

Свободное программное обеспечение для геодезического мониторинга Moncenter

А. П. Карник^{1}, А. В. Мареев¹, Д. С. Мамаев¹*

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: rector@ssga.ru

Аннотация. Программные комплексы и библиотеки с открытым исходным кодом являются важным элементом эффективного развития прикладной науки. Они также важны как составляющие методического и образовательного обеспечения для прикладных наук вместе с нормативными документами и учебной литературой. Статья посвящена развитию проекта с открытым исходным кодом для спутникового геодезического мониторинга инженерных сооружений и природной среды. Цель статьи – демонстрация реализованных в комплексе Moncenter алгоритмов, аппаратного обеспечения для прототипа автономного и малобюджетного ГНСС-датчика. Приведен алгоритм создания пользовательской одночастотной базовой станции для геодезического мониторинга. Представлены результаты первого тестирования разработанной системы геодезического мониторинга. Ошибка эпизодического мониторинга стабильности по высоте за восемь месяцев составила 11 мм.

Ключевые слова: геодезический мониторинг инженерных сооружений, ГНСС, RTKLIB, открытый исходный код, геодинамика

Введение

Под геодезическим мониторингом инженерных сооружений и природной среды понимается процесс эпизодической или непрерывной оценки пространственного положения точек, закрепленных на ответственных конструкциях сооружений или в грунте на геодезических полигонах. Информация по результатам мониторинга передается на экспертную оценку технического состояния объекта или применяется для оповещения экстренных служб в случае выявления критических деформаций.

Геодезический мониторинг становится доступнее широкому пользователю благодаря нескольким тенденциям. Первая – снижение цены на оборудование для высокоточного позиционирования. Вторая тенденция – развитие индустрии интернета вещей. На массовом рынке можно найти ГНСС-модули стоимостью ниже 300\$ [1]. Малобюджетные спутниковые модули позволяют выполнять измерения достаточного качества для геодезического мониторинга [2]. Благодаря второй тенденции, появляются недорогие и надежные программно-аппа-

ратные средства для обеспечения связи и обработки данных. Это позволяет системам геодезического мониторинга обеспечить повышение уровня безопасности эксплуатации инженерных сооружений. Недостатком элементом массовых систем мониторинга является доступное программное обеспечение (ПО). Развитие такого ПО для систем геодезического мониторинга является целью развиваемого в СГУГиТ комплекса Moncenter [3]. Проект развивается под открытой лицензией BSD-2.

Программное обеспечение для геодезического мониторинга

Безусловными лидерами в области разработки программного обеспечения для геодезического мониторинга являются компании Trimble с программным продуктом Trimble 4D Control и Hexagon Geosystems с комплексом Leica GeoMoS. Эти компании предоставляют пользователям полный набор необходимого оборудования для разработки систем геодезического мониторинга. Программы ориентированы на работу с оборудованием собственного производства и применяют

внутренние форматы передачи информации. Программные комплексы Trimble 4D Control и Leica GeoMoS занимают большую часть рынка ПО для систем мониторинга инженерных сооружений, получили общее признание и стали стандартами в отрасли. Так, программа Leica GeoMoS часто используется в составе проектов систем геодезического и геотехнического мониторинга [4].

Среди проприетарных программ важное место занимает комплекс GOCA [5], разработанный в университете Карлсруэ под руководством профессора R. Jäger. Этот программный комплекс ориентирован на работу с геодезическим оборудованием любого производителя и имеет необходимый набор элементов и модулей для геодезического мониторинга. Среди достоинств комплекса – ориентированность на работу с малобюджетным ГНСС-оборудованием, наличие программ, позволяющих выполнять проектирование систем геодезического мониторинга и проводить оценку стабильности положения базовых станций.

Среди существующих решений для геодезического мониторинга следует также отметить онлайн-сервис от Position Plus [6]. Компания предоставляет возможность мониторинга базовой станции или любого фазового ГНСС-приемника, подключенного к интернету. Среди преимуществ сервиса является использование в обработке ГНСС-измерений ПО Bernese. Сервис предоставляется по подписке.

У проприетарных программ для геодезического мониторинга есть ряд недостатков:

- высокая стоимость. В странах развивающегося рынка малая доля объектов критически важной инфраструктуры обеспечена системами геотехнического и геодезического мониторинга. Часто потребители покупают только оборудование, выполняя обработку и анализ собственными силами;

- ориентированность на устройства собственного производства. Это осложняет внедрение в системы геодезического мониторинга малобюджетных приборов сторонних производителей;

- непрозрачность алгоритмов, используемых в обработке. Эксперты при проведении

анализа результатов мониторинга не всегда понимают, какие алгоритмы применялись для оценки вектора состояния объекта. Потенциально это может негативно сказаться на качестве принимаемых решений;

- закрытое программное обеспечение ставит барьер на появлении новых приложений геодезического мониторинга. Не для всех возникающих задач мониторинга можно адаптировать существующее проприетарное ПО. К примеру, не всегда удается интегрировать датчики новых типов сторонних производителей и, соответственно, использовать новые виды информации в системах геодезического мониторинга.

Недостатки есть и у программ с открытой архитектурой. Это низкое качество ПО на ранних стадиях развития проекта, отсутствие поддержки пользователей и отсутствие сертификации. Также важно понимать, что разработчики свободного ПО не несут никакой ответственности за возможные проблемы, возникшие в ходе эксплуатации программ. Эти условия устанавливаются по стандартному пользовательскому соглашению для программ с открытым исходным кодом.

Среди программ с открытым исходным кодом, используемых для геодезического мониторинга, выделяется комплекс RTKLIV [7]. Комплекс позволяет организовать мониторинг инженерных сооружений с помощью спутникового геодезического оборудования. Использование малобюджетной ГНСС-аппаратуры вместе с программой RTKLIV позволяет достигать удовлетворительных результатов спутникового мониторинга как в режиме реального времени, так и в постобработке. Также следует отметить наличие свободного программного обеспечения для обработки данных спутниковой радарной интерферометрии и активно внедряемого для геодезического мониторинга [8, 9].

Для обработки временных рядов геодезических наблюдений существуют свободные программы CATS [10], NECTOR [11]. Программы позволяют выполнять оценку кинематических моделей для пунктов геодезического мониторинга с учетом стохастических характеристик шума в измерениях. При помощи комплекса [12] можно выполнять урав-

нивание и анализ в деформируемых геодезических сетях. Открытая Python-библиотека [13] позволяет рассчитывать характеристики поверхностных деформаций методом конечных элементов.

Для читателей будет полезной ссылка на обновляемый перечень программ для обработки ГНСС-измерений [14]. Также рекомендуем ознакомиться с репозиторием австралийской геодезической службы, где можно отыскать много полезного свободного кода для геодезических и геофизических исследований [15].

Единственным ПО с открытым кодом, ориентированным исключительно на геодезический мониторинг, является комплекс DAVAMOS [16]. Комплекс позволяет использовать данные с роботизированных электронных тахеометров, инклинометров, цифровых нивелиров, датчиков температуры, тензометров для организации систем мониторинга. Программное обеспечение имеет модульную структуру, в которой один из модулей выполняет роль сервера, а другие – коммутаторов с геодезическим оборудованием. ПО для коммутаторов устанавливается на малобюджетные микроконтроллеры типа Raspberry Pi. Ценность разработки заключается также в том, что в основе архитектуры этой программы лежат протоколы и решения из области интернета вещей. Это потенциально может повысить надежность и доступность систем мониторинга. К сожалению, на момент публикации в этом программном комплексе не реализована поддержка ГНСС-оборудования.

Архитектура и компоненты

При проектировании программно-аппаратного комплекса коллектив разработчиков ориентировался на следующие положения:

- проект должен иметь открытую программно-аппаратную архитектуру. Состав программ должен позволять потенциальным пользователям самостоятельно изготовить малобюджетную систему автоматического геодезического мониторинга;

- используемые устройства должны иметь открытый командный интерфейс, а также быть доступными для широкого пользователя;

- набор аппаратных и программных средств должен обеспечивать автономность разрабатываемой системы;

- при разработке программных средств должны применяться программы только с открытым исходным кодом, не имеющие ограничений по использованию.

Целевое назначение разрабатываемого программно-аппаратного комплекса – определение долгопериодических деформаций в конструкциях инженерных сооружений и земной коре по данным продолжительного ГНСС-мониторинга. В программе реализованы следующие функциональные модули:

- коммуникация с ГНСС-оборудованием разных производителей;

- преобразование измерений в файлообменные форматы;

- обработка измерений и наполнение базы данных (БД) спутникового мониторинга;

- оповещение пользователя о состоянии объекта мониторинга;

- резервное копирование БД мониторинга.

Программный комплекс Moncenter реализован на языке Python 3. Основными компонентами комплекса являются библиотека обработки спутниковых измерений RTKLIB и система управления базами данных SQLite3. Также в Moncenter используется ряд дополнительных компонентов, такие как os (взаимодействие с операционной системой), PyQt5 (графический интерфейс), smtplib (отправка писем), yadisk, googleApiClient (резервное копирование). Moncenter предназначен для использования на локальной или серверной машине под управлением операционной системы Linux. Общая схема системы мониторинга на основе программы Moncenter приведена на рис. 1. На этой схеме условно обозначены функциональные модули и аппаратные компоненты. Модули RNX2RTKP, CONVBIN, STR2STR являются составляющими библиотеки RTKLIB.

Для связи сервера с геодезическим оборудованием при возможности прямого TCP-IP соединения или подключения к базовой станции по протоколу NTRIP рекомендуется использовать следующие модули:

– WIFI-модуль Wemos, на основе чипов ESP8266/ESP32, для коммуникации во внешней WIFI сети или прямого соединения при помощи направленных антенн при расстояниях до 200–300 м;

– модули типа SX1263, позволяющие осуществлять коммуникацию по протоколу LoRa при отсутствии внешней локальной сети WIFI и расстояниях между станциями мониторинга от 300 до 7 000 м.

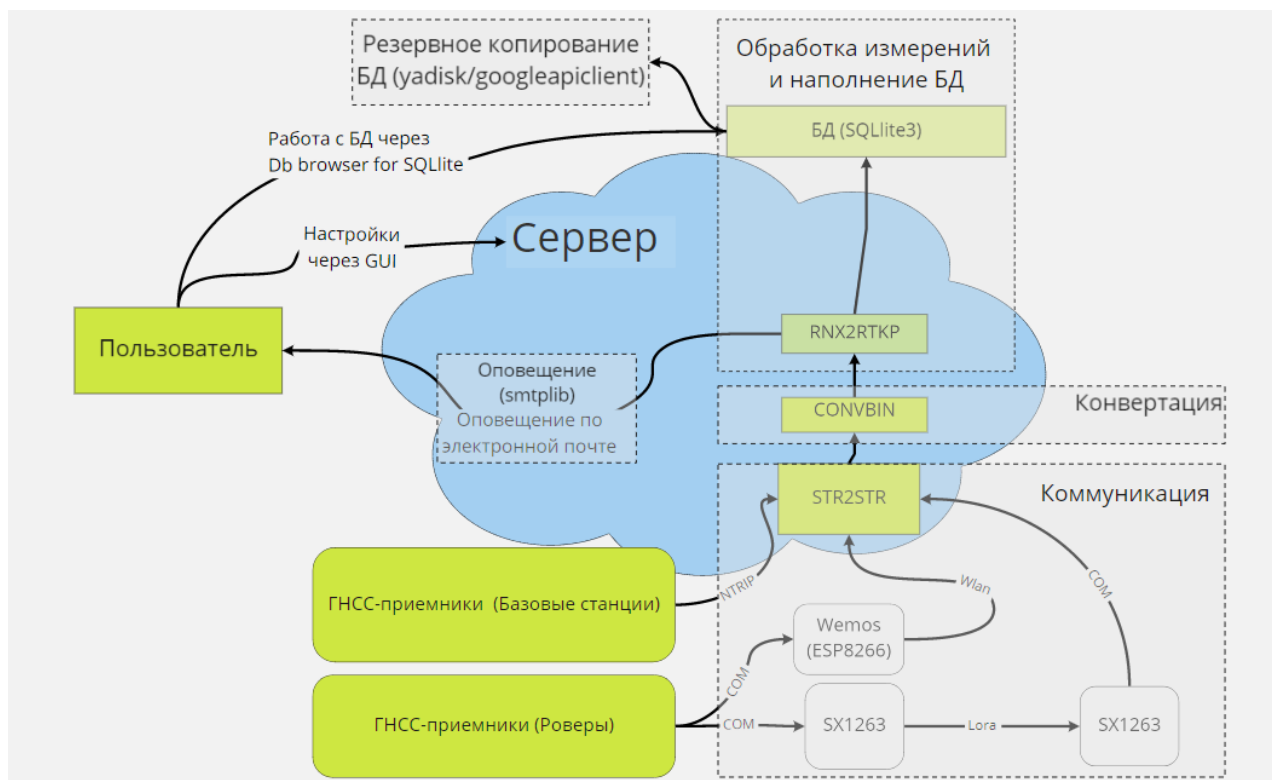


Рис. 1. Общая схема системы геодезического мониторинга на основе программы Moncenter

Инициализация системы ГНСС-мониторинга и база данных

Центральное место системы мониторинга – это база данных с информацией об используемом оборудовании, сведениях о пунктах мониторинга, настройках обработки, преобразования измерений. Поэтому процесс инициализации программы Moncenter при создании системы мониторинга представляет собой заполнение базы данных конфигураций оборудования и сценариев. Этот этап реализован в виде цикла ввода настроек (рис. 2).

В процессе настройки программы пользователь указывает периодичность выполнения цикла мониторинга, адреса электронных почт для оповещения о состоянии объекта. Затем заполняет необходимые поля базы данных системы мониторинга. БД автоматически гене-

рируется программой и состоит из семи таблиц. Структура базы данных представлена на рис. 3. Стрелки на схеме обозначают связанные между собой при помощи ключей-описателей таблицы.

Таблицы «RECEIVERS», «POINTS», «CONV_CONF» содержат информацию о ГНСС-приемнике и пунктах системы геодезического мониторинга. «BASELINES» и «POS_CONF» хранят сведения для выполнения сценариев обработки спутниковых наблюдений. В таблицу «CONV_CONV» следует вносить информацию для автоматического преобразования сырых данных измерений в формат RINEX. Для этого пользователю требуется ввести стандартные настройки конвертера RTKLIB, такие как частоты, на которых работают приемники, формат файла сырых измерений, версия RINEX-файла, используемые системы ГНСС и др.

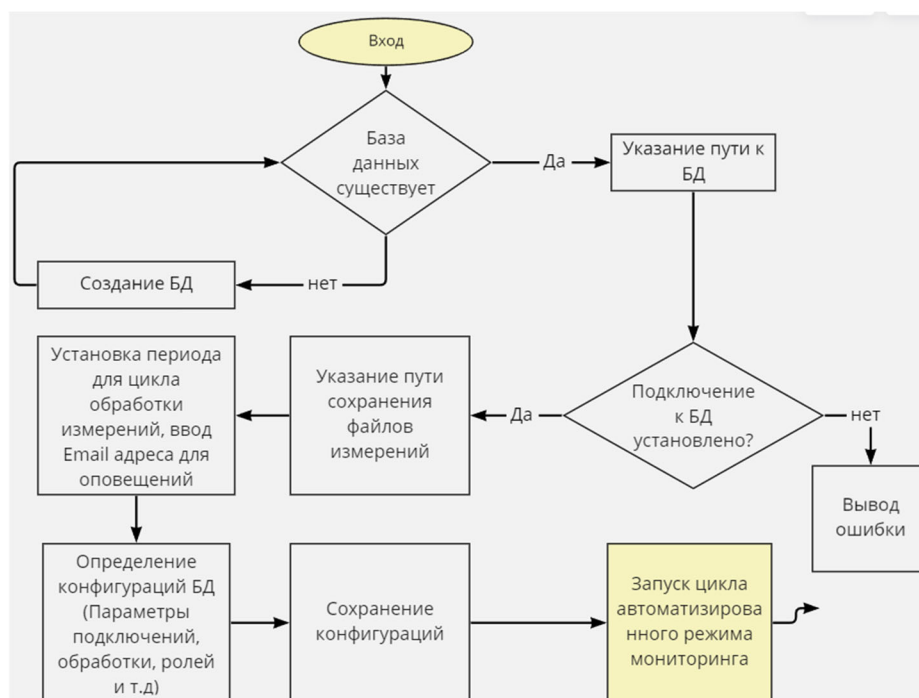


Рис. 2. Блок-схема алгоритма ввода настроек системы ГНСС-мониторинга

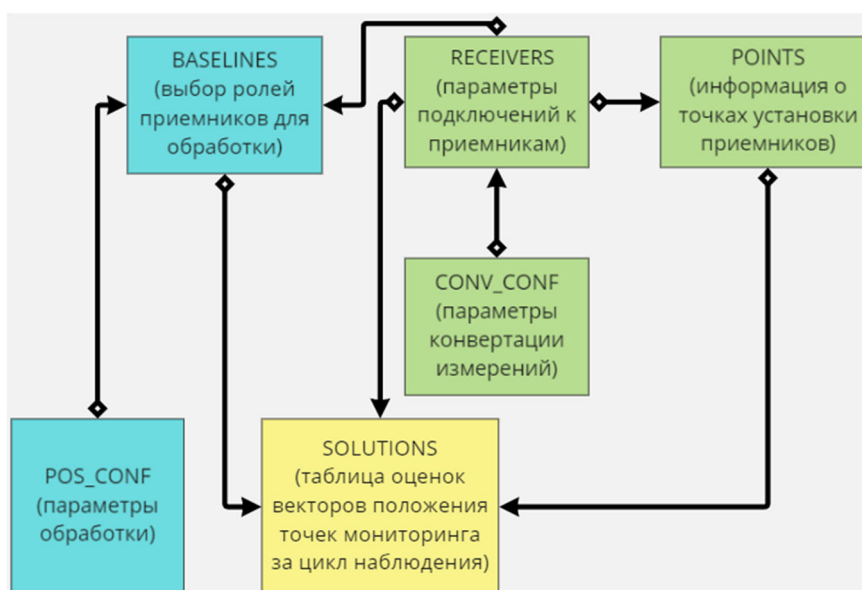


Рис. 3. Структура базы данных системы ГНСС-мониторинга

В таблицу «RECEIVERS» необходимо ввести информацию о параметрах подключения ГНСС-приемников (протоколы NTRIP/TCP-IP/UPD), формат данных ГНСС-измерений и идентификатор типа конвертации из таблицы «CONV_CONF».

Таблица «POINTS» необходима для ввода информации о пункте, над которым закреплено оборудование для спутникового мониторинга. В поля таблицы требуется внести приближен-

ные координаты центра пункта, высоту установки антенны, условное имя пункта, идентификатор установленной антенны, идентификатор используемого ГНСС-приемника.

В таблице «POS_CONF» пользователю требуется ввести параметры обработки спутниковых наблюдений. Это стандартные настройки для модуля RNX2RTKP из библиотеки RTKLIB. В числе этих параметров содержатся: формат выходных данных для координат точки

мониторинга, маска по высоте, используемые в обработке системы и частоты, приближенные координаты базовой станции и др.

Таблица «BASELINES» предназначена для указания роли использующихся в сети мониторинга приемников (база или ровер), а также для возможности назначения базовым линиям отдельных сценариев постобработки. Это необходимо для того, чтобы в сетях геодезического мониторинга, использующих оборудование разных производителей и находящихся в различных условиях приема спутникового сигнала, подбирать индивидуальные параметры обработки для получения удовлетворительных по качеству решений спутникового позиционирования.

Выходом из цикла ввода настроек и инициализации является начало цикла автоматизированного мониторинга с заданной перио-

дичностью. Подробную структуру базы данных Moncenter можно изучить по UML-схеме, которая представлена в виде файлов программы Power designer 16.6 [17].

Цикл автоматизированного мониторинга

После инициализации пользователь может запустить автоматический режим спутникового мониторинга. В процессе выполнения цикла реализуются заданные в БД сценарии сбора и обработки ГНСС-измерений. С заданной пользователем периодичностью программа наполняет таблицы базы данных о результатах мониторинга и оповещает о состоянии объекта. На рис. 4 представлена блок-схема реализованного алгоритма спутникового мониторинга в программе Moncenter.

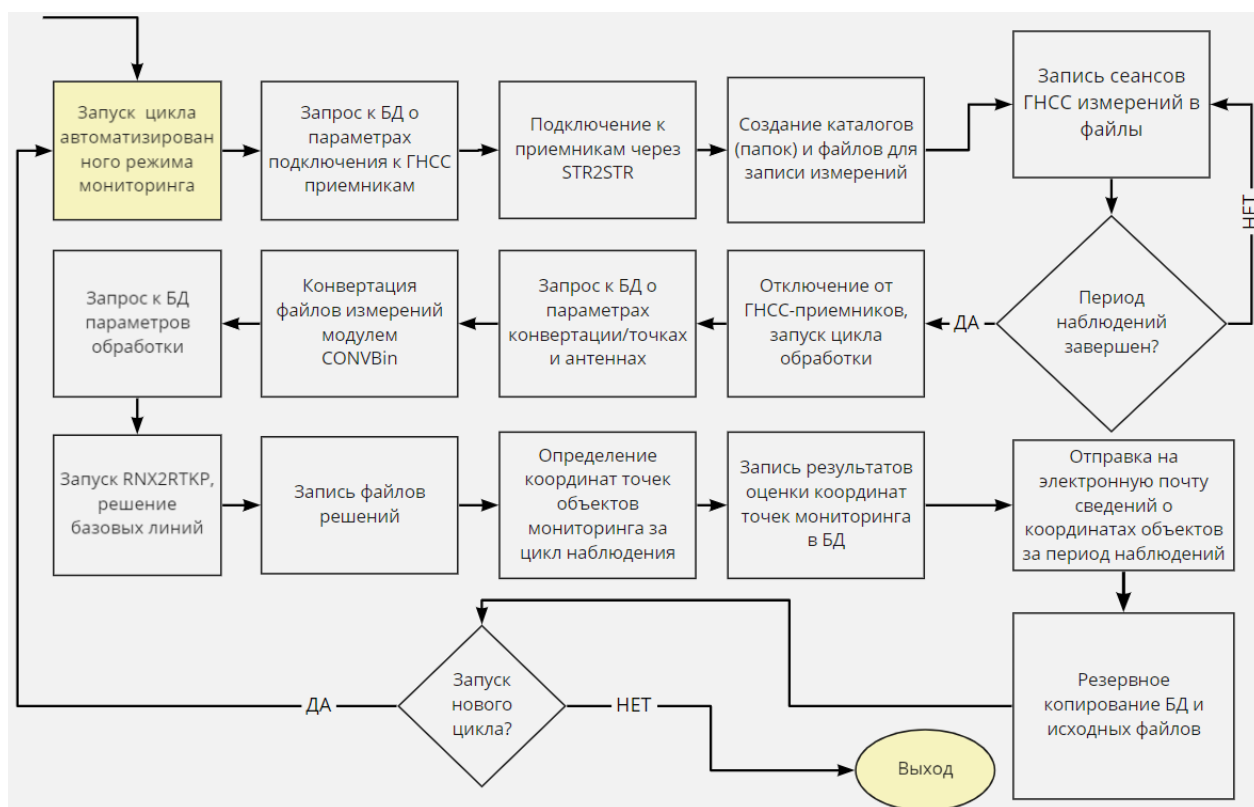


Рис. 4. Блок-схема алгоритма процедуры автоматизированного мониторинга

В цикле спутникового мониторинга для обработки измерений используется модуль RNX2RTKP в режиме «статика». RNX2RTKP применяет фильтр Калмана для оценки координат вектора базовой линии. Поэтому в результате решения навигационной задачи на

каждый момент наблюдений определяются интегральные значения координат, и в качестве оценки вектора состояния пункта мониторинга следует использовать последнюю запись в файле результата обработки измерений «.pos». Однако выбор такого решения не все-

гда бывает верным, особенно при наличии в измерениях срыва счета фазовых циклов. Для выбора значений координат в Moncenter используется наименьшая сумма стандартных отклонений по всем компонентам БЛ в течение сеанса СН.

Выбранные координаты станции записываются в таблицу "SOLUTIONS" для каждой точки спутникового мониторинга. Дополнительно указывается СКО координат на момент выбранного решения, продолжительность сеанса спутниковых наблюдений, идентификатор обработанной базовой линии из таблицы "BASELINES", дата, статус решения (фиксированное/плавающее), количество наблюдаемых спутников в момент выбранного решения, отношение дисперсий, идентификаторы приемника и точки мониторинга. В этой таблице дополнительно прописывается путь к файлу постобработки. Это нужно для того, чтобы пользователь имел возможность получить детальный отчет об обработке за цикл мониторинга. Восстановление конфигурации обработки осуществляется через обращение к таблице "POS_CONF".

Минимальный состав оборудования и порядок создания пользовательской станции ГНСС-мониторинга

Составляющей проекта является открытый малобюджетный ГНСС-датчик. Устройство имеет следующие характеристики:

- диапазон рабочих температур от минус 40 °С до плюс 50 °С;
- средняя продолжительность суточного сеанса фазовых измерений на средних широтах – 5 часов;
- предельная дальность связи на открытой местности 7 км.

Для создания одночастотной базовой станции пользователю требуется приобрести следующий состав компонентов: один фазовый ГНСС-модуль Ublox NEO-m8p (возможны варианты подключения других ГНСС-плат) [18]; два модуля LoRa SX1263 [19]; один микроконтроллер Wemos d1 mini pro [20]; один микроконтроллер attiny 85 [21]; два ионистора емкостью 300 Ф; один корпус габаритами не менее 55 x 146 x 220 мм, имеющий класс защиты не менее IP67; одну солнечную панель на 12 В,

мощностью не менее 30 Вт; одну фазированную геодезическую антенну; один понижающий DC-DC преобразователь с 12 В на 5 В; один микроконтроллер Ruspberry/Orange/Banana Pi; один антенный кабель TNC-TNC; одну карту памяти на 32 Гб.

Пользователю также потребуется ряд дополнительных компонентов (светодиоды, коннекторы), перечень которых представлен в описании [22].

Общий порядок действий для создания пользовательской ГНСС-станции геодезического мониторинга следующий:

- заказ печатной платы управления питанием на attiny 85 [23] (контроллер питания), коммуникационной платы для ГНСС-модуля [24], плат балансировки заряда ионистров [25] (либо самостоятельная установка всех необходимых чипов на универсальных монтажных платах, согласно предложенным схемам);
- монтаж чипов attiny 85 и Ublox NEO-m8p на соответствующих печатных платах;
- монтаж печатных плат и компонентов внутри корпуса согласно схеме [22];
- установка программного обеспечения на контроллеры attiny 85, Wemos [23, 26];
- монтаж станции на пункте геодезического мониторинга;
- конфигурирование ГНСС-станции при помощи веб-интерфейса;
- установка OS Linux на Ruspberry/Orange/Banana Pi;
- установка ПО Moncenter на контроллер [3];
- установка модуля LoRa sx1263 на Ruspberry/Orange/Banana Pi;
- введение настроек подключения, конвертации, обработки, оповещения и резервного копирования в БД Moncenter;
- запуск системы мониторинга.

Ориентировочная стоимость комплекта компонентов оценивается в 350 \$ на момент публикации. В датчике используется одночастотный 72-канальный ГНСС-модуль Ublox NEO m8p. Пользователь может по своему усмотрению установить другой фазовый ГНСС-приемник. Однако для этого потребуется изменение количества элементов питания, увеличение мощности солнечной панели и корректировка параметров в модуле управления питанием Attiny85.

Результаты тестирования программы Moncenter и прототипа датчика ГНСС-мониторинга

При тестировании программного комплекса Moncenter проводился мониторинг стабильности плиты перекрытия на крыше лабораторного корпуса СГУГиТ с 04.07.2020 по 23.04.2021. В состав сети мониторинга входил один ГНСС-датчик (прототип), установленный на перекрытие, и базовая станция IGS NVSK, расположенная на расстоянии 5 км от точки мониторинга. На пункте мониторинга использовался следующий набор оборудования: антенна Ashtech ASH&, одночастотный ГНСС-модуль Ublox NEO m8n-001. Для коммуникации использовался WIFI модуль Wemos d1 mini pro. Программа мониторинга исполнялась на микроконтроллере Raspberry pi3.

Конструкция закрепления центра позволяла фиксировать перемещение перекрытия только по высоте. Колебания в плане могли достигать нескольких миллиметров из-за сильных ветровых нагрузок (выявлено в процессе тестирования). Сеансы спутниковых наблюдений получились прерывистыми и имели малую продолжительность из-за подключения датчика к солнечной панели, то есть сеанс наблюдений зависел от продолжи-

тельности солнечного дня. Общее количество сеансов измерений за период мониторинга составило 238. Средняя продолжительность сеанса 5 часов. При этом отдельные сессии могли иметь длительность менее 10 минут.

В результате мониторинга стабильности перекрытия лабораторного корпуса СГУГиТ значимых деформаций не выявлено. Обработка базовых линий выполнялась с настройками, заданными по умолчанию в RNX2RTKP для режима статических измерений (табл. 1). Оценка стабильности проведена со среднеквадратической ошибкой по высоте 11 мм (рис. 5). Из обработки исключены сеансы, продолжительность которых составила менее 40 минут. Количество исключенных сеансов из-за малой продолжительности – 25. Среднеквадратическая ошибка мониторинга по коротким, т. е. исключенных, сеансам наблюдений составила 10 см. Также отбракованы два сеанса по правилу 3 Сигма с продолжительностью более 40 минут (07.08.2020, 22.11.2020). Полученный результат авторы считают приемлемым для малобюджетной ГНСС-станции, использующей модуль Ublox M8n. Похожих результатов мониторинга добивались и другие исследователи без применения каких-либо фильтров и специальной обработки сигналов [2].

Таблица 1

Конфигурации обработки спутниковых измерений в RTKLIB

Параметр	Значение
Частота записи	1 с (1 Hz)
Маска по высоте	10°
Используемые системы	GPS
Используемые частоты	L1
Тип эфемерид и поправок часов	Бортовые
Разрешение неоднозначностей	Продолжительное
Максимальное значение Ratio для определения статуса фиксированного решения	3.0
Тип решения	Прямой фильтр Калмана
Ионосферная/тропосферная коррекция	нет

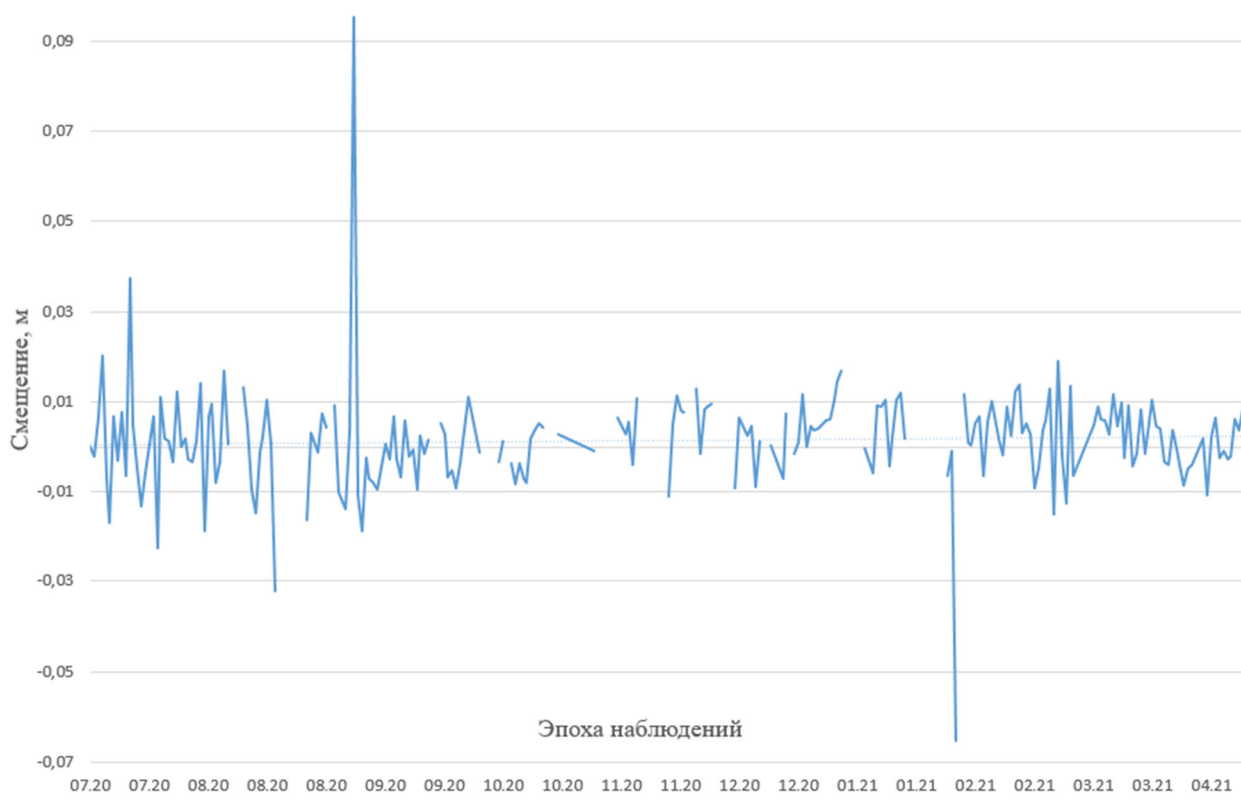


Рис. 5. Изменение по высоте точки мониторинга в ходе тестирования программы Moncenter

Заклучение

Представленная статья содержит краткое описание алгоритмов для проведения геодезического спутникового мониторинга, реализованных в программном комплексе Moncenter. Программный комплекс развивается под концепцией открытого исходного кода. Он может использоваться для мониторинга долгопериодических деформаций в конструкциях инженерных сооружений и земной коре при помощи малобюджетной спутниковой аппаратуры.

В статье представлены первые результаты применения комплекса Moncenter. Программа показала стабильную работу в течение 10 месяцев мониторинга. Спутниковый мониторинг при помощи малобюджетного ГНСС-датчика

осуществим с ошибкой 11 мм на сеансах малой продолжительности. Разработанный прототип ГНСС-датчика и комплекс для геодезического мониторинга Moncenter может быть полезен исследователям и инженерам, занимающимся разработкой алгоритмов анализа состояния инженерных сооружений. Прототип позволяет выполнять автоматический ГНСС-мониторинг в труднодоступных условиях, при низких температурах окружающего воздуха и отсутствии линий электропитания и связи. Разработки имеют открытую архитектуру, и желающие могут самостоятельно создать станцию ГНСС-мониторинга. Коллектив разработчиков Moncenter приглашает всех желающих к сотрудничеству в развитии проекта.

Исследования выполнены при поддержке проекта «ГЕОТЕХ-КВАНТ» № НИОКТР 121111600209-4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lipatnikov L. A., Shevchuk S. O. Cost effective precise positioning with GNSS // FIG. – 2019. – FIG publication no. 74.
2. Zhang L., Schwieger V. Investigation of a L1-optimized choke ring ground plane for a low-cost GPS receiver-system // Journal of Applied Geodesy. – 2018. – Vol. 12. № 1. – P. 55–64. – DOI 10.1515/jag-2017-0026.

3. Mamaev D. Moncenter [Electronic resource]. – Mode of access: <https://github.com/DanielMamaev/MonCenter>.
4. Инжиниринговый центр ГФК. Реализованные проекты [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.icentre-gfk.ru/projects/realpro.htm> (accessed 21.08.2022).
5. Jäger R., González F. GNSS/LPS Based Online Control and Alarm System (GOCA) – Mathematical Models and Technical Realization of a System for Natural and Geotechnical Deformation Monitoring and Hazard Prevention // *Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles* / eds. F. Sansò, A.J. Gil. – Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. – P. 293–303.
6. About – Position++ [Electronic resource]. – Mode of access: <https://positionplusplus.com/about/> (accessed 21.08.2022).
7. Takasu T., Yasuda A. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB // *International Symposium on GPS/GNSS, International Convention Center Jeju* (November 4–6, 2009). – Korea.
8. Komac M., Holley R., Mahapatra P. et al. Coupling of GPS/GNSS and radar interferometric data for a 3D surface displacement monitoring of landslides // *Landslides*. – 2015. – Vol. 12, No. 2. – P. 241–257. – DOI 10.1007/s10346-014-0482-0.
9. PyRate [Electronic resource]. – Mode of access: <https://github.com/GeoscienceAustralia/PyRate> (accessed 23.08.2022).
10. Bos M. S., Fernandes R. M. S., Williams S. D. P. et al. Fast error analysis of continuous GPS observations // *Journal of Geodesy*. – 2008. – Vol. 82, No. 3. – P. 157–166. – DOI 10.1007/s00190-007-0165-x.
11. Bos M. S., Fernandes R. M. S., Williams S. D. P. et al. Fast error analysis of continuous GNSS observations with missing data // *Journal of Geodesy*. – 2013. – Vol. 87, No. 4. – P. 351–360. – DOI 10.1007/s00190-012-0605-0.
12. SNAP survey network adjustment package – 2022 [Electronic resource]. – Mode of access: <https://github.com/linz/snap>.
13. Black J. Pycalculix: Python 3 library to build and solve finite element analysis (FEA) models in Calculix [Electronic resource]. – Mode of access: <http://justinablack.com/pycalculix/>.
14. Barbeau S. Awesome-GNSS [Electronic resource]. – Mode of access: <https://github.com/barbeau/awesome-gnss>.
15. Geoscience Australia [Electronic resource]. – Mode of access: <https://github.com/GeoscienceAustralia> (дата обращения: 23.08.2022).
16. Engel P. Deformation monitoring in the internet of things. Implementation of a multi-platform software package for modern sensor networks in engineering geodesy // *INGEO 2017 – 7th International Conference on Engineering Surveying* (October 18–20, 2017). – Portugal, Lisbon. – P. 8.
17. Mamaev D. MonCenter/doc at master [Electronic resource] // GitHub. – Mode of access: <https://github.com/DanielMamaev/MonCenter> (дата обращения: 30.08.2022)
18. NEO-M8P_DataSheet_UBX-15016656 [Electronic resource]. – Mode of access: https://content.ublox.com/sites/default/files/NEO-M8P_DataSheet_UBX-15016656.pdf (accessed 21.08.2022).
19. SEMTECH SX1261/2 Long Range, Low Power, sub-GHz RF Transceiver [Electronic resource]. – Mode of access: <https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R000000Un7F/yT.fKdAr9ZAo3cJLc4F2cBdUsMftpT2vsOICP7NmvMo> (accessed 21.08.2022).
20. D1 mini Pro – WEMOS documentation [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.wemos.cc/en/latest/d1/d1_mini_pro.html (accessed 21.08.2022).
21. ATtiny85 | Microchip Technology [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATtiny85> (accessed 21.08.2022).
22. BuzzLiner/v2 [Electronic resource] // GitHub. – Mode of access: <https://github.com/DanielMamaev/BuzzLiner> (accessed 30.08.2022).
23. Mamaev D. BuzzLiner. Power shield [Electronic resource]. – Mode of access: <https://github.com/DanielMamaev/BuzzLiner/tree/main/v2/Power%20shield> (accessed 21.08.2022).
24. Mamaev D. BuzzLiner. Ublox shield [Electronic resource]. – Mode of access: <https://github.com/DanielMamaev/BuzzLiner/tree/main/v2/Ublox%20shield> (accessed 21.08.2022).
25. Mamaev D. BuzzLiner/v2/BMS for super capacitor at main [Electronic resource] // GitHub. – Mode of access: <https://github.com/DanielMamaev/BuzzLiner> (accessed 30.08.2022).
26. Mamaev D. BuzzLiner/v2/Ublox shield at main [Electronic resource] // GitHub. – Mode of access: <https://github.com/DanielMamaev/BuzzLiner> (accessed 30.08.2022).

Об авторах

Александр Петрович Карпик – доктор технических наук, профессор, ректор.

Артем Владимирович Мареев – кандидат технических наук, доцент кафедры космической и физической геодезии.

Даниил Станиславович Мамаев – инженер кафедры космической и физической геодезии.

Получено 05.09.2022

© А. П. Карпик, А. В. Мареев, Д. С. Мамаев, 2022

Free software for geodetic monitoring Moncenter

A. P. Karpik¹*, A. V. Mareev¹, D. S. Mamaev¹

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

* e-mail: rector@ssga.ru

Abstract. Software packages and open source libraries are an important element in the effective development of applied science. They are also important as components of methodological and educational support for applied sciences, together with regulatory documents and educational literature. The article is devoted to the development of an open source project for satellite geodetic monitoring of engineering structures and the natural environment. The purpose of the article is to demonstrate the algorithms implemented in the Moncenter complex, the hardware for the prototype of an autonomous and low-budget GNSS sensor. An algorithm for creating a custom single-frequency base station for geodetic monitoring is presented. The results of the first testing of the developed geodetic monitoring system are presented. The error of episodic monitoring of height stability for eight months was 11 mm.

Keywords: geodetic monitoring of engineering structures, GNSS, RTKLIB, open source, geodynamics

REFERENCES

1. Lipatnikov, L. A., & Shevchuk, S. O. (2019). Cost effective precise positioning with GNSS. *FIG*. FIG publication no. 74.
2. Zhang, L., & Schwieger, V. (2018). Investigation of a L1-optimized choke ring ground plane for a low-cost GPS receiver-system. *Journal of Applied Geodesy*, 12(1), 55–64. doi: 10.1515/jag-2017-0026.
3. Mamaev, D. (n. d.). Moncenter. Retrieved from <https://github.com/DanielMamaev/MonCenter>.
4. GFC Engineering Center. Completed project. (n. d.). Retrieved from <https://www.icentre-gfk.ru/projects/realpro.htm> (accessed August 21, 2022).
5. Jäger, R., & González, F. (2006). GNSS/LPS Based Online Control and Alarm System (GOCA) – Mathematical Models and Technical Realization of a System for Natural and Geotechnical Deformation Monitoring and Hazard Prevention. *Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles* (pp. 293–303). F. Sansò & A. J. Gil (Eds.). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
6. About – Position++. (n. d.). Retrieved from <https://positionplusplus.com/about/> (accessed August 21, 2022).
7. Takasu, T., & Yasuda, A. (2009). Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. *International Symposium on GPS/GNSS, International Convention Center Jeju, Korea*.
8. Komac, M., Holley, R., Mahapatra, P., & et al. (2015). Coupling of GPS/GNSS and radar interferometric data for a 3D surface displacement monitoring of landslides. *Landslides*, 12(2), 241–257. doi: 10.1007/s10346-014-0482-0.
9. PyRate. (n. d.). Retrieved from <https://github.com/GeoscienceAustralia/PyRate> (accessed August 23, 2022).
10. Bos, M. S., Fernandes, R. M. S., Williams, S. D. P., & et al. (2008). Fast error analysis of continuous GPS observations. *Journal of Geodesy*, 82(3), 157–166. doi: 10.1007/s00190-007-0165-x.
11. Bos, M. S., Fernandes, R. M. S., Williams, S. D. P., & et al. (2013). Fast error analysis of continuous GNSS observations with missing data. *Journal of Geodesy*, 87(4), 351–360. doi: 10.1007/s00190-012-0605-0.

12. SNAP survey network adjustment package – 2022. (n. d.). Retrieved from <https://github.com/linz/snap>.
13. Black, J. (n. d.). Pycalculix: Python 3 library to build and solve finite element analysis (FEA) models in Calculix. Retrieved from <http://justinablack.com/pycalculix/>.
14. Barbeau, S. (n. d.). Awesome-GNSS. Retrieved from <https://github.com/barbeau/awesome-gnss>.
15. Geoscience Australia. Retrieved from <https://github.com/GeoscienceAustralia> (accessed August 23, 2022).
16. Engel, P. (2017). Deformation monitoring in the internet of things. Implementation of a multi-platform software package for modern sensor networks in engineering geodesy. *INGEO 2017 – 7th International Conference on Engineering Surveying* (P. 8). Portugal, Lisbon.
17. Mamaev, D. (n. d.). MonCenter/doc at master. GitHub. Retrieved from <https://github.com/DanielMamaev/MonCenter> (accessed August 30, 2022).
18. NEO-M8P_DataSheet_UBX-15016656. (n. d.). Retrieved from https://content.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8P_DataSheet_UBX-15016656.pdf (accessed August 21, 2022).
19. SEMTECH SX1261/2 Long Range, Low Power, sub-GHz RF Transceiver. (n. d.). Retrieved from <https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R000000Un7F/yT.fKdAr9ZAo3cJLc4F2cBdUsMftpT2vsOICP7NmVmo> (accessed August 21, 2022).
20. D1 mini Pro – WEMOS documentation. (n. d.). Retrieved from https://www.wemos.cc/en/latest/d1/d1_mini_pro.html (accessed August 21, 2022).
21. ATtiny85 | Microchip Technology. (n. d.). Retrieved from <https://www.microchip.com/en-us/product/ATtiny85> (accessed August 21, 2022).
22. BuzzLiner/v2. (n. d.). GitHub. Retrieved from <https://github.com/DanielMamaev/BuzzLiner> (accessed August 30, 2022).
23. Mamaev, D. (n. d.). BuzzLiner. Power shield. Retrieved from <https://github.com/DanielMamaev/BuzzLiner/tree/main/v2/Power%20shield> (accessed August 21, 2022).
24. Mamaev, D. (n. d.). BuzzLiner. Ublox shield. Retrieved from <https://github.com/DanielMamaev/BuzzLiner/tree/main/v2/Ublox%20shield> (accessed August 21, 2022).
25. Mamaev, D. (n. d.). BuzzLiner/v2/BMS for super capacitor at main. GitHub. Retrieved from <https://github.com/DanielMamaev/BuzzLiner> (accessed August 30, 2022).
26. Mamaev, D. (n. d.). BuzzLiner/v2/Ublox shield at main. GitHub. Retrieved from <https://github.com/DanielMamaev/BuzzLiner> (accessed August 30, 2022).

Author details

Alexander P. Karpik – D. Sc., Professor, Rector.

Artem V. Mareev – Ph. D., Associate Professor, Department of Space and Physical Geodesy.

Daniil S. Mamaev – Engineer, Department of Space and Physical Geodesy.

Received 05.09.2022

© *A. P. Karpik, A. V. Mareev, D. S. Mamaev, 2022*