

МРНТИ 47.49.31

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2024.v91.i4.a11>

Б.А. Карибаев^{1,2*} , **Н. Мейрамбекулы¹** , **Н.Ш. Узбеков²** 

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

²Алматинский университет энергетики и связи им. Г.Даукеева, г. Алматы, Казахстан

*e-mail: beibitkaribaev7@gmail.com

АРХИТЕКТУРНАЯ И СХЕМОТЕХНИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГНСС+ИНС НАВИГАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА

Работа посвящена созданию макетного образца навигационного модуля, предназначенного для научной ракеты гражданского назначения. Исследование охватывает процесс проектирования, начиная от выбора аппаратных компонентов и заканчивая разработкой электрических схем и модульной архитектуры устройства. В основе проекта лежит интеграция глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) и инерциальной навигационной системы (ИНС), что позволяет достигать высокой точности в определении координат и параметров движения ракеты в реальном времени. Архитектура модуля базируется на использовании микроконтроллера STM32F777VI, обеспечивающего обработку данных, управление периферийными устройствами и интеграцию с ГНСС-модулем UM980 и инерциальным датчиком LSM6DSV32X. Система дополнена радиомодулем E22-400T33S для передачи телеметрии, светодиодной индикацией и интерфейсами связи, такими как UART и SPI. Для стабильной работы обеспечено использование понижающих преобразователей питания, кварцевого генератора и защитных элементов от электростатических разрядов. Разработанный макет позволяет изучать функциональность системы, тестировать инновационные подходы в ракетостроении и проводить научные эксперименты на высотах до 50 км. Представленная работа является основой для дальнейших этапов — калибровки, полевых испытаний и адаптации под конкретные условия эксплуатации.

Ключевые слова: ГНСС, ИНС, макетный образец, архитектурная модель, схема подключения.

Б.А. Кәрібаев^{1,2*}, Н. Мейрамбекұлы¹, Н.Ш. Узбеков²

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

²Ғ. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

*e-mail: beibitkaribaev7@gmail.com

GNSS+INS навигациялық құрылғысының архитектуралық және сұлбалық моделі

Жұмыс азаматтық мақсаттағы ғылыми зымыранға арналған навигациялық модульдің макеттік үлгісін жасауға бағытталған. Зерттеу жобалау процесінің барлық кезеңдерін қамтиды: аппараттық құрамдас бөліктерді таңдаудан бастап құрылғының электр схемалары мен модульдік архитектурасын әзірлеуге дейін. Жоба ғаламдық навигациялық спутниктік жүйені (GNSS) және инерциялық навигациялық жүйені (INS) біріктіруге негізделген, бұл нақты уақытта зымыран қозғалысының координаттары мен параметрлерін жоғары дәлдікпен анықтауға мүмкіндік береді. Модульдің архитектурасы STM32F777VI микроконтроллерін пайдалануға негізделген, ол деректерді өңдеуді, перифериялық құрылғыларды басқаруды, сондай-ақ UM980 GNSS модулімен және LSM6DSV32X инерциялық сенсорымен интеграцияны қамтамасыз етеді. Жүйе телеметрияны таратуға, жарықдиодты индикацияға және UART пен SPI сияқты байланыс интерфейстеріне арналған E22-400T33S радиомодулімен жабдықталған. Тұрақты жұмыс істеу үшін төмендетуші қуат түрлендіргіштері, кварц осцилляторы және электростатикалық разрядтардан қорғайтын элементтер қолданылған. Әзірленген прототип жүйенің функционалдығын зерттеуге, зымырантану саласындағы инновациялық тәсілдерді сынауға және 50 км-ге дейінгі биіктікте ғылыми тәжірибелер жүргізуға мүмкіндік береді. Ұсынылған жұмыс келесі кезеңдерге – калибрлеуге, далалық сынақтарға және нақты жұмыс жағдайларына бейімделуге негіз болады.

Түйін сөздер: GNSS, INS, макеттік үлгі, архитектуралық үлгісі, қосылу сұлбасы.

B.A. Karibayev^{1,2*}, N. Meirambekuly¹, N.Sh. Uzbekov²

¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

²G. Daukeev Energy University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: beibitkaribaev7@gmail.com

Architectural and circuit model of GNSS+INS navigation device

The work is devoted to the creation of a prototype of a navigation module intended for a civil scientific rocket. The study covers the design process, from the selection of hardware components to the development of electrical circuits and modular architecture of the device. The project is based on the integration of the global navigation satellite system (GNSS) and the inertial navigation system (INS), which allows achieving high accuracy in determining the coordinates and parameters of the rocket's motion in real time. The module architecture is based on the use of the STM32F777VI microcontroller, which provides data processing, control of peripheral devices and integration with the UM980 GNSS module and the LSM6DSV32X inertial sensor. The system is supplemented with an E22-400T33S radio module for telemetry transmission, LED indication and communication interfaces such as UART and SPI. For stable operation, the use of step-down power converters, a quartz generator and protective elements against electrostatic discharges are provided. The developed model allows studying the functionality of the system, testing innovative approaches in rocket engineering and conducting scientific experiments at altitudes of up to 50 km. The presented work is the basis for further stages – calibration, field testing and adaptation to specific operating conditions.

Keywords: GNSS, INS, prototype, architectural model, connection diagram.

Введение

Современное развитие технологий в области ракетостроения и спутниковой навигации открывает широкие возможности для создания компактных и эффективных ракет гражданского назначения [1-3]. Такие ракеты, использующиеся для научных и образовательных целей, занимают важное место в исследованиях верхних слоев атмосферы, тестировании новых технологий, а также в обучении будущих инженеров и специалистов. Особый интерес представляют ракеты, оснащенные интегрированными навигационными системами, которые обеспечивают высокую точность измерений и управление полетом в условиях реального времени [4,5].

Одной из ключевых задач при проектировании таких ракет является разработка навигационных модулей, сочетающих в себе технологии глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) и инерциальной навигационной системы (ИНС) [6]. Эти модули позволяют не только определять точные координаты и параметры движения ракеты, но и служат основой для проведения научных экспериментов, связанных с измерением атмосферных условий, проверкой работоспособности телеметрических систем и тестированием экспериментальных технологий.

Научные ракеты гражданского назначения обладают характеристиками, которые делают их важными объектами для исследований [7,8]. Они

отличаются компактными размерами и легким весом, что обеспечивает их мобильность и доступность для запуска из специализированных площадок. Модульная конструкция таких ракет позволяет оснащать их специализированными отсеками для размещения научных приборов, систем телеметрии и полезной нагрузки. Интеграция высокоточных навигационных систем, основанных на технологиях ГНСС и ИНС, обеспечивает минимальные погрешности при отслеживании траектории полета.

В данной статье рассматриваются этапы проектирования макетного образца навигационного модуля для научной ракеты, а также его архитектура и схема расположения основных компонентов. Особое внимание удалено результатам схемотехнического проектирования, включая выбор компонентов, их интеграцию и разработку функциональной структуры системы.

Материалы и методы

Блок-схема навигационного модуля

На блок-схеме, представленной на рисунке 1, показана архитектура разрабатываемого макетного образца навигационного модуля, предназначенного для научных ракет гражданского назначения. Данная схема иллюстрирует взаимодействие ключевых компонентов системы, их функциональное назначение и способы подключения.

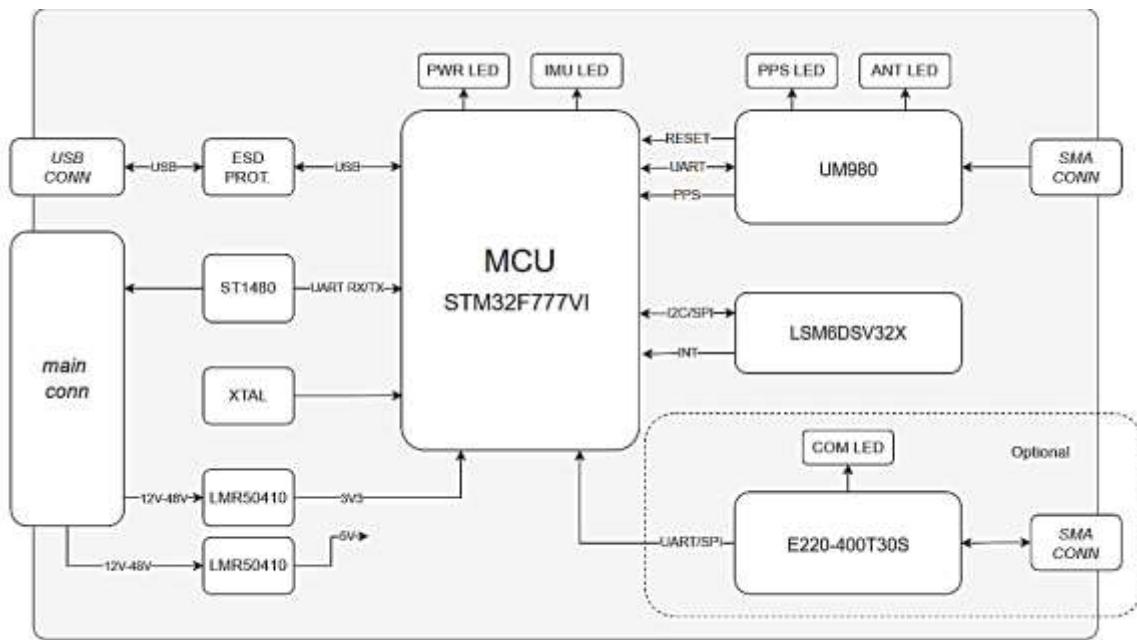


Рисунок 1 – Блок-схема навигационного модуля

Центральным элементом модуля является микроконтроллер STM32F777VI [9], который выполняет функции обработки данных от ГНСС-модуля UM980 и инерциального модуля LSM6DSV32X, управления периферийными устройствами и интерфейсами, а также обеспечения передачи данных через основные и вспомогательные коммуникационные каналы. Микроконтроллер поддерживает интерфейсы UART для обмена данными с модулями UM980 и опциональным передатчиком E220-400T30S, I2C/SPI для связи с инерциальным датчиком LSM6DSV32X и PPS (Pulse Per Second) для синхронизации с ГНСС.

ГНСС-модуль UM980 является основным источником данных о местоположении и времени. Он подключен к микроконтроллеру через интерфейсы UART и PPS, а среди дополнительных особенностей предусмотрено использование SMA-коннектора для подключения внешней антенны и наличие светодиодных индикаторов (PPS LED, ANT LED) для отображения статуса работы.

Инерциальный модуль LSM6DSV32X обеспечивает измерение параметров угловой скорости и линейного ускорения. Связь с MCU осуществляется через интерфейс I2C/SPI.

Модуль E220-400T30S предназначен для передачи данных телеметрии и управления по радиоканалу. Его использование предусмотрено как дополнительная возможность. Связь с MCU осуществляется через интерфейс UART/SPI, подключение антенны осуществляется через

SMA-коннектор. Индикация состояния работы обеспечивается светодиодом COM LED. Модуль поддерживает питание в диапазоне напряжений 12–48 В, которое поступает через разъем Main Conn. Для обеспечения питания компонентов используются понижающие преобразователи: LMR50410 (3.3 В) – питает микроконтроллер и цифровые компоненты, LMR50410 (5 В) – обеспечивает питание вспомогательных модулей.

Система ввода-вывода навигационного модуля обеспечивает подключение к внешним устройствам и передачу данных через несколько интерфейсов. USB-разъем используется для соединения модуля с компьютером или другими устройствами и защищен схемой ESD Protection, предотвращающей повреждения от электростатических разрядов. Основной разъем Main Conn служит для подачи питания и организации обмена данными. Для подключения антенн ГНСС и опционального радиомодуля предусмотрены SMA-разъемы, обеспечивающие надежное соединение и минимизацию потерь сигнала.

Система навигационного модуля оснащена светодиодными индикаторами, обеспечивающими визуальный контроль за его состоянием. Индикаторы отображают подачу питания, состояние инерциального модуля, синхронизацию ГНСС, статус антенны [10, 11] и работу опционального радиомодуля. Для обеспечения стабильной работы микроконтроллера используется кварцевый генератор, который гарантирует точную обработку данных и синхронизацию всех компонентов системы.

Результаты и обсуждение

Схемотехническая модель компонентов и модуль макетного образца

Схемотехнические модели компонентов и их подключения разработаны в программной среде Altium Designer. На рисунке 2 представлена структура навигационного модуля с электрической принципиальной схемой, включающей интеграцию ГНСС-приемника с периферийными устройствами и системами питания. Базовым элементом схемы является модуль UM980, отвечающий за обработку навигационных данных и взаимодействующий с системой через интерфейсы UART и SPI, а также линии управления, такие как PPS для синхронизации, EVENT и RESET. Основное питание модуля осуществляется через выводы VCC (+3.3 В), а резервное питание поддерживается линией VBAT для сохранения данных о спутниках при отключении основного

источника. Для фильтрации сигналов и защиты от электростатических разрядов используются элементы, такие как катушка индуктивности, конденсаторы и диод PESD0402. Система поддерживает подключение внутренней или внешней антенны через интерфейсы ANT_IN и EX_ANT, а линия ADET обеспечивает детектирование наличия антенны, предотвращая возможные неисправности. Линии управления, включая GPS_RESET для сброса и 1PPS для синхронизации с внешними устройствами, дополнены светодиодной индикацией, что позволяет визуально отслеживать состояние сигналов PPS и ADET. Также в схему интегрирован дополнительный модуль GPS (A3), обеспечивающий дублирование функций и поддержку внешних антенн, с подключением к резервному питанию. Для стабильной работы линий управления и фильтрации сигналов задействованы резисторы, транзисторы и конденсаторы, что гарантирует надежность работы системы.

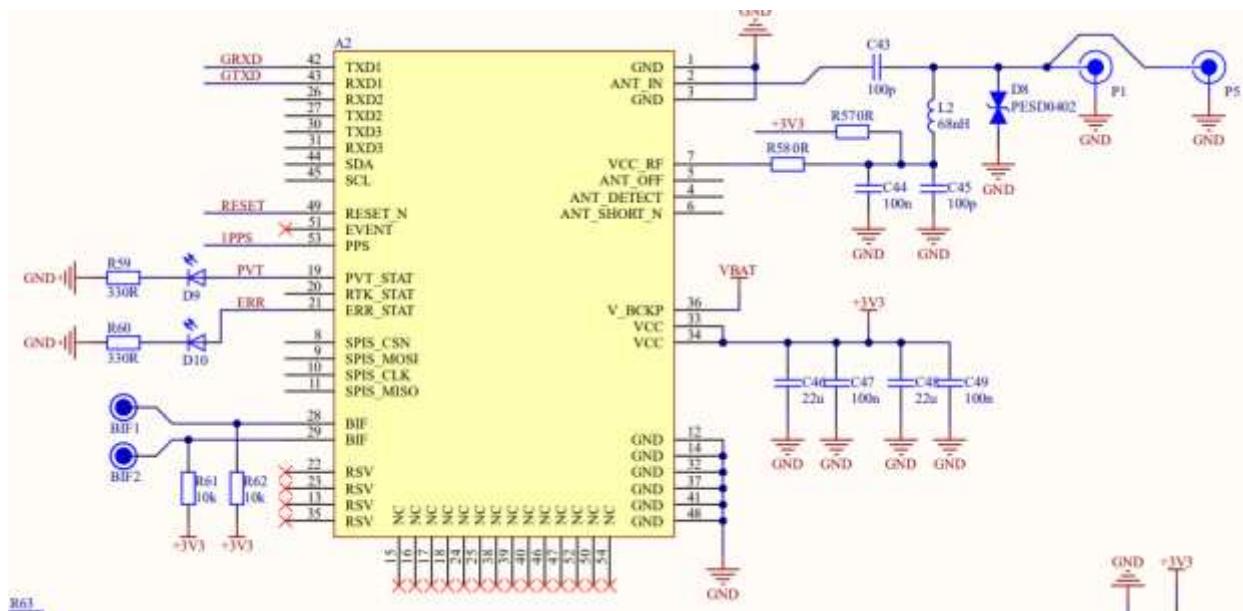


Рисунок 2 – Схема подключения ГНСС модуля

На рисунке 3 представлена электрическая принципиальная схема подключения инерциального датчика (акселерометра) ADXL372BCCZ-RL7 к микроконтроллеру через интерфейсы I2C и SPI, а также интеграция вспомогательных компонентов. Основным элементом схемы является акселерометр (U3), который измеряет ускорения по трем осям и взаимодействует с микроконтроллером через интерфейсы I2C или SPI, что позволяет адаптировать подключение в зависимости от требований системы. Для связи по I2C используются линии SDA и SCL с

резисторами подтяжки для стабилизации сигналов, а для SPI задействованы линии CS, SDI, SDO и SCK с резисторами для ограничения тока и повышения надежности передачи данных. Питание акселерометра осуществляется от линии +3.3 В, стабилизированной конденсаторами для подавления высокочастотных помех. Линии прерываний INT1 и INT2 обеспечивают передачу сигналов микроконтроллеру, позволяя акселерометру информировать о значительных изменениях ускорений или других событиях в реальном времени.

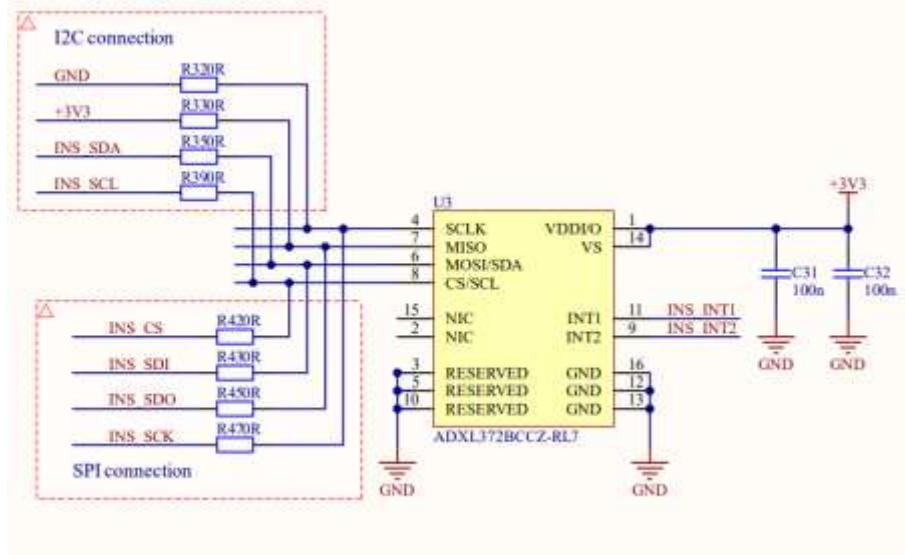


Рисунок 3 – Схема подключения ИНС модуля

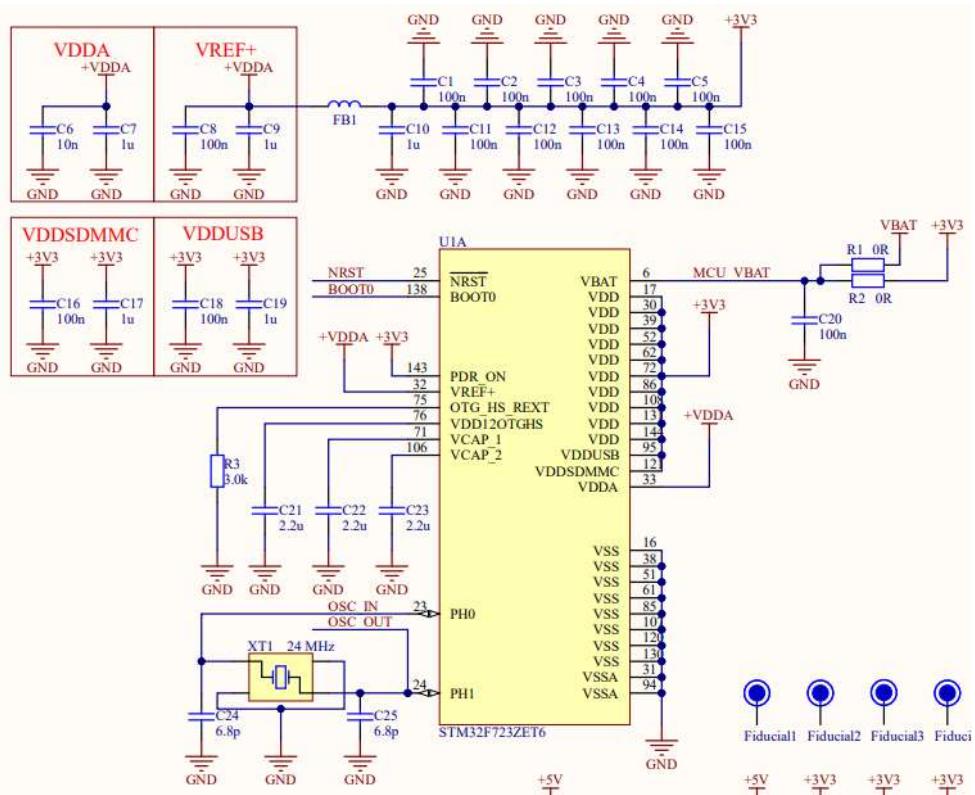


Рисунок 4 – Схема подключения микроконтроллера

На рисунке 4 представлена схема подключения микроконтроллера STM32F723ZET6, обеспечивающего управление всеми процессами системы. Питание микроконтроллера осуществляется через основные линии VDD с напряжением +3.3 В, дополненные конденсаторами для фильтрации и устранения шумов, а резервное питание подключается через линию VBAT, что поддерживает работу при отключении основного источника энергии. Для аналоговых цепей используется линия VDDA,

стабилизированная фильтрующими элементами, а линия VREF+ задает опорное напряжение для аналоговых операций. Тактовая частота микроконтроллера задается внешним квадровым генератором на 24 МГц, подключенным через конденсаторы для обеспечения стабильной работы осциллятора. Линия NRST обеспечивает функцию сброса микроконтроллера, а контакт BOOT0 позволяет конфигурировать режимы загрузки. Для стабилизации внутренних напряжений используются конденсаторы на

линиях VCAP1 и VCAP2. Система фильтрации, включающая дроссели и конденсаторы, минимизирует помехи и гарантирует стабильное питание всех цепей микроконтроллера. Представленная схема обеспечивает надежную работу и точное управление системой, что делает ее базовой частью встроенных приложений, требующих высокой стабильности и производительности.

На рисунке 5 представлена схема подключения радиомодуля E22-400T33S, обеспечивающего беспроводную передачу данных с максимальной мощностью излучения +33 dBm. Модуль взаимодействует с периферийными цепями через линии управления и обмена данными, такие как M0 и M1 для переключения

режимов работы, AUX для контроля состояния модуля, а также RXD и TXD для передачи и приема данных по UART. Подключение к антенне осуществляется через разъем ANT, соединенный с фильтрующим элементом RF50 для минимизации помех. Линии передачи и приема данных дополнены светодиодами с резисторами, что позволяет визуально отслеживать активность UART-интерфейса. Для повышения надежности работы использованы резисторы в линиях управления и передачи данных, обеспечивающие фильтрацию сигналов и снижение помех. Питание радиомодуля осуществляется от стабильной линии +3.3 В, а заземление через разъем P4 предотвращает возникновение паразитных сигналов.

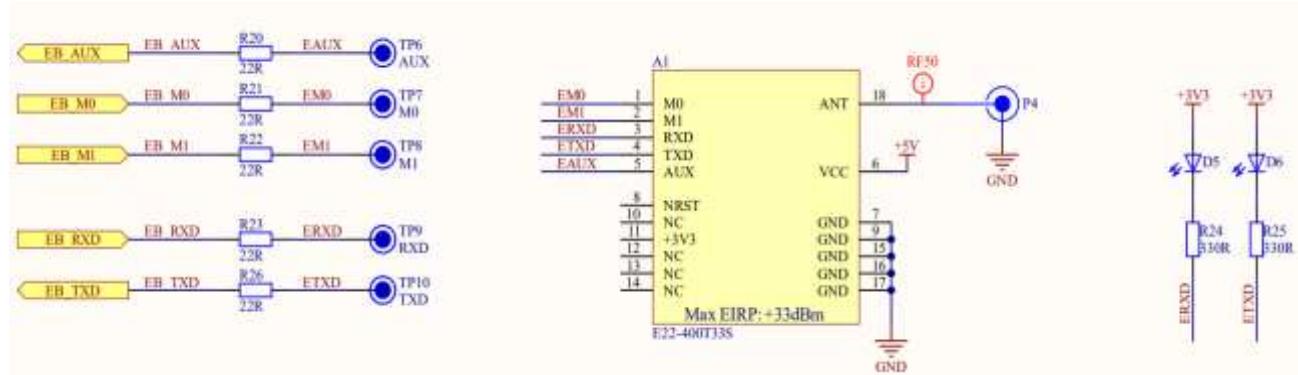


Рисунок 5 – Схема подключения радиомодуля

На рисунке 6 представлен макетный образец навигационного модуля, разработанный для интеграции в системы навигации и беспроводной связи. Плата объединяет ключевые аппаратные компоненты. Она включает микроконтроллер, навигационный модуль, радиомодуль и периферийные интерфейсы, которые позволяют обрабатывать данные в реальном времени, а также обмениваться ими с внешними системами.

Основным элементом платы является микроконтроллер STM32, который выполняет функции центрального управления системой и обработки данных. Он получает данные от навигационного модуля Quectel L80, обеспечивающего работу с GNSS-системами. Этот модуль поддерживает определение координат с высокой точностью и синхронизацию времени благодаря встроенному кварцевому генератору. Резервное питание реализовано с использованием батареи, что позволяет сохранять данные спутниковой информации и эфемерид даже при отключении основного источника питания.

На плате установлен радиомодуль E22-400T33S, предназначенный для беспроводной передачи данных по радиоканалу. Он поддер-

живает гибкие режимы работы, которые переключаются через интерфейсы управления, такие как M0 и M1. Для подключения внешней антенны используются SMA-разъемы. Светодиодные индикаторы, подключенные к линиям передачи и приема данных, предоставляют возможность мониторинга активности беспроводного интерфейса.



Рисунок 6 – Изготовленный макетный образец

Электропитание всех компонентов стабилизируется с использованием конденсаторов, расположенных по линии питания, что позволяет минимизировать помехи. Для работы системы тактирования используется кварцевый генератор на 24 МГц, который обеспечивает стабильную работу микроконтроллера. Разъемы USB и UART позволяют интегрировать модуль с внешними устройствами, включая компьютеры и системы телеметрии.

Таким образом, разработанный макетный образец представляет собой интегрированное решение, предназначенное для тестирования и последующей реализации в проектах, связанных с навигацией, беспроводной связью и сбором телеметрических данных.

Заключение

Разработанный макетный образец навигационного модуля является решением, объединяющим технологии спутниковой навигации ГНСС и ИНС. В рамках работы выполнены проектирование и реализация функциональной структуры модуля, а также разработка схемотехнических решений, обеспе-

чивающих его базовую работоспособность. Рассмотренная блок-схема отражает модульную структуру устройства, где каждая подсистема выполняет определенную задачу. Архитектура обеспечивает интеграцию технологий ГНСС и ИНС для достижения высокой точности навигации и надежности работы системы. Такое решение может быть адаптировано для различных задач, включая научные эксперименты, тестирование прототипов и образовательные проекты. Однако на данном этапе работа ограничивается созданием макетного образца, и функциональные испытания или тестирование в реальных условиях еще не проводились. Представленный макет служит основой для дальнейших исследований, включая калибровку, испытания и оптимизацию под конкретные условия эксплуатации.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23487878)

Литература

- 1 Drenthe N.T., Zandbergen B.T.C., Curran R., van Pelt M.O. Cost estimating of commercial smallsat launch vehicles // Acta Astronautica. – 2019. – Vol.155. – P.236–247.
- 2 Nanditta R.V., Das N.K., Venkatesan A., Rohit R., Gowtham R., Rahul B.N., Stephen J.D.G. Structural Design and Analysis of High-Powered Model Rockets using OpenRocket // International Journal of Engineering Research in Mechanical and Civil Engineering. – 2021. – Vol.6, Issue 8. – P.64–68.
- 3 Cieslinski D., Noga T., Pazik A. Polish civil rockets' development overview. In book: Obronność RP XXI wieku w teorii i praktyce. – Wydawnictwo Lotniczej Akademii Wojskowej, 2021. – 10 p.
- 4 Swartwout M. Cubesats/Smallsts/Nanosats/Picosats/Rideshare(sats) in 2022: Making sense of it all // Proceedings of the 36th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. – 2022. – P.1–12.
- 5 Berthoud L., Lancastle S.A. Work in Progress: Curriculum review for rocket scientists // 2020 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON). – 2020. – P.1900–1904.
- 6 Renwarin R.B., Prasetyo A.D., Pascawati A., Munir A. Development of Semi-Conformal Antennas for Telemetry and GPS Applications on Experimental Rocket // 2024 9th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech). – Bol and Split, Croatia, 2024. – P. 1–5.
- 7 Niederstrasser C.G. The small launch vehicle survey: A 2021 update (The rockets are flying) // Journal of Space Safety Engineering. – 2022. – Vol.9, No.3. – P.341–354.
- 8 Helms C.C. A Survey of Launch Services 2016–2020 // AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum. – 2020. – P. 1–12.
- 9 Shen Y. Application of STM32 Microcontroller Control System in Automation of Computer Laboratory Equipment // 2024 International Conference on Intelligent Computing and Robotics (ICICR). – Dalian, China, 2024. – P. 169–175.
- 10 Karibayev B., Meirambekuly N., Namazbayev T., Kozhakhmetova B., Chizimbayeva K., Kulakayeva A. The Possibilities of Using Fractal Antennas in Modern Wireless Communication Technologies // 2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST). – Astana, Kazakhstan, 2023. – P. 184–188.

11 Nasimuddin, Qing X. A Single-feed Compact Wideband Circularly Polarized Antenna for INMARSAT/GNSS Applications // 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). – Copenhagen, Denmark, 2020. – P. 1–4.

References

- 1 N.T. Drenthe, B.T.C. Zandbergen, R. Curran, and M. O. van Pelt, Acta Astronaut. 155, 236–247 (2019). DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.11.021.
- 2 R.V. Nanditta, N.K. Das, A. Venkatesan, R. Rohit, R. Gowtham, B. N. Rahul, and J. D. G. Stephen, Int. J. Eng. Res. Mech. Civ. Eng. 6, 64–68 (2021).
- 3 D. Cieslinski, T. Noga, and A. Pazik, Polish civil rockets' development overview. In book: Obrontość RP XXI wieku w teorii i praktyce, (Wydawnictwo Lotniczej Akademii Wojskowej, 2021), 10 p.
- 4 M. Swartwout, Proceedings of the 36th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 1–12 (2022).
- 5 L. Berthoud and S.A. Lancastle, 2020 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), 1900–1904 (2020). DOI: 10.1109/EDUCON45650.2020.9125316.
- 6 R.B. Renwarin, A.D. Prasetyo, A. Pascawati, and A. Munir, 2024 9th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTecH), Bol and Split, Croatia, 2024, pp. 1–5. DOI: 10.23919/SpliTecH58408.2024.10291858.
- 7 C.G. Niederstrasser, J. Space Saf. Eng. 9, 341–354 (2022). DOI: 10.1016/j.jsse.2022.07.001.
- 8 C.C. Helms, AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum, 2020, pp. 1–12. DOI: 10.2514/6.2020-3867.
- 9 Y. Shen, 2024 International Conference on Intelligent Computing and Robotics (ICICR), Dalian, China, 2024, pp. 169–175.
- 10 B. Karibayev, N. Meirambekuly, T. Namazbayev, B. Kozhakhmetova, K. Chizimbayeva, and A. Kulakayeva, 2023 IEEE International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST), Astana, Kazakhstan, 2023, pp. 184–188. DOI: 10.1109/SIST58858.2023.10167293.
- 11 Nasimuddin and X. Qing, 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Copenhagen, Denmark, 2020, pp. 1–4. DOI: 10.23919/EuCAP48036.2020.9135450.

Article history:

Received 30 November 2024
Accepted 18 December 2024

Мақала тарихы:

Түсті – 30.11.2024
Қабылданды – 18.12.2024

Information about authors:

1. **B.A. Karibayev** (corresponding author) – PhD, Department of Electronics and Astrophysics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: beibitkaribaev7@gmail.com
2. **Nursultan Meirambekuly** – PhD, Department of Electronics and Astrophysics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: nurs.kaznu@gmail.com
3. **Nursultan Uzbekov** – PhD, G.Daukeev Energy University, Almaty, Kazakhstan; e-mail: n.uzbekov@gmail.com

Авторлар туралы мәлімет:

1. **Бебіт Қарібаев** (автор-корреспондент) – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, электроника және астрофизика кафедрасының ғылым жөніндегі менгерушісінің орынбасары, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: beibitkaribaev7@gmail.com
2. **Нұрсұлтан Мейрамбекұлы** – PhD, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, электроника және астрофизика кафедрасы, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: beibitkaribaev7@gmail.com
3. **Нұрсұлтан Узбеков** – PhD, F. Даукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан; e-mail: n.uzbekov@gmail.com