

# Метод совместной навигации группы беспилотных аппаратов, находящихся в разных физических средах\*

Амосов О.С., Амосова С.Г., Кулагин К.А.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

г. Москва, Российская Федерация

[osa18@yandex.ru](mailto:osa18@yandex.ru)

**Аннотация.** Предложен метод совместной навигации группы беспилотных аппаратов, находящихся в разных физических средах. Дана постановка и решение задачи для совместной навигации группы беспилотных аппаратов: представлена модель комплексирования навигационной информации от различных источников и измерителей для обработки точного позиционирования каждого аппарата, представлен алгоритм оценивания координат в плоскости и направление движения аппарата с использованием инерциальной навигационной системы. Дан иллюстрирующий пример. Предложен виртуальный полигон с рельефом местности для симуляции навигации автономных беспилотных аппаратов, работающих в разных средах.

**Ключевые слова:** беспилотный аппарат, инерциальная навигация, комплексирование, обобщенный фильтр Калмана, виртуальный полигон.

## ВВЕДЕНИЕ

До сих пор остается злободневным вопрос синтеза наиболее эффективных по точности и быстродействию алгоритмов навигации беспилотных аппаратов (БА) по геофизическим полям (ГФП) на основе реализации связи между аппаратами в условиях, где невозможно использование спутниковых и радиотехнических средств.

Задача навигации по ГФП и с использованием маяков является одной из самых сложных задач, с которыми приходится сталкиваться на практике при обработке навигационной информации. Особенно актуален метод навигации по геофизическим полям и маякам, когда невозможно использование спутниковых и радиотехнических средств, для беспилотных подводных аппаратов (БПА). Основная трудность заключается в непрозрачности водной среды для обычных видов излучения, за исключением акустических волн. Таким образом, акустические датчики являются единственным инструментом для внешних измерений ориентации и положения БА. Другая трудность заключается в непостоянстве скорости распространения акустических волн, которая зависит от температуры, солености и давления. По этой причине только слияние данных акустических измерений с данными других датчиков бортовой инерциальной навигационной системы может обеспечить необходимое качество и надежность оценки.

Для автономных беспилотных подводных аппаратов (АБПА) в работах [1-3] рассматриваются методы навигации по геофизическим полям и маякам, когда невозможно использование спутниковых и радиотехнических средств.

В работе [4] предлагается для подводных аппаратов получать информацию от интеллектуальных маяков, роль которых может быть выполнена летательными БА с приводением и способных обеспечить передачу точных координат своего местоположения и данных от спутниковых, радиотехнических систем.

По направлению навигации наземных транспортных средств и алгоритмов комплексирования данных бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) и одометра занимается большой круг ученых и исследователей [5-8].

Как одно из основных направлений исследования выделяется задача по разработке алгоритмов повышения точности комплексного позиционного решения с использованием БИНС, глобального позиционирования (GPS, Global Positioning System) и одометра. Интегрирование инерциального измерительного блока (IMU, Inertial Measuring Unit) с GPS традиционно осуществляется с помощью фильтра Калмана (ФК). Из-за значительных ошибок, присущих инерционным микромеханическим датчикам MEMS и их изменяющихся во времени измерений, которые трудно смоделировать, во время сбоя в работе GPS происходит серьезный рост ошибок определения местоположения. Точность позиционирования, обеспечиваемая ФК, ограничена его линеаризованными моделями. Поэтому исследователи активно занимаются решением задачи повышения точности в периоды недоступности или недостоверности GPS сигнала [9-11].

В работе [10] предлагается навигационное решение для наземных транспортных средств с использованием IMU на основе MEMS для интеграции с GPS. Интегрирование осуществляется с помощью расширенного фильтра частиц (MPF, Mixture Particle Filter). Для повышения производительности интеграции IMU/GPS на основе MEMS во время сбоя в работе GPS, в этой статье предлагается использовать угол тангажа и крена, рассчитанный по данным продольного и поперечного акселерометров, вместе с данными одометра в качестве обновления измерений. Эффективность предлагаемого метода исследована на траекториях дорог, а результаты сравниваются с тремя различными решениями на основе ФК. Предложенный MPF с обновлениями скорости, тангажа и крена превзошел все другие решения и продемонстрировал среднее улучшение примерно на 64 % по сравнению с ФК с теми же обновлениями, примерно на 85 % по сравнению с ФК только с обновлениями скорости и примерно на 95 % по сравнению с ФК без обновлений.

\* Работа выполнялась при поддержке гранта РФФИ № 24-29-00671. Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Автоматизация", <https://rusautocon.org>

В работе [11] предлагается сегментированный навигационный фильтр, состоящий из позиционного фильтра, вычисляющего данные только о положении, и динамического фильтра, отвечающего за данные о скорости и погрешности датчиков. Данные динамического фильтра корректируются по скорости от одометра или глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Данные позиционного фильтра корректируются по спутниковым данным о дальностях.

Существует несколько реальных проектов взаимодействия колесного робота и квадрокоптера для решения конкретных задач. Например, для поисково-спасательных работ предлагается обновленная версия внедорожника Land Rover Discovery с полностью интегрированной системой развертывания дронов. Внедорожник оснащен системой хранения и запуска квадрокоптера с помощью магнитной стартовой площадки, скрытой под крышей. Квадрокоптер имеет на борту как инфракрасные, так и RGB-датчики для захвата ландшафта и обнаружения тепловых сигнатур, а также передачи данных и отснятого материала обратно в автомобиль [12].

Для подземно-спасательных работ разработана система роботов и дронов от команды Carnegie Mellon University (CMU). Решение включает в себя несколько роботов, четырехколесный ровер и небольшой самодельный беспилотный летательный аппарат. Наземные роботы следят за местностью. Беспилотный летательный аппарат оснащен всеми приборами, которые понадобятся для исследования различных участков шахты. Ровер использует комбинацию 3D-камер и лидара для навигации и картографирования окружающей среды, а также для поиска людей среди обломков. Хотя команда CMU смогла продемонстрировать систему в действии, она до сих пор не освоила метод, позволяющий заставить аппараты работать в команде [13].

Интерес представляет автономный робот-охранник O-R3. Сингапурская компания Otsaw Digital создала команду безопасности без необходимости бесконечного контроля – потому что она роботизирована. O-R3 состоит из автономного четырехколесного роботизированного мини-автомобиля и помощника – квадрокоптера для наблюдения. Оснащенный передовым алгоритмом машинного обучения и технологией 3D SLAM (Simultaneous Localization and Mapping – Метод одновременной навигации и картографирования), O-R3 ориентируется в окружающей среде с помощью встроенных функций. O-R3 избегает препятствия и самостоятельно заряжается, когда его батарея разряжена. Робот имеет несколько камер, каждая из которых выполняет определенную функцию, такую как тепловизионное изображение, распознавание лиц и номерных знаков, а также стереосъемка. Он оснащен несколькими 2D- и 3D-лазерными сканерами, ультразвуковыми датчиками, GPS и дальнедействующими передатчиками данных. Квадрокоптер захватывает данные, которые наземный робот не может увидеть, и передает их обратно в центр управления. Оповещения поступают на приборную панель и отображаются визуально в режиме реального времени [14].

Точное знание траектории планетоходов имеет основополагающее значение для достижения научных целей миссий. В статье [15] представлен метод улучшения локализации ровера посредством обработки только данных одометрии колес и инерциального измерительного устройства.

Точно определяя динамическую модель, как колес марсохода, так и местности, предоставляется основанная на модели оценка проскальзывания колес для корректировки измерений одометрии [15].

В целом совместная работа колесного робота и квадрокоптера дают возможность быстро и эффективно решать сложные задачи в неопределенных внешних условиях. Сложная организация взаимодействия между роботом и дроном еще до конца не решена.

Целью данной работы является выработка навигационных параметров бортовой навигационной системы БА по данным ГФП и маяков в сочетании с другими средствами, способных обеспечить передачу точных координат своего местоположения и данных от спутниковых, радиотехнических систем.

Основная идея доклада состоит в использовании высокоточной навигации для каждого БА из работающих в группе аппаратов разного типа и в разных средах всех доступных для него измерительных средств, а также измерений БА-соседей, недоступных ему непосредственно. Примерами такой совместной навигации являются: использование для подводного БА дронов с приводнением и служащих при этом для подводного БА эталонными маяками, взаимодействие беспилотника и ровера, для уточнения положения последнего.

#### ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СОВМЕСТНОЙ НАВИГАЦИИ ГРУППЫ ГЕТЕРОГЕННЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ

##### *Постановка задачи*

Пусть рассматриваемая группа состоит из нескольких разнотипных беспилотных аппаратов, функционирующих в разных физических средах. Будем рассматривать четыре физических среды: воздушная, земная, надводная, подводная и четыре типа беспилотных аппаратов: летательный аппарат – дрон, наземный, надводный аппарат и подводный аппараты.

##### Необходимо:

1) предложить модель комплексирования навигационной информации для выработки точного позиционирования для каждого БА из группы беспилотных аппаратов, находящихся в разных средах с помощью эффективных по точности и быстродействию алгоритмов по данным геофизических полей и маяков в сочетании с другими средствами, в частности, с акустическими средствами для подводных аппаратов, информации от интеллектуальных маяков, роль которых может быть выполнена летательными БА с приводнением и способных обеспечить передачу точных координат своего местоположения и данных от спутниковых, радиотехнических систем при использовании надежной безопасной системы связи между аппаратами;

2) оценить двумерные плоские координаты беспилотного аппарата относительно внешней системы координат ONE и его угловую ориентацию. Для упрощения алгоритмов ставится задача оценки координат подвижного объекта на плоскости в некоторой прямоугольной системе координат для случая дискретного времени. Заметим, что это ограничение не принципиально, поскольку, как правило, при решении задачи навигации по ГФП подвижный объект движется в трехмерном пространстве вдоль траекторий на постоянной высоте или глубине, информация о которых доступна и может быть учтена при решении задачи [1–2].

*Комплексирование информации*

Комплексирование информации осуществляется от инерциальной навигационной системы, спутниковой аппаратуры, цифровых карт геофизических полей, эталонных маяков, акустических и радиолокационных средств [1, 2, 16, 17].

Бортовой инерциальной навигационной системой беспилотного аппарата вырабатываются координаты положения БА, вырабатываемые, которые представляются вектором  $\mathbf{X}^{HC} = [X_1^{HC} \ X_2^{HC} \ X_3^{HC}]^T$ , который может быть представлен в виде:

$$\mathbf{X}^{HC} = \mathbf{X} + \Delta\mathbf{X}^{HC}, \tag{1}$$

где  $\mathbf{X} = [X_1 \ X_2 \ X_3]^T$  – истинные координаты подвижных объектов и маяков;  $\Delta\mathbf{X}^{HC}$  – погрешности выработки координат места HC.

Спутниковая навигационная аппаратура потребителя по измерениям от ГНСС вычисляет местоположение объекта навигации в виде вектора  $\mathbf{X}^{HA} = [X_1^{HA} \ X_2^{HA} \ X_3^{HA}]^T$ .

В процессе движения БА вычисляются значения параметров ГФП по соответствующим картам  $\phi^K(\bullet)$ , в точке пространства, определяемой координатами HC по формуле

$$\mathbf{Y}^K = \phi^K(\mathbf{X}^{HC}) + \Delta Y^K, \tag{2}$$

где  $\Delta Y^K$  – ошибка картографирования.

Внешний датчик обеспечивает измерения некоторого геофизического поля (параметра), которые могут быть представлены в виде:

$$\mathbf{Y}^D = \phi^K(\mathbf{X}) + \Delta Y^D, \tag{3}$$

где  $\Delta Y^D$  – погрешность измерений датчика.

Для комплексирования могут использоваться измерения от точечных ориентиров – маяков, каждый из которых имеет эталонные координаты  $\mathbf{X}^M = [X_1^M \ X_2^M \ X_3^M]^T$  в соответствии с формулой:

$$\mathbf{Y}^M = \phi^M(\mathbf{X}^{HC}) + \Delta Y^M, \tag{4}$$

где  $\Delta Y^M$  – погрешность измерений для маяка.

Задача заключается в том, чтобы, располагая набором измерений  $\mathbf{Y}^C, \mathbf{Y}^K, \mathbf{Y}^D, \mathbf{Y}^M$  получить оценки погрешностей HC  $\Delta\hat{\mathbf{X}}^{HC}$ , с использованием которых можно было бы уточнить показания HC.

*Оценивание координат и углового положения аппарата с использованием инерциальной навигационной системы*

Конфигурация жесткого беспилотного аппарата относительно внешней системы координат описывается шестью переменными. Это три декартовы координаты и три угла Эйлера: курсовой угол, тангаж, крен. В докладе мы ограничимся описанием беспилотного аппарата, работающим в плоскости, чье кинематическое состояние определяется тремя переменными. Положение аппарата определяется позицией, которую характеризуют его двумерные плоские координаты  $X_N(t), X_E(t)$  относительно внешней системы координат ONE и направлением движения, азимутом  $\alpha(t)$ . Таким образом, положение беспилотного аппарата определяется вектором  $[X_N(t), X_E(t), \alpha(t)]^T$ .

Инерциальный измерительный блок состоит из 3х-осевого гироскопа, 3х-осевого акселерометра и 3х-осевого магнитометра. Для инерциального определения координат местоположения объекта необходимо знать информацию о начальных значениях координат  $X_N(t_0), X_E(t_0)$  и скоростей  $V_N(t_0), V_E(t_0)$ , непрерывно измерять проекции ускорения объекта с помощью акселерометра  $a_x(t), a_y(t)$ , определять с помощью гироскопа ориентацию осей чувствительности акселерометров относительно навигационной системы координат и дважды интегрировать ускорения объекта по времени.

Для инерциального определения координат местоположения объекта на плоскости и направления движения робота необходимо (Рис. 1):

- знать информацию о начальных значениях координат  $X_N(t_0), X_E(t_0)$  и скоростей  $V_N(t_0), V_E(t_0)$ ;
- непрерывно измерять проекции ускорения объекта с помощью акселерометров  $a_x(t), a_y(t)$ ;
- пересчитывать измеренные ускорения  $a_x(t), a_y(t)$  для связанной системы координат ONE  $a_N(t), a_E(t)$  по формулам [17]:

$$\begin{bmatrix} a_N \\ a_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix}; \tag{5}$$

- дважды интегрировать ускорения объекта  $a_N(t), a_E(t)$  по времени:

$$\begin{aligned} V_N(t) &= V_N(t_0) + \int_{t_0}^t a_N(t) dt; \ X_N(t) = X_N(t_0) + \int_{t_0}^t V_N(t) dt; \\ V_E(t) &= V_E(t_0) + \int_{t_0}^t a_E(t) dt; \ X_E(t) = X_E(t_0) + \int_{t_0}^t V_E(t) dt; \end{aligned} \tag{6}$$

- определять угловую ориентацию с помощью выражения

$$\dot{\alpha} = \omega_v, \tag{7}$$

где  $\alpha(t)$  – курсовой угол;  $\omega_v(t)$  – измеряемая угловая скорость беспилотного аппарата относительно вертикальной оси V.

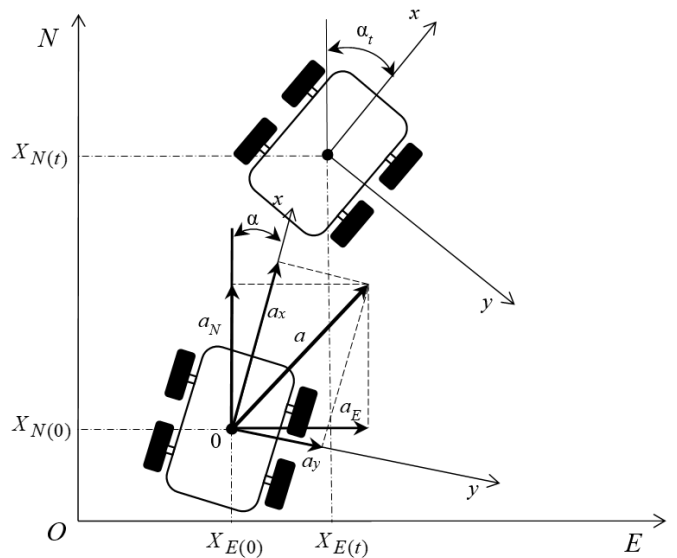


Рис. 1. Оценка положения робера с использованием инерциальных датчиков

Оценивание параметров с помощью обобщенного фильтра Калмана

Кратко приведем формулировку и решение в общем виде задачи нелинейной дискретной фильтрации с помощью расширенного фильтра Калмана (ОФК):

Уравнение для вектора состояния

$$\mathbf{x}_i = \Phi_i(\mathbf{x}_{i-1}) + \mathbf{w}_i. \quad (8)$$

Уравнение для вектора измерения

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{s}_i(\mathbf{x}_i) + \mathbf{v}_i. \quad (9)$$

Начальные условия

$$\mathbf{x}_0 \in \mathbb{R}^N, \mathbf{P}_0 = E[(\hat{\mathbf{x}}_0 - \mathbf{x}_0)(\hat{\mathbf{x}}_0 - \mathbf{x}_0)^T]. \quad (10)$$

Порождающие шумы

$$\bar{\mathbf{w}}_i = 0, \quad E\{\mathbf{w}_i \mathbf{w}_j^T\} = \delta_{ij} \mathbf{Q}_i. \quad (11)$$

Шумы измерения

$$\bar{\mathbf{v}}_i = 0, \quad E\{\mathbf{v}_i \mathbf{v}_j^T\} = \delta_{ij} \mathbf{R}_i. \quad (12)$$

Взаимная корреляция

$$E\{\mathbf{x}_0 \mathbf{w}_i^T\} = 0; \quad E\{\mathbf{w}_i \mathbf{v}_j^T\} = 0; \quad E\{\mathbf{x}_0 \mathbf{v}_i^T\} = 0. \quad (13)$$

Функции, матрицы

$\Phi_i(\mathbf{x}_{i-1}), \mathbf{s}_i(\mathbf{x}_i)$  –  $n$ - и  $m$ -мерные нелинейные вектор-функции,  $\mathbf{Q}_i$  –  $p \times p$ ,  $\mathbf{R}_i$  –  $m \times m$ ,

$$\mathbf{F}_i^{\mathbf{x}} \equiv \mathbf{F}_i^{\mathbf{x}}(\hat{\mathbf{x}}_{i-1}) = \left[ \frac{\partial \Phi_i(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right]_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{i-1}} \quad - n \times n,$$

$$\mathbf{H}_i^{\mathbf{x}} \equiv \mathbf{H}_i^{\mathbf{x}}(\hat{\mathbf{x}}_{i/i-1}) = \left[ \frac{\partial \mathbf{s}_i(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right]_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{i/i-1}} \quad - m \times n.$$

Минимизируемый критерий

$$J_i = E_{\mathbf{x}_i, \mathbf{Y}_i} (\mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{x}}_i(\mathbf{Y}_i))^T (\mathbf{x}_i - \hat{\mathbf{x}}_i(\mathbf{Y}_i)), \quad \mathbf{Y}_i = (\mathbf{y}_1^T, \mathbf{y}_2^T, \dots, \mathbf{y}_i^T)^T.$$

Прогноз ОФК

$$\hat{\mathbf{x}}_{i/i-1} = \Phi_i(\hat{\mathbf{x}}_{i-1}).$$

Матрица ковариаций ошибок прогноза

$$\mathbf{P}_{i/i-1} = \mathbf{F}_i^{\mathbf{x}} \mathbf{P}_{i-1} (\mathbf{F}_i^{\mathbf{x}})^T + \mathbf{Q}_i.$$

Коэффициент усиления

$$\hat{\mathbf{x}}_i = \hat{\mathbf{x}}_{i/i-1} + \mathbf{K}_i [\mathbf{y}_i - \mathbf{s}_i(\hat{\mathbf{x}}_{i/i-1})].$$

Матрица ковариаций ошибок оценивания

$$\mathbf{P}_i = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{H}_i^{\mathbf{x}}) \mathbf{P}_{i/i-1}.$$

Конкретизируем все вектора, матрицы, функции для нашей задачи.

В качестве оцениваемого вектора состояния выбран следующий:

$$\mathbf{x} = [a_i^N \ a_i^E \ \alpha_i \ \dot{\alpha}_i]^T.$$

Для ускорений  $a_i^N$  и  $a_i^E$  выбрана кинематическая модель с винеровским процессом, а для азимута – кинематическая модель с винеровским процессом для скорости  $\dot{\alpha}_i$  [18–20].

Дискретная модель оцениваемого вектора состояния имеет вид:

$$\begin{bmatrix} x_{1i} = a_i^N \\ x_{2i} = a_i^E \\ x_{3i} = \alpha_i \\ x_{4i} = \dot{\alpha}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{i-1}^N \\ a_{i-1}^E \\ \alpha_{i-1} + \dot{\alpha}_{i-1} \cdot T \\ \dot{\alpha}_{i-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_i^N \\ w_i^E \\ w_{1i}^V \\ w_{2i}^V \end{bmatrix}$$

или

$$\begin{bmatrix} x_{1i} \\ x_{2i} \\ x_{3i} \\ x_{4i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{1(i-1)} \\ x_{2(i-1)} \\ x_{3(i-1)} \\ x_{4(i-1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_i^N \\ w_i^E \\ \left[ \begin{matrix} T^2/2 \\ T \end{matrix} \right] \cdot w_i^V \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{F}_i^{\mathbf{x}} \equiv \mathbf{F}_i^{\mathbf{x}}(\hat{\mathbf{x}}_{i-1}) = \Phi_i.$$

Уравнения измерений

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1(\mathbf{x}) \\ s_2(\mathbf{x}) \\ s_3(\mathbf{x}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_i^{\mathbf{x}} = \left[ \frac{\partial \mathbf{s}_i(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \right]_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}_{i/i-1}} \quad m \times n$$

$$= \begin{bmatrix} \cos x_3 & \sin x_3 & -x_1 \sin x_3 + x_2 \cos x_3 & 0 \\ -\sin x_3 & \cos x_3 & -x_1 \cos x_3 - x_2 \sin x_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Характеристики порождающего шума и шума измерений

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} x_1 & Q^d & 0 & 0 \\ x_2 & 0 & Q^a & 0 \\ x_3 & 0 & 0 & T^4/4 \cdot \sigma_{w_i^V} \\ x_4 & 0 & 0 & T^3/2 \cdot \sigma_{w_i^V} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R^a & 0 & 0 \\ 0 & R^a & 0 \\ 0 & 0 & R^V \end{bmatrix}.$$

#### ПРИМЕР

Ровер

Оценка качества работы модели комплексирования навигационной информации от различных источников и измерителей для выработки точного позиционирования каждого аппарата проводится путем обработки моделируемых и использования реальных данных датчиков, записанных во время испытаний при ухудшении качества сигнала ГНСС в городских условиях.

Наш выбор ровера для исследования был обоснован возможностью его проходить сложные рельефные участки земли. Поэтому мы остановились на ровере модели «Манул» отечественного производителя компании «Прикладная робототехника», имеющего повышенную проходимость с углом наклона до 50°, автономную работу 6-7 часов, наличие лидаров для объезда препятствий. Данный ровер способен двигаться по заданию (т.е. по GPS точкам) с точностью позиционирования 2-3 м, либо же дистанционно управляемый пультом управления.

Определения положения и ориентации ровера с использованием одометрии

Для создания программы управления колесным мобильным роботом необходимо разобраться каким образом движется робот, необходимо понять принципы получения проекций его скоростей в системе координат и определить способ получения одометрии и расчет ее точности.

Существует два вида движения: неголономное (Non-holonomic) и голономное (Holonomic). При неголономном



движении робот может передвигаться только в нескольких ограниченных направлениях, например, только вперед и назад. При голономном движении робот способен свободно двигаться по любому вектору XY, не меняя при этом своей ориентации. Чем больше направлений движения и вращения имеет робот, тем сложнее сконструировать его механику и контролировать его движение.

Одометрия это использование данных с установленных на приводе робота сенсоров и датчиков для расчёта его текущего положения и ориентации в пространстве. С некоторых приводов получить качественную одометрию очень легко, например, с двухколёсного дифференциального привода (2WD differential drive). Для этого достаточно парочки колёсных энкодеров. С других же приводов получить точную одометрию невероятно трудно: например, для шагающей робо-собаки или робота-гуманоида вам понадобятся десятки различных 2D/3D-сенсоров и сложнейший софт [21]

Колесные роботы отличаются своими характеристиками: особенность шасси, рулевой привод. Существует много разновидностей колесных мобильных роботов, но их внешний вид, аппаратное и программное обеспечение определяется практическим назначением.

Дифференциальный привод skid-steer – в этом приводе равновесие платформы достигается не пассивными колёсами, как в двухколёсном варианте, а дополнительными ведущими. На каждой стороне робота может быть четыре, пять, шесть и более колёс, которые управляются общим мотором через передачи и вращаются с одинаковой скоростью. Обычно в этом шасси используются два двигателя (по одному на сторону), но бывают платформы, где каждое колесо управляется собственным мотором. Движение привода skid-steer неголономно (Рис. 2а).

Привод Ackermann steering – самый распространённый в мире, так как используется в каждом автомобиле. Привод Аккермана состоит из двух ведущих и двух рулевых колёс. Ведущая пара колёс отвечает за движение робота, а рулевые колёса отвечают за повороты. Для каждого колеса угол поворота рассчитывается на основе желаемого диапазона углов поворота робота. Рулевой привод Аккермана имеет неголономное движение (Рис. 2б). Этот привод управляется линейной скоростью вдоль оси X и угловой скоростью по оси Z. Но в отличие от дифференциальных приводов, при ненулевой угловой скорости вокруг оси Z линейная скорость по X не может быть равна нулю. Как и автомобиль, робот не сможет развернуться, стоя на месте.

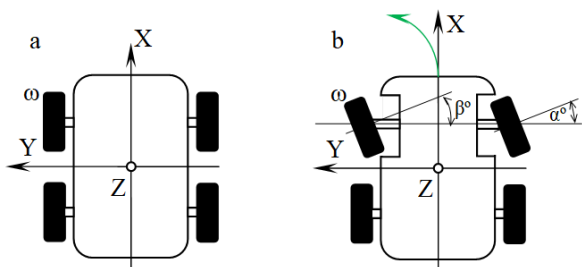


Рис. 2. Сравнение приводов управления колесных роботов: (а) skid-steer; (б) Ackermann steering

Каждое колесо шасси skid-steer нуждается в собственном сенсоре. Точность одометрии в сравнении с двухколёсной платформой заметно ниже. При поворотах робота колёса шасси проскальзывают. При движении такого шасси по ровной местности моменты заноса и скольжения можно определить и исправить программно. Но для получения одометрии при движении платформы skid-steer по пересечённой местности одних только датчиков вращения колёс может быть уже недостаточно.

В настоящее время большое внимание уделяется разработке мобильных машин с высокой приспособляемостью к движению по сложным траекториям и сложным поверхностям. В этих разработках наибольшее внимание исследователей привлекают машины, использующие гибридный способ передвижения – колесно-шагающий (рис. 3). Известно, что основным преимуществом таких аппаратов является сочетание высоких адаптационных возможностей шагающих машин и высокая скорость и устойчивость, а также простота управления, колесных шасси, когда аппарат перемещается по плоской или ровной с малыми неровностями поверхности [22-24].



Рис. 3. Примеры гибридных мобильных роботов

#### Квадрокоптер

Квадрокоптер (рис. 4) оснащен полетным контроллером Matek H743-SLIM V3, который включает в себя следующие компоненты и характеристики: ICM42688-P - основной IMU датчик, ICM42605 - вспомогательный IMU датчик. Эти датчики обеспечивают функции акселерометра и гироскопа, необходимые для стабилизации полета и контроля движения. Оба датчика подключены через интерфейс SPI.



Рис. 4. Квадрокоптер

#### Виртуальный полигон

Для проведения экспериментов с группой беспилотных аппаратов ровера и дрона разработан и смоделирован виртуальный полигон с характеристиками реальных беспилотных наземных и воздушных аппаратов для подкрепления полученных имитационных результатов на физическом полигоне.

В качестве виртуальной среды выбрана для моделирования совместно работающих в группе гетерогенных беспилотных аппаратов Unreal Engine 5.3, Unity (рис. 5). Система поддерживает интеграцию моделей устройств, предназначенных для функционирования в разнообразных средах — от атмосферы до гидросферы и твердой поверхности. Каждому элементу в симуляции может быть задан индивидуализированный набор физических и визуальных характеристик, что позволяет точно воспроизводить их динамику и взаимодействие с окружающей средой (рис. 6, 7).

Выбрана операционная среда ROS (Robot Operating System) и протокол MAVLink для управления и связи группой беспилотных аппаратов в симуляции с использованием кроссплатформенного симулятора AirSim для Unreal Engine и реального эксперимента.



Рис. 5. Виртуальная среда



Рис. 6. Полетная миссия

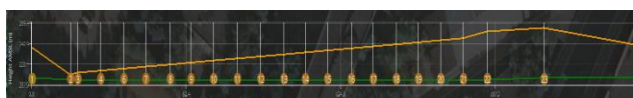


Рис. 7. Изменение высоты при полете

Проведен натурный эксперимент на физическом полигоне для верификации моделей. Миссия по продолжительности 50 метров со скоростью 5 м/с по 23 точкам геолокации. По данным эксперимента получены реальные данные полета с датчиков IMU, GPS и файлы симуляции.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод совместной навигации группы беспилотных аппаратов, находящихся в разных физических средах. Дана постановка и решение задачи для совместной навигации группы беспилотных аппаратов: представлена модель комплексирования навигационной информации от различных источников и измерителей для выработки точного позиционирования каждого аппарата, представлен экономный алгоритм оценивания координат в плоскости и направление движения аппарата для инерциальной навигационной системы с использованием обобщенного фильтра

Калмана. Дан иллюстрирующий пример. Построен виртуальный полигон с рельефом местности для симуляции навигации автономных беспилотных аппаратов, работающих в разных средах. Выбраны модели реальных аппаратов с набором измерительных датчиков для симуляции. Проведены тестовые симуляции навигации беспилотных аппаратов на сцене виртуального полигона по рельефу местности. Проведен натурный эксперимент на физическом полигоне для верификации моделей. Виртуальный полигон может использоваться для создания виртуальных сред, в которых группы беспилотных аппаратов могут быть протестированы на совместимость и эффективность работы в команде без риска для реального оборудования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. ЧАСТЬ 1. Обзор алгоритмов // Гироскопия и навигация, 2015. – №3(90). – С. 102-125. – DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.3.102-125.
2. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. ЧАСТЬ 2. Современные тенденции развития // Гироскопия и навигация, 2015. – № 4(91). – С. 147-159. – DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.4.147-159.
3. Веремеенко К.К. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / К.К. Веремеенко, С.Ю. Желтов, Н.В. Ким, Г.Г. Себряков, М.Н. Красильщиков. – М.: Физматлит, 2009. – 556 с.
4. Amosov O.S. The Concept of Joint Navigation and Communication for a Heterogeneous Group of Autonomous Uncrewed Vehicles Located in Different Environments / O.S. Amosov, S.G. Amosova // Proceedings of the 15th International Conference Management of Large-Scale System Development (MLSD). Moscow: IEEE, 2022.
5. Голован А.А. Задачи интеграции БИНС и одометра с точки зрения механики корректируемых инерциальных навигационных систем. Часть 1. / А.А. Голован, И.В. Никитин // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1. Матем., мех. – 2015. – № 2. – С. 69-72.
6. Голован А.А. Задачи интеграции БИНС и одометра с точки зрения механики корректируемых инерциальных навигационных систем. Часть 2. / А.А. Голован, И.В. Никитин // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 1. Матем. мех. – 2015. – № 4. – С. 68-72.
7. Vavilova N.B. Mathematical foundations of inertial navigation systems / N.B. Vavilova, A.A. Golovan, N. A. Parusnikov. – 2020.
8. Vyazmin V. IMU and GNSS Postprocessing for High-Resolution Strapdown Airborne Gravimetry / V. Vyazmin, A. Golovan // Eng. Proc. – 2023. – DOI: 10.3390/ENC2023-15455
9. Obradovic D. Multimodal Fusion for Car Navigation Systems / D. Obradovic, H. Lenz, M. Schupfner, K. Heesche // Signal Processing Techniques for Knowledge Extraction and Information Fusion, part II. – Springer US, 2008. – P. 141-158.
10. Jacques G. Enhanced MEMS-IMU/odometer/GPS integration using mixture particle filter / Georgy Jacques, Karamat Tashfeen, Iqbal Umar, Noureldin Aboelmagd // GPS Solutions. – 2011. – Vol. 15, Is. 3. – P. 239-252.

11. Ванкерль М. Использование сегментированного навигационного фильтра в задаче позиционирования транспортного средства в городских условиях / М. Ванкерль, Г.Ф. Троммер // Гирскопия и навигация. – 2014. – № 1. – С. 35-49.

12. Land Rover интегрирует систему дронов с внедорожником: InterDrone. – URL: <https://interdrone.com/faa/land-rover-integrates-drone-system-with-suv/> (дата обращения 20.05.2024)

13. Студенты CMU хотят использовать роботов и БПЛА для спасения в шахтах. – URL: <https://robogeek.ru/roboty-spasateli/studenty-cmu-hotyat-ispolzovat-robotov-i-bpla-dlya-spaseniya-v-shahtah> (дата обращения 20.05.2024)

14. Autonomous robot and drone act as mobile surveillance unit: SpringWise. – URL: <https://www.springwise.com/autonomousrobot-drone-act-mobile-surveillance-unit/> (дата обращения 20.05.2024)

15. Gargiulo A.M. Model-Based Slippage Estimation to Enhance Planetary Rover Localization with Wheel Odometry / A.M. Gargiulo, I. di Stefano, A. Genova // Appl. Sci. – 2021. – 11(12). – 5490. – DOI: 10.3390/app11125490.

16. Stepanov O.A. Comparison of Kalman-type Algorithms in Nonlinear Navigation Problems for Autonomous Vehicles / O.A. Stepanov, O.S. Amosov, A.B. Toropov // Proc. of the 6th IFAC Symposium Autonomous Vehicles, Toulouse, France, September 3-5, IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). – 2007. – Vol. 6, Iss. – PART 1. – P. 493-498. – DOI: 10.3182/20070903-3-fr-2921.00084.

17. Basic Principles of Inertial Navigation // Seminar on inertial navigation systems. Tampere University of Technology, 17 April 2018, – URL: <http://atlas.physics.arizona.edu/~kjohns/downloads/inertial/InertialNavigationSystems.pdf> (дата обращения 20.05.2024)

18. Bar-Shalom Y. Estimation with applications to tracking and navigation / Y. Bar-Shalom, X.-Rong Li, Kirubarajan Thiagalangam. – New York: John Wiley & Sons, 2001. – 558 p.

19. Amosov O.S. Trajectory Tracking while Measuring Distance and Bearing with the Use of Fractal Wiener Process for the Motion Model / O.S. Amosov, S.G. Amosova // Proc. of the 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS-2017). Saint Petersburg: IEEE. – 2017.

20. Amosov O.S., Markov sequence filtering on the basis of bayesian and neural network approaches and fuzzy Logic systems in navigation // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2004. – no. 43(4). – P. 551-559.

21. Данилин М. Как сделать робота на ROS своими руками // Амперка, 2021. – URL: <https://amperka.ru/blogs/projects/abot-robot-part-1> (дата обращения 20.05.2024)

22. Павловский В.Е. Исследование динамики и синтез управления колесными аппаратами с избыточной подвижностью / В.Е. Павловский, Д.В. Шишканов // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. – 2006. – 012. – 28 с.

23. Карташев В.А. Модель движения колесного аппарата по неровной поверхности / В.А. Карташев, Т. Цзян // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2023. – № 73. – 14 с.

24. Гаврилов А.Е., Кошман А.М. Гибридный колесно-шагающий движитель // Полезная модель. 2022. № RU 212 121 U1.

DOI: 10.24892/RIJIE/20250107

# Joint Navigation Method for Unmanned Vehicles Group Located in Different Physical Environments

Amosov O.S.

Laboratory of Intellectual Control Systems and Modelling  
V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS  
Moscow, Russian Federation  
[osa18@yandex.ru](mailto:osa18@yandex.ru)

Amosova S.G.

Laboratory of Cyber-Physical Systems  
V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS  
Moscow, Russian Federation  
[amosovasg@yandex.ru](mailto:amosovasg@yandex.ru)

Kulagin K.A.

Department Control Tasks in Digital Cartography  
V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS  
Moscow, Russian Federation  
[kka86@bk.ru](mailto:kka86@bk.ru)

**Abstract.** A method for joint navigation of unmanned vehicles a group located within different physical environments is proposed. The formulation and solution of the problem regarding joint navigation of an unmanned vehicles (UV) group has been provided as follows: a model for integrating navigation information from various sources and meters to develop each device exact positioning has been provided along with an algorithm for estimating coordinates in a plane and directing a device movement

with an inertial navigation system. An illustrative example has been given. A virtual training ground with terrain was proposed to simulate the navigation of autonomous unmanned vehicles (AUVs) operating within different environments.

**Keywords:** unmanned vehicle, inertial navigation, integration, generalized Kalman filter, virtual range.