

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ДЛЯ НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ С ПРОВЕДЕНИЕМ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ОПЫТНОМ ОБРАЗЦЕ¹**Амосов О.С., Вольф Д.А., Амосова С.Г.***Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия
osa18@yandex.ru, runsolar@mail.ru, amosovasg@yandex.ru*

Аннотация. Статья посвящена разработке высокоточного полётного контроллера для беспилотных аппаратов (БА) на базе микроконтроллера MDR32F9Q2I с интеграцией модуля глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) – UM982. Разработка включает адаптацию ресурсоёмких алгоритмов обработки ГНСС-данных под ограничения микроконтроллера (128 КБ Flash, 80 МГц) с использованием арифметики с фиксированной точкой и особенностей системных прерываний микроконтроллера. Предлагается на базе разработанного опытного образца проводить исследования алгоритмов комплексирования для навигации БА. Рассматривается задача уточнения координат инерциальной навигационной системы по данным ГНСС. Реализованная аппаратно-программная платформа открывает перспективы для ее переноса на разнородные БА.

Ключевые слова: инерциальная навигационная система, глобальная навигационная спутниковая система, комплексирование, микроконтроллер, беспилотный аппарат.

Введение

При навигации группы беспилотных аппаратов (БА) можно выделить основные задачи: избегание столкновений, координация, планирование маршрута, синхронизация движений, обработка данных от сенсоров, адаптация и обучение. Для решения данных задач разработаны различные методы и алгоритмы, например, алгоритм «потенциальных полей», при котором роботы движутся по полю, где цели притягивают, а препятствия отталкивают [1]; алгоритм на основе правил для изменения траектории при обнаружении препятствий [2]; централизованное управление, при котором один робот или сервер координирует движение всей группы; децентрализованное управление, когда каждый робот принимает решения на основе локальной информации и обмена данными; алгоритмы поиска пути [3]; методы роевого интеллекта, основанные на принципах поведения роя, такие как алгоритмы на основе муравьиных колоний [4]; алгоритмы, такие как консенсусные, для синхронизации действий группы [5]; фильтры калмановского типа для оценки состояния и предсказания движения [6]; алгоритмы комплексирования данных от разных сенсоров для улучшения точности навигации [7, 8]; методы на основе искусственного интеллекта для адаптации к изменяющимся условиям и обучения на основе взаимодействия с окружающей средой [9, 10].

Но для того, чтобы проверить разработанные алгоритмы при работе беспилотного аппарата или группы аппаратов, необходима унифицированная аппаратно-программная платформа, которую можно устанавливать на борт каждого БА. Поэтому данная статья посвящена разработке высокоточного полётного контроллера для беспилотных аппаратов на базе микроконтроллера MDR32F9Q2I (Milandr) с интеграцией модуля глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) – UM982. Предлагается на базе разработанного опытного образца полетного контроллера проводить исследования алгоритмов комплексирования для навигации беспилотных аппаратов.

В статье рассмотрены компоненты архитектуры, их взаимодействие, а также практические аспекты интеграции передовых решений, таких как UM982. Представленные решения демонстрируют, что даже в условиях ограниченных ресурсов микроконтроллеров можно достичь времени отклика до 2–4 мс и приемлемой точности позиционирования.

Впервые проведена интеграция высокоточного ГНСС-модуля UM982 в полётный контроллер на базе микроконтроллера MDR32F9Q2I, что позволило достичь уникального сочетания низкой

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00671, <https://rscf.ru/project/24-29-00671/>

стоимости и высокой точности позиционирования. Данное решение соответствует аналогам (например, Pixhawk на STM32F7) по соотношению цена/точность, сохраняя время отклика ≤ 4 мс. Результаты подтверждены тестами в городских условиях.

1. Постановка задачи

Для тестирования алгоритмов комплексирования данных инерциальной навигационной системы (ИНС) и ГНСС необходимо разработать опытный образец, удовлетворяющий следующим требованиям: вычислительная мощность должна быть достаточная для реализации алгоритмов калмановского типа, поддержка аппаратных вычислений с плавающей и фиксированной точкой, интерфейсы для подключения инерциального измерительного блока (IMU – Inertial Measurement Unit), ГНСС и дополнительных датчиков (магнитометр, барометр), частота опроса датчиков для ИНС ≥ 100 Гц, ГНСС от 5 до 10 Гц, оснащение средствами связи для обмена внутри группы БА.

Пусть имеются исходные данные по БА в момент времени t :

- геодезические координаты B широта (рад), L долгота (рад), H высота над эллипсоидом (м);
- измерения ИНС от акселерометра и гироскопа.

Необходимо произвести перевод геодезических координат (B, L, H) в координаты (X, Y, Z) системы ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed) и по ним скорректировать накопленную ошибку ИНС.

Совместная работа ИНС и ГНСС позволит повысить точность позиционирования и возможность в дальнейшем отработки сценариев с группой разнородных БА.

2. Описание экспериментального опытного образца

В Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН завершена разработка экспериментального опытного образца полётного контроллера (ведущий разработчик Вольф Д.А.), сочетающего передовые технологии и отечественные компоненты. Комплекс, созданный в рамках научно-исследовательского проекта, объединяет аппаратную платформу и набор датчиков для точного позиционирования объектов в пространстве.

Основой разработки стала отладочная плата LDM-BB-K1986BE92Q1 с 32-битным RISC-микроконтроллером MDR32F9Q21 производства АО «ПКК Миландр» (Рис. 1). Устройство на базе ядра ARM Cortex-M3, выполненное в корпусе LQFP64, обеспечивает обработку данных и координацию всех подсистем.

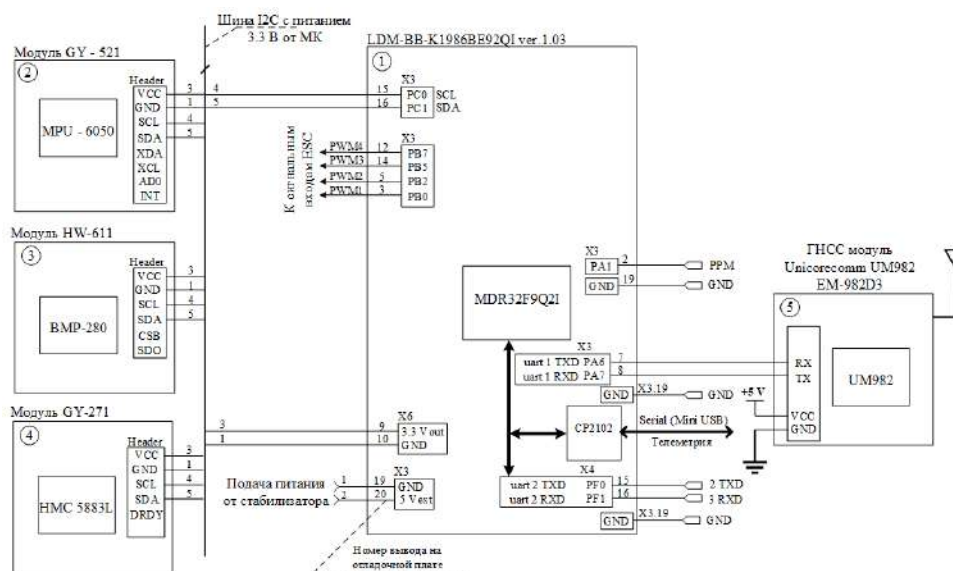


Рис. 1. Схема соединения отдельных модулей полетного контроллера на базе микроконтроллера MDR32F9Q21

Платформа включает следующие составляющие (Рис. 1):

1. Инерциальный измерительный блок реализован на модуле GY-521 с микросхемой MPU-6050. Этот блок объединяет трехосевые гироскоп и акселерометр, фиксируя изменения угловых скоростей и линейных ускорений. Точность IMU позволяет системе в реальном времени определять пространственную ориентацию объекта. Данные с датчика MPU6050 снимаются с частотой

250–500 Гц через протокол I2C, преобразуются в единицы измерения (m/c^2 , рад/с) и передаются в ядро системы.

2. Для измерения высоты используется модуль HW-611 с датчиком BMP280. Этот прецизионный инструмент анализирует атмосферное давление, обеспечивая надёжное определение высотного положения в условиях перепадов температуры и влажности.

3. Компенсацию погрешностей инерциальной системы выполняет магнитометр GY-271 на микросхеме HMC5883L.

4. Для высокоточной навигации в систему интегрирован модуль UM982 от компании Unicore. Модуль UM982 – это высокоточное решение для навигации, которое значительно расширяет возможности полётного контроллера БА. Его интеграция в существующую архитектуру требовала учёта технических особенностей модуля и адаптации программно-аппаратных интерфейсов. Интеграция UM982 в платформу MDR32F9Q2I потребовала настройки UART для приёма данных с частотой 10 – 20 Гц без перегрузки микроконтроллера.

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) требуют высокоточной навигации, стабильного управления и адаптивности к динамично меняющимся условиям окружающей среды. Основой для выполнения этих задач служит полётный контроллер, архитектура которого объединяет три ключевые системы: сенсорную, вычислительно-управляющую и эффекторную. Их слаженное взаимодействие обеспечивает не только стабилизацию и управление полётом, но и решение сложных задач – от автономной навигации до точного позиционирования в режиме реального времени.

Сенсорная система формирует цифровую модель пространства, используя данные инерциальных датчиков (акселерометры, гироскопы), магнитометров, барометрических сенсоров и модулей ГНСС. Интеграция ГНСС-модуля UM982 с поддержкой RTK-коррекции и двухантенной конфигурации значительно повышает надёжность навигации. Вычислительно-управляющая система обрабатывает данные с частотой до 500 Гц, применяя алгоритмы ПИД-регуляторов и фильтр Калмана, а эффекторная система преобразует управляющие сигналы в физические действия через двигатели и сервоприводы.

Таким образом, взаимодействие между эффекторной, сенсорной и вычислительно-управляющей системами осуществляется через обмен данными и управляющими сигналами. Эффекторная система получает команды от вычислительно-управляющей системы и выполняет соответствующие действия. Сенсорная система собирает данные о состоянии БПЛА и его окружении и передаёт их в вычислительно-управляющую систему для анализа и обработки. Вычислительно-управляющая система анализирует полученные данные, принимает решения и формирует управляющие сигналы для эффекторной системы.

Разработанная система демонстрирует параметры, сопоставимые с известными платформами (Ardupilot, Pixhawk):

- время реакции – 2–4 мс;
- точность стабилизации за счёт отдельных ПИД-регуляторов для каждой оси;
- поддержка стандартов связи (I2C, UART, oneshot125).

Таким образом, разработка демонстрирует успешную интеграцию отечественных микроконтроллеров с современными сенсорами. Система может найти применение в разнородных БА, работающих в разных физических средах, например, в беспилотной авиации и робототехнике (Рис. 2).

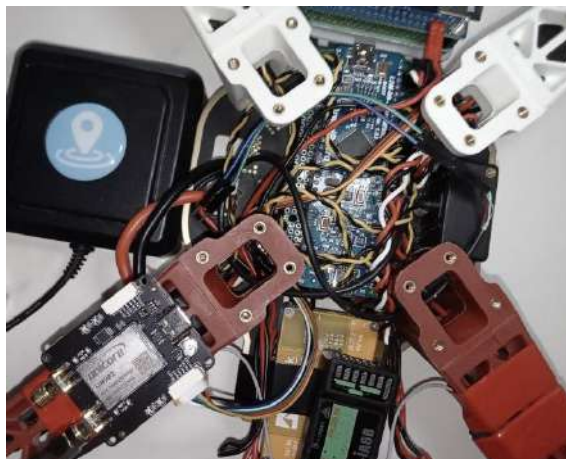


Рис. 2. Опытный образец полетного контроллера на микросхеме MDR32F9Q2I с подключенным модулем ГНСС Unicore UM982, ресивером FS-IA6B FLYSKY в режиме PPM на раме F450

3. Комплексование инерциальной и спутниковой системы

3.1. Преобразование координат, вычисленных по результатам спутниковых измерений, в местную (локальную) систему координат

В настоящее время в полной мере используются две спутниковые системы определения координат: российская система ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система) и американская система NAVSTAR GPS (NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System – навигационная система определения расстояний и времени, глобальная система позиционирования). В данном случае под словом «позиционирование» подразумевается определение положения объекта в пространстве и во времени [11].

Двумерная система координат характеризует плановое положение объекта: геодезическая широта B (Latitude) и геодезическая долгота L (Longitude). Третья координата H – геодезическая высота (Altitude) отсчитывается от поверхности эллипсоида WGS84 (World Geodetic System 1984) – по нормали к эллипсоиду или от поверхности сложной формы – квазигеоида (для нормальных высот). Эллипсоид WGS84 (с параметрами AWGS84, E2WGS84) задает форму Земли, относительно которой вычисляются координаты.

Используя эллипсоидальные координаты B и L пунктов государственной геодезической сети и геодезическую высоту H , вычисляют координаты этих пунктов в декартовой системе координат X , Y , Z в системе ECEF по формулам:

$$X = (N + H) \cdot \cos B \cdot \cos L; \quad (1)$$

$$Y = (N + H) \cdot \cos B \cdot \sin L; \quad (2)$$

$$Z = (N + H) \cdot \sin B - e^2 \cdot N \cdot \sin B, \quad (3)$$

где N – радиус кривизны первого вертикала, который равен: $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2 B}}$, a – это (AWGS84 = 6378137,0) большая полуось эллипсоида в метрах, она определяет радиус Земли по экватору; $e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$ – это (E2WGS84 = 0,0066943799901413) квадрат первого эксцентриситета эллипсоида [11].

Декартовы координаты (X, Y, Z) , полученные при пересчете из географических координат, измеряются в метрах относительно центра Земли. Это означает, что точка $(0, 0, 0)$ в декартовой системе координат находится в центре Земли.

3.2. Пример фильтрации при комплексовании показаний ГНСС и ИНС на основе инвариантной схемы

Рассматривается задача уточнения координат ИНС по данным ГНСС [12], когда спутниковые данные могут пропадать [13]. Здесь можно говорить о возможных адаптивных свойствах получающихся алгоритмов [14]. Простейшим примером может служить задача комплексной обработки для уточнения высоты БА с использованием измерений от СНС [12].

Следуя [12] предположим, что имеются измерения

$$y_i^I = h_i + \Delta y_i^I, \quad y_i^II = h_i + \Delta y_i^II,$$

где $h_i, y_i^I, y_i^II, \Delta y_i^I, \Delta y_i^II$ – скалярные последовательности, описывающие поведение истинных значений координаты, показаний ИНС (I=ИНС), спутниковой системы (II=ГНСС) и их ошибок. Будем считать, что ошибки ИНС $\Delta y_i^I = \varepsilon_i^I + v_i^I$ определяются суммой дрейфа, описываемого винеровским процессом, постоянной и белым шумом составляющих, т.е.

$$\Delta h_i = \Delta h_{i-1} + \sigma_w^{\Delta h} w_i, \quad \Delta h_0 = d_i = d_{i-1} = d, \quad \varepsilon_i = d_i + \Delta h_i + v_i^I,$$

где Δh_i – дрейф координаты h_i ; $\sigma_w^{\Delta h}$ – коэффициент, определяющий СКО порождающего шума дрейфа; d – постоянная составляющая погрешности, v_i^I – белый шум измерений. Ошибки ГНСС содержат только белую шумовую составляющую $\Delta y_i^II = v_i^II$.

Ставится задача нахождения оценки дрейфа Δh_i координаты h_i на фоне белого шума. Следуя инвариантной схеме [12], искомую оценку можем сформировать в виде

$$\tilde{h}_i = y_i^I - \tilde{\varepsilon}_i^I, \quad \tilde{\varepsilon}_i^I = H_i^I \Delta \tilde{h}_i,$$

которую отыскиваем с помощью линейного фильтра Калмана.

Исследования проведены при следующих параметрах: интервал дискретизации $T = t_i - t_{i-1} = 0,004$ с; начальная координата $h_0 = 0$ м; начальная скорость БА $V_0^h = 0,15$ м/с; постоянная составляющая ошибки ИНС неизвестна, считаем, что ее математическое ожидание $m_h = 0$ и среднее квадратическое отклонение (СКО) $\sigma^d = 1$ м; коэффициент, определяющий СКО порождающего шума дрейфа $\sigma_w^h = 0,5$ м; СКО дискретного белого шума (д.б.ш.) измерений ИНС $\sigma_v^I = 1$ м; СКО д.б.ш. измерений СНС $\sigma_v^H = 0,5$ м. Пример реализации измерений и результаты решения алгоритма оценивания приведены на рис. 3.

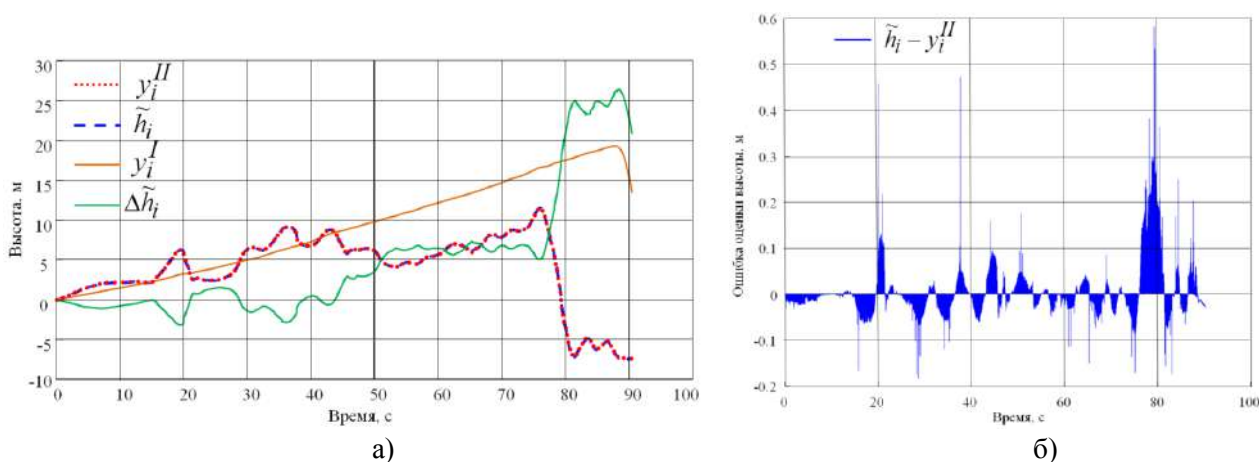


Рис. 3. Результаты эксперимента: а) измерения и оценки; б) ошибки фильтрации

Результаты эксперимента показали, что погрешность определения высоты не превышает 0,6 м.

4. Заключение

Интеграция высокоточного ГНСС-модуля UM982 в полётный контроллер на базе микроконтроллера MDR32F9Q2I демонстрирует прорыв в разработке бюджетных БА, сочетая приемлемую точность позиционирования с энергоэффективностью и низкой себестоимостью. Оригинальность работы заключается в первом успешном применении UM982 в системе с ограниченными ресурсами (128 КБ Flash, 80 МГц), где были решены ключевые задачи:

- аппаратно-программная оптимизация – использование системных прерываний для обработки RTCM-коррекций, fixed-point арифметики для фильтра Калмана и режимов энергосбережения микроконтроллера;
- комплексирование показаний ГНСС и ИНС на основе инвариантной схемы с обеспечением точности определения высоты порядка 0,5 м.

Практическая значимость работы подтверждена тестами в реальных условиях городской среды.

Литература

1. Filimonov A.B., Filimonov N.B. Constructive Aspects of the Method of Potential Fields in Mobile Robotics // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2021. – Vol. 57, № 4. – P. 371–377. – DOI: 10.15372/AUT20210406.
2. Галяев А.А., Маслов Е.П. Уклонение в конфликтной среде от обнаружения системой разнородных наблюдателей // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 4. – С. 18–27.
3. Karur K., Sharma N., Dharmatti Ch., Siegel J.E. Survey of Path Planning Algorithms for Mobile Robots // Vehicles. – 2021. – Vol. 3, № 3. – P. 448–468. – DOI: 10.3390/vehicles3030027.
4. Ajeil F.H., Ibraheem I.K., Azar A.T., Humaidi A.J. GridBased Mobile Robot Path Planning Using Aging-Based Ant Colony Optimization Algorithm in Static and Dynamic Environments // Sensors. – 2020. – Vol. 20, № 7. – Art. no. 1880. – DOI: 10.3390/s20071880.

5. *Chen Q., Zhao Q., Zou Z.* Threat-Oriented Collaborative Path Planning of Unmanned Reconnaissance Mission for the Target Group // *Aerospace*. – 2022. – Vol. 9, № 577. – P. 1–23. – DOI: 10.3390/aerospace9100577.
6. *Верба В.С., Домциков А.В., Замуруев С.Н., Потапов Д.А.* Анализ способов решения локальных навигационных задач при применении группового БПЛА // *Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: сб. тр.* – Москва, 2023. – С. 281–289.
7. *Амосов О.С., Амосова С.Г.* Концепция совместной навигации и связи гетерогенной группы автономных беспилотных аппаратов, находящихся в разных средах // *Пятнадцатая международная конференция “Управление развитием крупномасштабных систем” (MLSD'2022): сборник тр.* Москва: ИПУ РАН, 2022. – С. 865–873.
8. *Амосов О.С., Амосова С.Г.* Особенности алгоритмов навигации для разных типов беспилотных аппаратов // *Семнадцатая международная конференция “Управление развитием крупномасштабных систем” (MLSD'2024): сборник тр.* Москва: ИПУ РАН, 2024. – С. 727–733.
9. *Wen J., Liu Sh., Lin Y.* Dynamic Navigation and Area Assignment of Multiple USVs Based on Multi-Agent Deep Reinforcement Learning // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, № 18. – Art. no. 6942. – DOI: 10.3390/s22186942.
10. *Амосов О.С., Амосова С.Г.* Машинное обучение с подкреплением для задач оптимального и адаптивного оценивания в навигационных приложениях // *XXIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сборник материалов: – Санкт-Петербург, 2022. – С. 300–303.*
11. *Ознамец В.В., Кравчук И.М.* Спутниковые системы и технологии позиционирования: учебно-методическое пособие. М.: МИИГАиК, 2020. – 56 с.
12. *Степанов О.А.* Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 1. Введение в теорию оценивания. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2017.
13. *Амосов О.С., Амосова С.Г.* Адаптивный метод оценивания и навигации беспилотных аппаратов с использованием интеллектуальных технологий // *XXXII Санкт-Петербургская межд. конференция по интегрированным навигационным системам: сборник материалов: – Санкт-Петербург, 2025.*
14. *Степанов О.А., Амосов О.С.* Применение нейронных сетей в нелинейных задачах обработки навигационной информации // *XIII Санкт-Петербургская межд. конференция по интегрированным навигационным системам: сборник материалов: – Санкт-Петербург, 2006. – С. 178–182.*