погрешностей траектории; б) Сравнение средней квадратичной ошибки

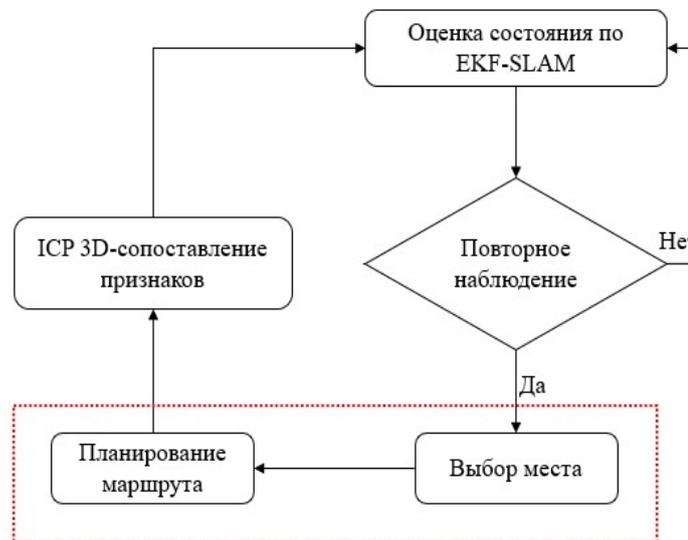
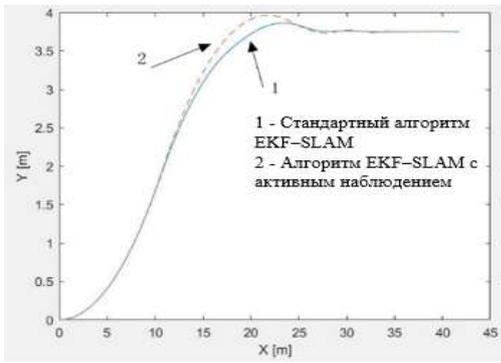
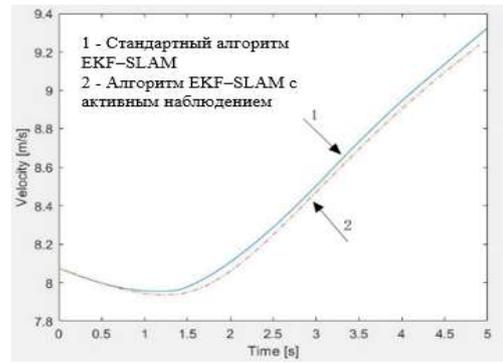


Рис. 6. Схема активного повторного наблюдения на основе EKF–SLAM

На Рис.6 предложена схема активного повторного наблюдения на основе EKF–SLAM. когда требуется активное повторное наблюдение, планетоход после прибытия в заданное место выбирает место повторного наблюдения, планирует обратный путь и сопоставляет трехмерные характеристики ICP в соответствии с шагами, описанными выше, и использует информацию о положении, полученную в результате сопоставления характеристик ICP, для обновления состояния планетохода и карты, и наконец, завершает задачу активного SLAM.



а) Оценка погрешности траектории



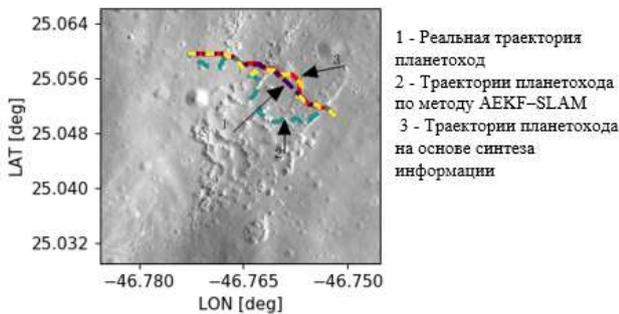
б) Оценка погрешности угловой скорости

Рис.7 Оценка погрешности

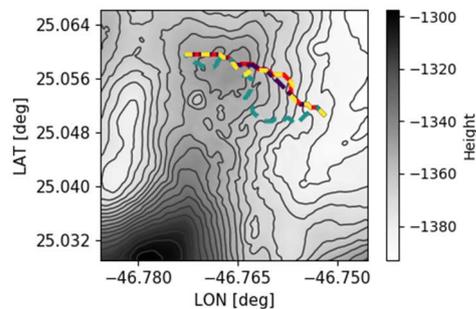
На Рис.7. представлены результаты ошибок оценки EKF-SLAM с активным планированием повторного наблюдения по сравнению с ошибкой оценки стандартного EKF-SLAM.

По результатам моделирования, алгоритм SLAM с активным повторным наблюдением позволяет эффективно снизить неопределенность оценки состояния и повысить точность навигации планетохода.

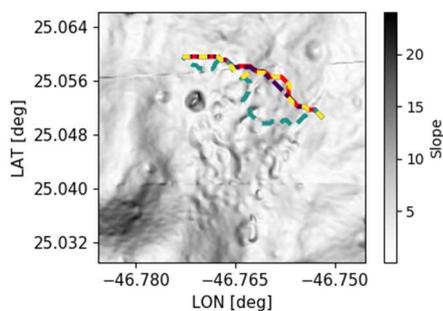
Результаты алгоритма навигации и позиционирования при комплексировании нескольких датчиков. На Рис.8 показаны результаты использования алгоритма комплексирования информации для решения задачи отслеживания траектории движения планетохода, что доказывает, что разработанный комплексный алгоритм может быть использован для решения задачи точного отслеживания траектории движения планетохода.



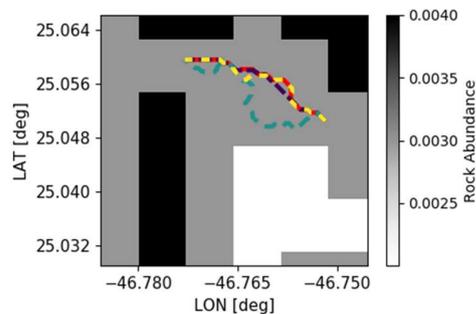
а) Траектории движения планетохода на поверхности планет



б) Траектории планетохода на различных высотах



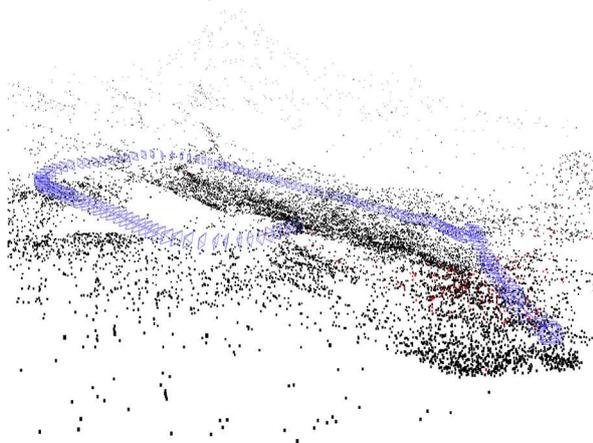
в) Траектории планетохода на различных наклонах



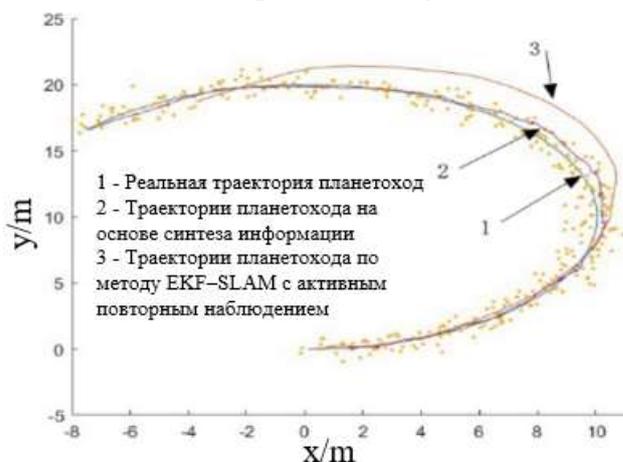
г) Траектории планетохода на различных наклонах обилий камней

Рис. 8. Результаты моделирования траектории планетохода

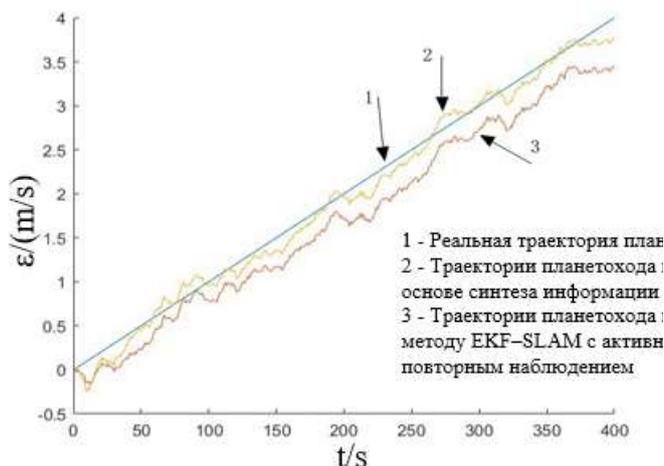
Для проверки работоспособности предложенного алгоритма были проведены натурные испытания (Рис. 9). Экспериментальный автомобиль оснащен камерами, радаром миллиметровых волн, IMU и другими датчиками. Данные, собранные датчиками, обрабатываются контроллерами домена NVIDIA. Взаимодействие с датчиками осуществлялось через систему ROS.



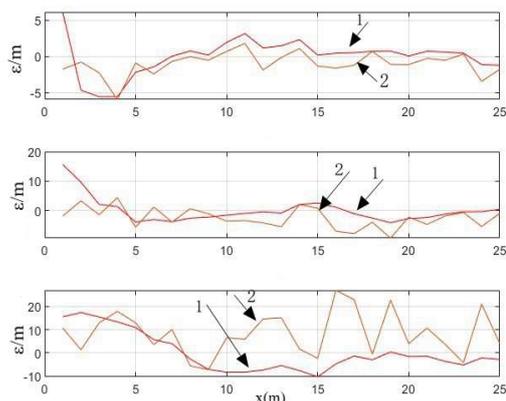
(а) Обнаружение петли при движении робота



(б) Отслеживание траектории при движении робота



в) Оценка погрешности скорости



г) Оценка относительной ошибки позиционирования в направлениях x, y, z

Рис. 9. Результаты натурных испытаний

В заключении приведены основные результаты диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработан алгоритм SLAM с активным повторным наблюдением, который снижает скорость роста неопределенности оценки положения за счет повторного наблюдения 3D-объектов с высокой степенью достоверности и эффективно повышает точность навигации по сравнению с аналогом-алгоритмом EKF-SLAM в среднем на 10%.

2. Разработан метод навигации по рельефу на основе фильтра частиц по сравнению с аналогом-фильтром Байеса сокращение вычисленных затрат осуществляется на 20%.

3. Разработан модифицированный алгоритм фильтра частиц, работающий в реальном времени. За счет отсутствия процесса

передискретизации достигается сокращение вычисленных затрат при реализации в среднем на 8-15% при сохранении точности, по сравнению с классическим алгоритмом фильтра частиц.

4. Разработана структура системы навигации на основе комплексирования визуально-инерциально-астрономических систем с использованием мультисенсорных фильтров, которая позволяет достичь повышение точности позиционирования в среднем на 5-8%.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Минмин Чжан, Неусыпин К.А. Наведение ракеты на место посадки на основе сопоставления изображений // Автоматизация. Современные технологии. 2022. № 7. С. 330-307. (1.84 п.л. / 0.38 п.л.) .

2. Минмин Чжан, Неусыпин К.А. Исследование двухрежимного алгоритма совместной обработки инфракрасных и видимых изображений на основе остаточной сети // Автоматизация. Современные технологии. 2023. № 6. С. 268-276. (1.5 п.л. / 0.51 п.л.).

3. Zhang, Ming., Neusyпин K.A., Selezneva M.S. Research of the Information Fusion Technique for Millimeter Wave Radar and Camera // 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). IEEE. 2023. P. 65-69. (0.57 п.л. / 0.51 п.л.).

4. Zhang M., Luo Y., Neusyпин K.A. Research on Combined GNSS/IMU/Camera Positioning and Navigation in Full Scene // 2024 International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon). IEEE, 2024. P. 327-332. (0.57 п.л. / 0.47 п.л.).

5. Zhang M, Neusyпин K A. Research on mobile robot localization algorithm based on multi-sensor fusion // International Conference on Digital Transformation: Informatics, Economics, and Education (DTIEE). SPIE. 2023. P. 1263702. (0.69 п.л. / 0.28 п.л.).

6. Mingming Zhang, Neusyпин Konstantin Avenirovich, Bin He. Research on GPS-assisted inertial/starlight high-precision information fusion algorithm // IEEE 2024 31th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). IEEE. 2024. P.132-136. (0.58 п.л. / 0.51 п.л.).

7. Bin He, K.A. Neusyпин, Zhong Wang, Mingming Zhang. Feedback linearization and adaptive sliding mode control system for UAV // IEEE 2024 31th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). IEEE. 2024. P.56-59. (0.46 п.л. / 0.33 п.л.).

8. Чжан Минмин, Неусыпин К.А. Разработка двухрежимного алгоритма слияния инфракрасных и видимых изображений на основе остаточной сети // XXI Всероссийская конференция «Информационные технологии, системный анализ и управление» (ИТСАУ). М.: Изд-во ЮФУ. 2022. С. 442-446. (0.58 п.л. / 0.11 п.л.).

9. Пат. CN202310530041.0 Китайская Народная Республика. A deep learning based method and system for detecting furnace doors in a steel plant / Zhang M., Wang D.; 2023.

10. Пат. CN202310417152.0 Китайская Народная Республика. An intelligent lift alarm method, system, device, and storage medium with electric vehicle detection / Sui X., Zhang M.; 2023.