

**РАЗРАБОТКА НАЗЕМНОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ И СВЯЗИ
НАНОСПУТНИКОВ ПЛАТФОРМЫ САМСАТ****П. Н. Николаев, Н. С. Титов*, С. В. Шафран***Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С. П. Королева, Самара, Россия*** nstitov00@gmail.com*

Аннотация. Представлены ключевые особенности наземного программного комплекса управления и связи для миссий наноспутников семейства СамСат, разработанного на основе опыта летно-конструкторских испытаний наноспутника SamSat-ION. Наземный программный комплекс состоит из: блока модулей управления оборудованием станции; блока универсальных модулей, не зависящих от оборудования станции; блока серверных модулей для расчета параметров движения и связи со спутником. В разработанном программном комплексе достигнута полная автоматизация процессов планирования и проведения сеансов связи, что позволяет использовать его как средство обучения студентов технологиям управления космическими аппаратами. Реализована возможность работы с несколькими близколетящими спутниками, что отличает программный комплекс от свободно распространяемых программ.

Ключевые слова: платформа СамСат, программный комплекс, сервер, TCP/IP, KISS, наземная станция, доплеровская частота, угол возвышения, TLE, азимут

Благодарность: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-72-30002, <https://rscf.ru/project/23-72-30002>.

Ссылка для цитирования: Николаев П. Н., Титов Н. С., Шафран С. В. Разработка наземного программного комплекса управления и связи наноспутников платформы СамСат // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 12. С. 1030–1040. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-12-1030-1040.

**DEVELOPMENT OF A GROUND-BASED SOFTWARE COMPLEX FOR CONTROL AND COMMUNICATION
OF THE SAMSAT PLATFORM NANOSATELLITES****P. N. Nikolaev, N. S. Titov*, S. V. Shafran***Samara University, Samara, Russia*** nstitov00@gmail.com*

Abstract. The key features of the ground software package for control and communication for missions of SamSat nanosatellites, developed on the basis of the experience of flight and design tests of the SamSat-ION nanosatellite, are presented. The ground software package consists of: a block of modules for controlling the station equipment; a block of universal modules independent of the station equipment; a block of server modules for calculating the parameters of movement and communication with the satellite. The developed software package achieves full automation of the processes of planning and conducting communication sessions, which allows it to be used as a means of teaching students spacecraft control technologies. The ability to work with several close-flying satellites has been implemented, which distinguishes the software package from freely distributed programs.

Keywords: SamSat platform, software package, server, TCP/IP, KISS, ground station, Doppler frequency, elevation angle, TLE, azimuth

Acknowledgments: The study was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 23-72-30002, <https://rscf.ru/project/23-72-30002>.

For citation: Nikolaev P. N., Titov N. S., Shafran S. V. Development of a ground-based software complex for control and communication of the SamSat platform nanosatellites // Journal of Instrument Engineering. 2024. Vol. 67, N 12. P. 1030–1040 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-12-1030-1040.

Введение. В Самарском университете студентами и преподавателями разработана космическая платформа научно-образовательных наноспутников СамСат формата CubeSat 3U. Первый наноспутник, созданный на базе этой платформы — SamSat-ION [1], был запущен на около-

круговую солнечно-синхронную орбиту с наклоном $97,5^\circ$ и высотой 550 км с космодрома Восточный 27 июня 2023 года.

Для сопровождения летно-конструкторских испытаний был разработан специализированный программный комплекс центра управления полетами (ЦУП) наноспутников. В ходе его эксплуатации был выявлен ряд недостатков, которые необходимо было устранить перед дальнейшими запусками наноспутников семейства СамСат. Среди обнаруженных недостатков выделяются следующие:

1) к моменту запуска наноспутника поставщик пусковых услуг предоставляет разработчикам расчетные элементы орбиты в формате TLE (Two-Line Element set, двухстрочный набор элементов) [2]. Точности представленных элементов орбиты хватает, чтобы осуществить сеанс связи в первые сутки. Далее погрешность элементов орбиты в данном TLE-файле в совокупности с накапливающейся ошибкой метода интегрирования не позволяет рассчитать доплеровские сдвиги частот принимаемого и передаваемого сигналов с точностью, приемлемой для попадания в полосу пропускания приемника радиостанции ЦУП. В имеющемся к моменту запуска SamSat-ION программном комплексе отсутствовала возможность уточнения орбитальных параметров спутника для компенсации доплеровской частоты;

2) ряд радиолюбительских и профессиональных центров управления полетами [3–5] использует универсальную программу слежения за спутниками Orbitron [6]. Поскольку Orbitron является программой с закрытым исходным кодом и не предполагает расширения функционала за счет подключения сторонних модулей, она неудобна в ряде ситуаций, например, когда поворотное устройство антенны ЦУП имеет ограничение на количество оборотов, антенна вынуждена разворачиваться на 360° при пересечении направления на север (переход через нуль градусов по азимуту), тем самым тратя время сеанса связи. В Orbitron затруднительно в автоматическом режиме спрогнозировать случай пересечения трассой спутника нуля градусов по азимуту, чтобы произвести поворот антенны на 180° по углу возвышения во избежание разворота на 360° по азимуту. Кроме того, Orbitron версии 3.71 свойственно ошибочное поведение в процессе переключения между наблюдаемыми спутниками и перестройки частоты во время проведения сеанса связи. Также ввиду универсальности Orbitron не всегда способна удовлетворять потребности уникальных миссий, требующих работы с группировкой спутников. По этой причине ряд разработчиков космических аппаратов использует наземные программные комплексы собственной разработки [7–9]. Коммерческое профессиональное программное обеспечение (FreeFlyer [10] и Satellite Tool Kit, STK [11]) обладает высокой стоимостью и не всегда доступно университетским командам разработчиков наноспутников;

3) в ходе летно-конструкторских испытаний наноспутника SamSat-ION сеансы связи проводил студенческий коллектив операторов численностью до 40 человек. Каждый день проводилось от четырех до шести сеансов связи. Таким образом, формирование расписания сеансов связи и графика дежурств требовало значительного времени.

В Самарском университете завершаются испытания научно-образовательных наноспутников СамСат-ИОНОСФЕРА и СамСат-ОРИОН. СамСат-ИОНОСФЕРА предназначен для изучения ионосферы дистанционным (с помощью бортового навигационного приемника) и контактным (с помощью датчика параметров плазмы, фиксирующего изменения резонансной частоты открытого колебательного контура) методами. СамСат-ОРИОН предназначен для дистанционного изучения ионосферы с помощью бортового навигационного приемника и передатчика когерентных радиоволн, прием сигналов с которого предполагается осуществлять на меридианных цепочках наземных станций. Запуск аппаратов запланирован на четвертый квартал 2024 года.

Постановка задачи. Летно-конструкторские испытания двух наноспутников требуют модификации предыдущей версии программного обеспечения ЦУП Самарского университета с выполнением:

1) автоматической фиксации частот принимаемого сигнала и последующей коррекции параметров орбиты спутника;

2) детектирования пересечения трассой спутника нуля градусов по азимуту в предстоящем сеансе связи для запуска соответствующего режима работы поворотного устройства антенны;

3) полной автоматизации формирования расписания проведения сеансов связи и проведения самого сеанса связи, а также автоматической организации графика дежурств операторов ЦУП;

4) одновременного проведения сеансов связи с несколькими спутниками из одного ЦУП.

Архитектура программного обеспечения наземной станции. Для обеспечения связи с двумя близколетящими спутниками, а также увеличения получаемого объема научных данных была разработана архитектура распределенной наземной системы управления и связи наноспутников платформы СамСат. Данная архитектура подразумевает возможность использования разных наземных станций для осуществления связи со спутником и сбора получаемых данных на единый сервер.

Распределенная наземная система управления и связи наноспутников платформы СамСат (рис. 1) состоит из блока модулей управления оборудованием станции, специфичных для конкретной радиостанции и поворотного устройства антенны, блока универсальных модулей, не зависящих от оборудования станции, и блока серверных модулей для расчета параметров сеансов связи со спутниками и журналирования.

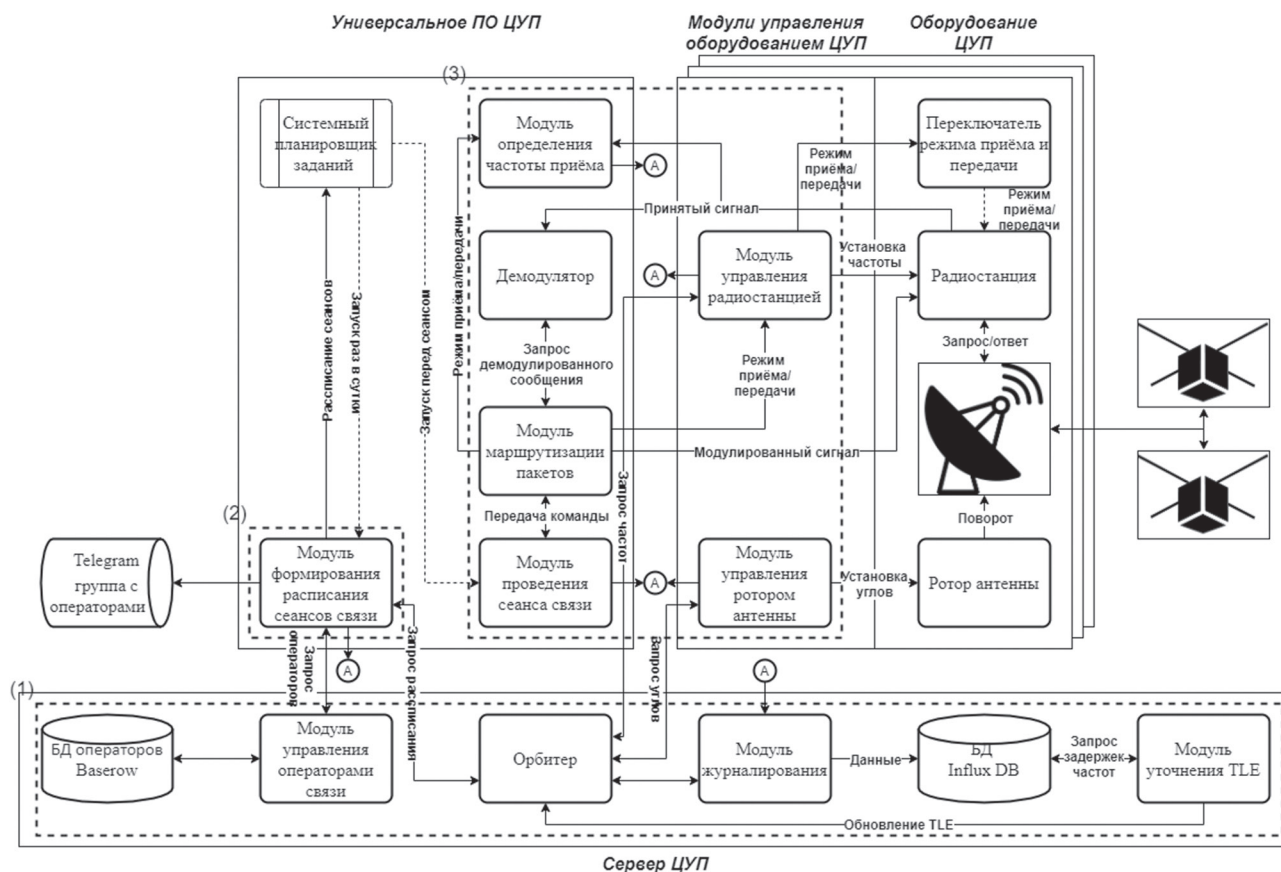


Рис. 1

Блок модулей управления оборудованием станции обеспечивает функционирование аппаратуры, необходимой для проведения сеанса связи, и состоит из:

- модуля управления радиостанцией — отвечает за переключение режимов работы радиостанции и установку частот передачи и приема;
- модуля управления поворотным устройством антенны — отвечает за установку угла возвышения и азимута для обеспечения направления антенны на спутник.

Блок универсальных модулей, не зависящих от оборудования станции, может быть развернут на любом персональном компьютере (ПК) или сервере под управлением операционной системы Windows или Linux. Данный блок включает:

- модуль формирования расписания сеансов связи, который запускается ежедневно и устанавливает расписание запуска модуля проведения сеансов связи в планировщик заданий на ближайшие сутки;
- системный планировщик заданий для установления времени запуска модуля проведения сеанса связи;
- модуль проведения сеанса связи, в котором описаны сценарии взаимодействия со спутником (совокупность команд и запросов телеметрии), а также графический интерфейс пользователя с трассой спутника в координатах угла возвышения и азимута;
- модуль маршрутизации пакетов, включающий в себя модулятор и осуществляющий взаимодействие с модулем проведения сеансов связи по протоколу KISS [12] и демодулятором;
- демодулятор, выделяющий информационную составляющую из принятого со спутника радиосигнала;
- модуль определения частоты приема, который позволяет в дальнейшем оценить смещения между ожидаемой частотой и частотой, на которой принят радиосигнал, для последующего уточнения параметров орбиты.

Блок серверных модулей — единый для всех наземных станций — содержит ПО, функционирующее на сервере в фоновом режиме, предоставляет наземным станциям необходимые данные как о параметрах сеансов связи (угол возвышения, азимут, частоты передачи и приема с учетом доплеровского сдвига), так и операторах сеансов связи, а также осуществляет централизованное сохранение научных данных в единую базу, что упрощает их дальнейшую обработку и анализ. Блок серверных модулей состоит из следующих частей:

- модуль „Орбитуер“, который рассчитывает параметры предстоящих сеансов связи и предоставляет всю необходимую информацию для их проведения;
- модуль управления расписанием операторов ЦУП — осуществляет автоматическую организацию графика дежурств в ЦУП, уведомляет операторов о предстоящем сеансе связи, хранит информацию об операторах и предстоящих сеансах в базе данных Baserow;
- модуль журналирования научных данных в единую базу данных InfluxDB [13].

По частоте запуска программные модули делятся на три группы (выделены пунктиром на рис. 1):

1) один раз в сутки запускается модуль формирования расписания сеансов связи (запускается на компьютере станции и привязан к ней, может формировать расписание для нескольких спутников);

2) запускаются непосредственно для проведения сеанса связи, соответственно они привязаны к конкретной станции. В эту группу входят ряд модулей универсального программного обеспечения и модули управления оборудованием станции (модуль проведения сеансов связи, модуль маршрутизации пакетов, демодулятор, модуль оценки частоты приема, модуль управления радиостанцией и модуль управления поворотным устройством антенны). Для параллельной работы с несколькими спутниками запускаются дополнительные экземпляры модуля проведения сеанса связи;

3) постоянно функционируют на сервере. К этой группе относятся модуль управления расписанием операторов, модуль „Орбитуер“, модуль журналирования, модуль уточнения TLE, а также базы данных InfluxDB и Baserow. Данные модули способны работать как с несколькими спутниками, так и с несколькими наземными станциями.

Описание работы программного комплекса. Модуль „Орбитуер“ прогнозирует абсолютное движение спутника и вычисляет параметры, необходимые для проведения сеансов связи на заданной наземной станции. Модуль „Орбитуер“ хранит ранее рассчитанные параметры орбит спутников в виде ассоциативных массивов, ключами которых являются NORAD ID спутников, а значениями — совокупность рассчитанных параметров для проведения сеансов

связи. Эти массивы служат значениями другого ассоциативного массива, в котором ключами выступают названия наземных станций. Настройка желаемого спутника в модуле „Орбитер“ производится посредством передачи его NORAD ID, либо передачи актуального TLE-файла. В случае передачи NORAD ID на сервере производится загрузка TLE-файла через API сайта Space Track [14]. Желаемая наземная станция настраивается в модуле „Орбитер“ посредством установки ее долготы, широты и высоты над уровнем моря.

Для прогнозирования абсолютного движения спутника и сеансов связи используются абсолютная геоцентрическая система координат (АГСК) и гринвичская геоцентрическая система координат (ГГСК). С целью прогнозирования абсолютного движения спутника используются модель SGP4 [2] для пересчета информации, содержащейся в TLE-файле, в начальный вектор состояния (координаты и скорости в АГСК) и численный метод Рунге-Кутты четвертого порядка [15] для решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений модели движения с учетом второй и четвертой зональных гармоник [16]. Параметры сеансов связи, а именно угол возвышения, азимут, частоты приема и передачи с учетом доплеровского сдвига, с дискретностью, равной шагу прогнозирования абсолютного движения спутника, вычисляются в ГГСК [17].

Модуль „Орбитер“ поддерживает клиент-серверную архитектуру и протокол TCP/IP [18]. Таким образом, модуль „Орбитер“ представляет собой TCP-сервер, который по запросам клиентов вычисляет параметры орбиты спутника и предоставляет им запрашиваемую информацию. Клиентами являются: модуль формирования расписания сеансов связи, модуль управления поворотным устройством антенны и модуль управления радиостанцией. Модуль „Орбитер“ осуществляет журналирование вычисленных параметров связи (углы возвышения, азимуты и частоты для приема и передачи данных) в базу данных временных рядов InfluxDB для дальнейшего уточнения параметров орбиты.

Наличие модуля управления расписанием операторов обусловлено необходимостью автоматической организации графика дежурств операторов ЦУП в силу их большого количества. Этот модуль позволяет получать доступ к реляционной базе данных Baserow [19], в которой хранится график дежурств операторов, поддерживаемый ответственным за ЦУП сотрудником.

Модуль управления расписанием операторов связи, как и „Орбитер“, построен по клиент-серверной архитектуре, он является TCP-сервером. Клиент, в свою очередь, развернут только в модуле формирования расписания сеансов связи, запрашивающем у сервера информацию о графике дежурств операторов на ближайшие сутки.

Модуль журналирования отвечает за вывод данных в терминал, в локальные текстовые файлы, а также в базу данных временных рядов InfluxDB. Журналирование информации в InfluxDB осуществляется через развернутый на сервере брокер сообщений RabbitMQ [20], работающий по протоколу AMQP [21]. Такой подход применяется для повышения надежности журналирования данных, позволяя минимизировать потерю информации в случае непредвиденного увеличения времени обработки в программном обеспечении и системе управления базой данных InfluxDB.

Модуль журналирования используется в модулях:

- 1) „Орбитер“ — фиксирует информацию о параметрах связи;
- 2) формирования расписания сеансов связи — сохраняет информацию о времени и параметрах предстоящих сеансов связи;
- 3) проведения сеанса связи — протоколирует отправленные на спутник команды, их аргументы и ответы на эти команды;
- 4) управления поворотным устройством антенны — сохраняет информацию о задаваемых и измеряемых значениях угла возвышения и азимута;
- 5) управления радиостанцией — протоколирует информацию о выставленных значениях частот для приема и передачи данных;
- 6) расчета доплеровских задержек — сохраняет рассчитанные доплеровские задержки частот.

Модуль уточнения TLE предназначен для корректировки параметров орбиты спутника в TLE-файле по набору измеренных частот приема с учетом доплеровского смещения, который он получает из модуля базы данных InfluxDB.

Параметры орбиты уточняются с помощью метода дифференциальной эволюции [22], который подбирает начальные условия модели движения спутника так, чтобы модельные доплеровские задержки частот соответствовали измеренным. В модели орбитального движения спутника использовались вторая и четвертая зональные гармоники. Уточненный по результатам обработки TLE-файл отправляется в модуль „Орбита“.

Используемые базы данных. Реляционная база данных Baserow представляет собой веб-сервис для графического ведения базы данных в виде электронных таблиц. В программном комплексе Baserow используется для хранения информации об операторах сеансов связи и графике дежурств операторов. Доступ к базе данных Baserow осуществляется как в интерактивном графическом режиме, так и посредством запросов REST API [23].

База данных временных рядов InfluxDB используется для хранения всей научной и технической информации. Доступ к базе может быть осуществлен как в интерактивном режиме, так и посредством API, работа с которым происходит с помощью языка InfluxQL. Вся информация из базы данных InfluxDB отображается в системе визуализации данных Grafana [24], которая представляет собой веб-приложение с набором пользовательских интерфейсов, содержащих диаграммы, графики, таблицы.

Работа программного обеспечения наземной станции начинается со старта модуля *формирования расписания сеансов связи*, ежедневный запуск которого, в свою очередь, настроен в системном планировщике заданий. Входные данные для работы этого модуля предоставляются сервером — модулем управления операторами и модулем „Орбита“.

Модуль „Орбита“ по запросу модуля формирования расписания сеансов связи прогнозирует движение требуемого спутника на интервале в одни сутки, формирует все сеансы связи в этом интервале и предоставляет время начала и окончания сеансов связи между заданными спутником и станцией, а также параметры сеансов связи, такие как угол возвышения, азимут, частоты передачи и приема с учетом доплеровского сдвига частоты.

Получив список сеансов связи, включающий время начала и окончания, максимальное возвышение, информацию о положении Солнца, флаг пересечения трассой спутника направления на север, модуль формирования расписания сеансов связи производит фильтрацию списка, используя ограничения, накладываемые целевой задачей. Например, можно выбрать только один сеанс связи с максимальным возвышением или выбрать сеансы связи на освещенной стороне орбиты.

Далее модуль формирования расписания запрашивает список дежурящих в ближайшие сутки операторов и на основании отфильтрованного списка сеансов связи модуль управления расписанием операторов рассылает уведомления и напоминания о предстоящих сеансах в системе мгновенного обмена сообщениями, например, в Telegram.

Результатом работы модуля является установление времени запуска скриптов включения и выключения модуля проведения сеанса связи в системный планировщик заданий в соответствии с отфильтрованным списком сеансов связи. Если флаг пересечения трассой спутника направления на север установлен, то запускается версия скрипта включения с дополнительным поворотом антенны на 180° по углу возвышения.

Кроме того, модуль формирования расписания сеансов связи протоколирует время и параметры предстоящих сеансов связи в базу данных временных рядов InfluxDB.

Модуль *проведения сеансов связи* запускается непосредственно перед тем, как спутник появится в зоне прямой радиовидимости наземной станции, и решает три задачи:

- 1) запуск остальных модулей, необходимых для проведения сеанса связи: сервер маршрутизации запросов, демодулятор, модуль оценки доплеровских задержек частот, модуль управления радиостанцией, модуль управления поворотным устройством антенны;
- 2) запуск графического интерфейса пользователя;

3) непосредственное проведение сеанса связи по выбранному сценарию, описывающему порядок отправки команд и запросов на спутник.

Графический интерфейс пользователя содержит график с трассой спутника в реальном времени в координатах угла возвышения и азимута, показывает таблицу с сеансами связи на ближайшие сутки, а также позволяет оперативно скорректировать частоту приема и частоту передачи спутника.

В сценарии описывается перечень пакетов, передаваемых на спутник в текущем сеансе связи, порядок их исполнения, количество попыток получить ответ, а также условия отправки команд, зависящие как от успешности запросов, так и параметров полученной телеметрии. Полученный успешно ответ декодируется с последующей записью результата в базу данных.

Модуль маршрутизации пакетов является программным интерфейсом радиостанции. Модуль принимает сообщения с запросами к спутнику по протоколам TCP/IP и KISS от модуля проведения сеанса связи. Полученное сообщение подвергается модуляции и в зависимости от конфигурации: в случае использования радиостанции переводится в звуковой сигнал, который, в свою очередь, передается на аудиовход радиостанции; либо, в случае использования программно-конфигурируемого радио, непосредственно передает отсчеты радиосигнала.

При приеме ответного сигнала со спутника радиостанцией производится его демодуляция программным модемом для пакетной радиосвязи SoundModem [25]. После этого модуль маршрутизации пакетов вычитывает полученное сообщение из демодулятора и транслирует его в качестве ответа модулю проведения сеанса связи.

Поскольку модуль маршрутизации пакетов работает по протоколу TCP/IP, доступ к радиостанции возможно получить с любого компьютера из сети, кроме того, возможно взаимодействие с несколькими спутниками, под каждый из которых необходимо запустить свой модуль проведения сеансов связи.

Модуль оценки частоты приема получает на вход аудиосигнал принятого сообщения от радиостанции, после чего производит оконное быстрое преобразование Фурье для получения спектрограммы в реальном времени. Производится свертка спектра с окном для выделения центральной частоты синхропоследовательности в принимаемом сообщении. Данная оцененная частота журналируется с привязкой ко времени получения сообщения, после чего используется в модуле уточнения параметров орбиты в файле TLE на сервере.

Демодулятор. В программном комплексе в качестве демодулятора используется SoundModem — программный модем для пакетной радиосвязи, который работает по протоколу AX.25 и передает модулю маршрутизации запросов демодулированное сообщение по протоколам TCP/IP и KISS.

Модуль управления радиостанцией. Главная задача данного модуля заключается в установке частоты работы радиостанции по последовательному интерфейсу и переключении ее режимов через внешнее устройство „push-to-talk“. Модуль работает по протоколу TCP/IP, получая команды об установке режима приема/передачи от модуля маршрутизации запросов и запрашивая значения частот с учетом доплеровского сдвига у модуля „Орбитер“.

Модуль управления поворотным устройством антенны отвечает за подачу команды на установку угла возвышения и азимута на поворотном устройстве антенны. Как и модуль управления радиостанцией, он работает по протоколу TCP/IP, запрашивая значения углов у модуля „Орбитер“.

Анализ работы программного комплекса. Для проверки работы наземного программного комплекса управления и связи наноспутников платформы СамСат в части автоматизации проведения сеанса связи с двумя близколетающими спутниками были проведены наземные функциональные испытания, в ходе которых осуществлялась связь со спутниками СамСат-ИОНОСФЕРА и СамСат-ОРИОН. Была смоделирована ситуация, в которой данные наноспутники летели на близком расстоянии (порядка 1300 км), в результате чего времена проведения сеансов связи перекрывались. Связь осуществлялась на единой частоте 437 398 600 Гц, а чтобы

спутники могли различить отправляемые с наземной станции сообщения, в AX.25-заголовке сообщений указывались позывные RS75S и RS76S для СамСат-ИОНОСФЕРА и СамСат-ОРИОН соответственно.

На рис. 2 приведен снимок экрана, сделанный во время проведения этих испытаний (1 — демодулятор SoundModem; 2 — терминал TCP/IP-сервера модулей управления радиостанцией и управления поворотным устройством антенны; 3 и 4 — терминалы модулей проведения сеансов связи для спутников СамСат-ИОНОСФЕРА и СамСат-ОРИОН; 5 и 6 — графические интерфейсы пользователя для спутников СамСат-ИОНОСФЕРА и СамСат-ОРИОН).

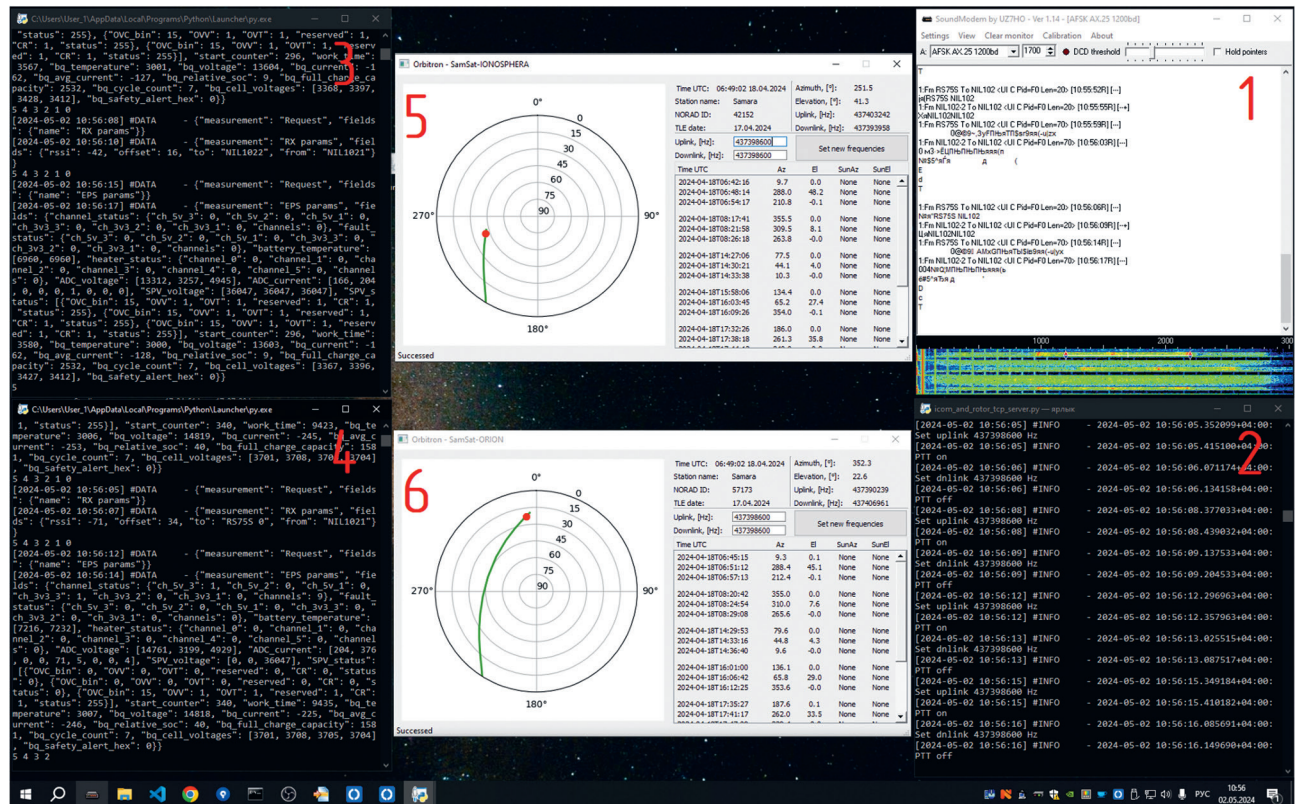


Рис. 2

Сеанс связи с СамСат-ОРИОН начался через три минуты после старта сеанса с СамСат-ИОНОСФЕРА (рис. 2, блоки 5 и 6). Для обоих спутников был использован сценарий с запросами телеметрии системы электропитания, телеметрии приемника и измерений с датчиков бортового компьютера. Некоторые запросы и ответы отображены в терминалах модулей проведения сеансов (рис. 2, блоки 3 и 4). В программе SoundModem показаны принятые со спутников пакеты в байтовом виде с AX.25-заголовком (блок 1). Терминал TCP/IP-сервера модулей управления радиостанцией и управления поворотным устройством антенны (блок 2) отображает текущие углы ориентации наземной антенны и частоты приема и передачи радиостанции (в процессе проведения испытаний антенна была направлена в зенит).

Данные, получаемые в ходе функциональных испытаний, записывались в базу данных InfluxDB и отображались в интерфейсе наблюдения за состоянием спутников СамСат-ИОНОСФЕРА и СамСат-ОРИОН в системе визуализации Grafana (рис. 3). Полученные результаты подтвердили корректность принятых технических решений в части автоматизации сеансов связи с двумя близкотеющими спутниками.

Испытания модуля определения частоты приема и модуля уточнения TLE проводились на записях сеансов связи с наноспутником SamSat-ION, полученных в период с 27 июня по 6 июля 2023 г. Погрешность оценки реального доплеровского сдвига частот из полученных измерений в реализованных модулях не превысила 100 Гц, что обеспечивает нахождение сигнала с ЦУП в

полосе пропускания приемника спутника (1,5 кГц), а принимаемого со спутника сигнала — в полосе пропускания приемника ЦУП (3 кГц — для радиостанции ICOM IC-910H).

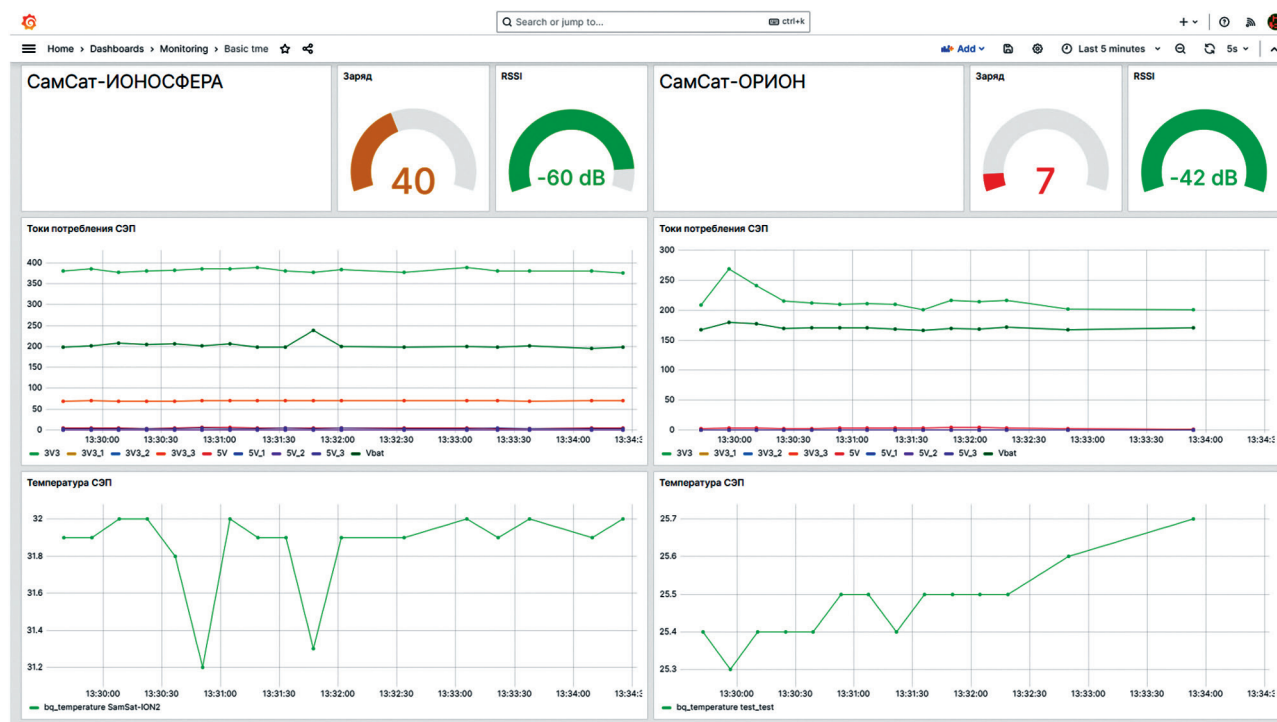


Рис. 3

Проведенные испытания показали успешность принятых при разработке наземного программного комплекса решений, которые позволяют проводить сеансы связи с двумя близкостоящими спутниками.

Заключение. В результате проделанной работы создан наземный программный комплекс управления и связи наноспутников платформы СамСат. Данный программный комплекс обеспечил полную автоматизацию сеансов связи для группы наноспутников, а также автоматизацию процесса формирования графика дежурств операторов центра управления полетами, что позволяет использовать его как средство обучения студентов технологиям управления космическими аппаратами. Кроме того, данный программный комплекс может быть запущен на нескольких наземных станциях в разных городах и тем самым собирать и записывать научные данные на единый сервер как при работе с одним спутником, так и с группировкой. Разработанный программный комплекс будет использован для управления миссиями и проведения сеансов связи с наноспутниками СамСат-ИОНОСФЕРА и СамСат-ОРИОН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев П. Н., Эпиноза Валлес А., Щербаков М. С. и др. Калибровка бортовых магнитометрических датчиков системы ориентации университетского наноспутника SamSat-ION // Гирокоспия и навигация. 2023. Т. 31, № 3(122). С. 109–121.
2. Hoots F. R., Roehrich R. L. Models for Propagation of NORAD Element Sets. 1980. Spacetrack report no. 3. 91 p.
3. СПУТНИКС. Учебная станция приема спутниковых данных „ВЬЮНОК“ [Электронный ресурс]: <<http://viewnok.sputnix.ru/doku.php?id=en:lesson02>>. (дата обращения: 18.04.2024)
4. Peralta D. J. M., Dos Santos D. S., Tikami A. et al. Satellite Telemetry and Image Reception with Software Defined Radio Applied to Space Outreach Projects in Brazil // Anais da Academia Brasileira de Ciências. 2018. Vol. 3, N 90. P. 3175–3184.
5. Peralta D. J. M., Dos Santos D. S., Tikami A. et al. A Software Defined Radio Approach to Ground Operations of Small Satellites // 1st IAA Latin American Symposium on Small Satellites. Buenos Aires, Argentina: Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), 2017. P. 1–8.

6. Orbitron — Satellite Tracking System [Электронный ресурс]: <<https://www.stoff.pl>>. (дата обращения: 18.04.2024)
7. Vinterhav E., Karlsson T. Script based software for ground station and mission support operations for the Swedish small satellite Odin // Acta Astronautica. 2007. Vol. 61, N 10. P. 912–922.
8. Scharnagl J., Haber R., Dombrovski V., Schilling K. NetSat — Challenges and lessons learned of a formation of 4 nano-satellites // Acta Astronautica. 2022. Vol. 201, N 8. DOI:10.1016/j.actaastro.2022.09.036.
9. Busch S., Bangert P., Dombrovski S., Schilling K. UWE-3, in-orbit performance and lessons learned of a modular and flexible satellite bus for future pico-satellite formations // Acta Astronautica. 2015. Vol. 117. DOI:10.1016/j.actaastro.2015.08.002.
10. FreeFlyer Astrodynamics Software [Электронный ресурс]: <<https://ai-solutions.com/freelyer-astrodynamic-software/>>. (дата обращения: 18.04.2024)
11. Ansys STK Software for Digital Mission Engineering and Systems Analysis [Электронный ресурс]: <<https://www.ansys.com/products/missions/ansys-stk>>. (дата обращения: 18.04.2024)
12. KISS Protocol [Электронный ресурс]: <<https://www.ax25.net/kiss.aspx>>. (дата обращения: 18.04.2024)
13. InfluxData: InfluxDB Time Series Data Platform [Электронный ресурс]: <<https://www.influxdata.com/>>. (дата обращения: 18.04.2024)
14. Space-Track.org [Электронный ресурс]: <<https://www.space-track.org/>>. (дата обращения: 18.04.2024)
15. Press W. H. Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. NY: Cambridge University Press, 2007.
16. Крылов В. И. Основы теории движения ИСЗ (часть вторая: возмущенное движение). М.: МИИГАиК, 2016. 67 с.
17. Gordon G. D., Morgan W. L. Principles of Communications Satellites. Hoboken, USA: Wiley-Interscience, 1993. 568 p.
18. TCP/IP protocols // IBM [Электронный ресурс]: <<https://www.ibm.com/docs/ai/aix/7.3?topic=protocol-tcpip-protocols>>. (дата обращения: 18.04.2024)
19. Baserow: Open source no-code database and Airtable alternative [Электронный ресурс]: <<https://baserow.io/>>. (дата обращения: 18.04.2024)
20. RabbitMQ: One broker to queue them all [Электронный ресурс]: <<https://www.rabbitmq.com/>>. (дата обращения: 18.04.2024)
21. AMQP Advanced Message Queuing Protocol [Электронный ресурс]: <<https://www.amqp.org/>>. (дата обращения: 18.04.2024)
22. Elisov N. A., Kramlikh A. V., Lomaka I. A. et al. An attitude control by the functional series in the problem of nanosatellite reorientation // Aerospace Science and Technology. 2022. Vol. 132. P. 108038. DOI:10.1016/j.ast.2022.108038.
23. Representational State Transfer (REST) // IBM [Электронный ресурс]: <<https://www.ibm.com/docs/en/ips/8.8?topic=methodology-representational-state-transfer-rest>>. (дата обращения: 18.04.2024)
24. Grafana: The open observability platform [Электронный ресурс]: <<https://grafana.com/>>. (дата обращения: 18.04.2024)
25. UZ7HO Soundmodem Sound Card Modem Setup Guide [Электронный ресурс]: <http://uz7.ho.ua/modem_beta/user_guide_v114_EN.pdf>. (дата обращения: 18.04.2024)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Петр Николаевич Николаев

— канд. физ.-мат. наук; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Межвузовская кафедра космических исследований, лаборатория „Перспективные фундаментальные и прикладные космические исследования на базе наноспутников“; ст. науч. сотр.; E-mail: nikolaev.pn@ssau.ru

Никита Сергеевич Титов

— Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Межвузовская кафедра космических исследований, лаборатория „Перспективные фундаментальные и прикладные космические исследования на базе наноспутников“; инженер-программист; E-mail: nstitov00@gmail.com

Степан Вячеславович Шафран

— Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Межвузовская кафедра космических исследований, лаборатория „Перспективные фундаментальные и прикладные космические исследования на базе наноспутников“; мл. науч. сотр.; E-mail: shafra.n.v@ssau.ru

Поступила в редакцию 13.05.24; одобрена после рецензирования 28.05.24; принята к публикации 22.10.24.

REFERENCES

1. Nikolaev P.N., Espinoza V.A.S., Shcherbakov M.S., Sobolev D.D. *Gyroscopy and Navigation*, 2023, no. 3(31), pp. 259–266.
2. Hoots F.R., Roehrich R.L. *Models for Propagation of NORAD Element Sets*, Spacetrack report no. 3. 1980. 91 p.
3. <http://viewnok.sputnix.ru/doku.php?id=en:lesson02>. (in Russ.)
4. Peralta D.J.M., Dos Santos D.S., Tikami A. et al. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2018, no. 90(3), pp. 3175–3184.
5. Peralta D.J.M., Dos Santos D.S., Tikami A. et al. *1st IAA Latin American Symposium on Small Satellites*, Buenos Aires, Argentina, Universidad Nacional de San Martín (UNSAM), 2017, pp. 1–8.
6. *Orbitron — Satellite Tracking System*, <https://www.stoff.pl>.
7. Vinterhav E., Karlsson T. *Acta Astronautica*, 2007, no. 10(61), pp. 912–922.
8. Scharnagl J., Haber R., Dombrovski V., Schilling K. *Acta Astronautica*, 2022, no. 8(201), DOI:10.1016/j.actaastro.2022.09.036.
9. Busch S., Bangert P., Dombrovski S., Schilling K. *Acta Astronautica*, 2015, vol. 117, DOI:10.1016/j.actaastro.2015.08.002.
10. *FreeFlyer Astrodynamics Software*, <https://ai-solutions.com/freeflyer-astrodynamic-software/>.
11. *Ansys STK Software for Digital Mission Engineering and Systems Analysis*, <https://www.ansys.com/products/missions/ansys-stk>.
12. *KISS Protocol*, <https://www.ax25.net/kiss.aspx>.
13. *InfluxData: InfluxDB Time Series Data Platform*, <https://www.influxdata.com/>.
14. *Space-Track.org*, <https://www.space-track.org/>.
15. Press W.H. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, New York, 2007.
16. Krylov V.I. *Osnovy teorii dvizheniya ISZ (chast' vtoraya: vozmushchennoye dvizheniye)* (Fundamentals of the Theory of Artificial Satellite Motion (Part Two: Disturbed Motion)), Moscow, 2016, 67 p. (in Russ.)
17. Gordon G.D., Morgan W.L. *Principles of Communications Satellites*, Hoboken, USA, Wiley-Interscience, 1993, 568 p.
18. *TCP/IP protocols*, <https://www.ibm.com/docs/fi/aix/7.3?topic=protocol-tcpip-protocols>.
19. *Baserow: Open source no-code database and Airtable alternative*, <https://baserow.io/>.
20. *RabbitMQ: One broker to queue them all*, <https://www.rabbitmq.com/>.
21. *AMQP Advanced Message Queuing Protocol*, <https://www.amqp.org/>.
22. Elisov N.A., Kramlikh A.V., Lomaka I.A. et al. *Aerospace Science and Technology*, 2022, vol. 132, pp. 108038, DOI:10.1016/j.ast.2022.108038.
23. *Representational State Transfer (REST)*, <https://www.ibm.com/docs/en/ips/8.8?topic=methodology-representational-state-transfer-rest>.
24. *Grafana: The open observability platform*, <https://grafana.com/>.
25. *UZ7HO Soundmodem Sound Card Modem Setup Guide*, http://uz7.ho.ua/modem_beta/user_guide_v114_EN.pdf.

DATA ON AUTHORS

Petr N. Nikolaev

PhD; Samara University, Inter-University Department of Space Research, Laboratory of Promising Fundamental and Applied Space Research Based on Nanosatellites; Senior Researcher;
E-mail: nikolaev.pn@ssau.ru

Nikita S. Titov

Samara University, Inter-University Department of Space Research, Laboratory of Promising Fundamental and Applied Space Research Based on Nanosatellites; Software Engineer;
E-mail: nstitov00@gmail.com

Stepan V. Shafran

Samara University, Inter-University Department of Space Research, Laboratory of Promising Fundamental and Applied Space Research Based on Nanosatellites; Junior Researcher; E-mail: shafran.sv@ssau.ru

Received 13.05.24; approved after reviewing 28.05.24; accepted for publication 22.10.24.