

А. В. Мареев¹✉, Д. С. Мамаев¹, В. Р. Янгальшев¹, Л. А. Каргина¹

Датчики для малобюджетных систем наблюдений геодезического мониторинга

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: a.v.mareev@sgugit.ru

Аннотация. В условиях старения инфраструктуры и роста геотехнических рисков, особенно в регионах с многолетнемерзлыми грунтами, необходимость в доступных системах геодезического мониторинга становится критической. Однако стоимость профессиональных решений (роботизированных тахеометров, GNSS-станций, цифровых инклинометров) достигает нескольких сотен тысяч рублей за узел, что делает их недоступными для большинства хозяйствующих субъектов. В статье представлены результаты разработки трех малобюджетных прототипов: цифрового видеоинклинометра на базе цилиндрической ампулы и камеры ESP32-CAM; лазерной системы наблюдений на опорном луче для измерения вертикальных смещений; автономной двухчастотной GNSS-станции на базе модуля u-blox ZED-F9P с постобработкой в RTKLIB и Bernese. Показано, что, несмотря на пока меньшую точность по сравнению с коммерческими аналогами, прототипы обеспечивают достаточное качество для задач раннего выявления деформаций. Их потенциал может быть существенно усилен за счет улучшения алгоритмов обработки изображений, стабилизации лазерного излучения и применения 3D-печатных антенн с подавлением многолучевости. Все аппаратные и программные компоненты разработаны на принципах открытой архитектуры и доступны под свободной лицензией. Предложенный подход открывает путь к массовому внедрению геодезического мониторинга – по аналогии с системами противопожарной безопасности.

Ключевые слова: геодезический мониторинг, малобюджетные датчики, видеоинклинометр, лазерный опорный луч, GNSS-наблюдения, открытые решения, MonCenterLib, автоматизация измерений, деформационный контроль

A. V. Mareev¹✉, D. S. Mamaev¹, V. R. Yangalyshev¹, L. A. Kargin¹

Sensors for the development of low-budget geodetic monitoring observation systems

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: a.v.mareev@sgugit.ru

Annotation. With aging infrastructure and increasing geotechnical risks, especially in regions with permafrost, the need for affordable geodetic monitoring systems is becoming critical. However, the cost of professional solutions (robotic total stations, GNSS stations, digital inclinometers) reaches several hundred thousand rubles per node, which makes them inaccessible to most business entities. The article presents the results of the development of three low-budget prototypes: a digital video clinometer based on a cylindrical ampoule and an ESP32-CAM camera.; a laser observation system on a reference beam for measuring vertical displacements; an autonomous dual-frequency GNSS station based on the u-blox ZED-F9P module with RTKLIB/Bernese post-processing. It is shown that, despite the lower accuracy compared to commercial analogues, these solutions provide sufficient quality for the tasks of early detection of deformations. Their potential can be significantly enhanced

by improving image processing algorithms, laser radiation stabilization, and the use of 3D-printed multipath suppression antennas. All hardware and software components are developed on the principles of an open architecture and are available under a free license. The proposed approach paves the way for the mass implementation of geodetic monitoring, similar to fire safety systems, and reduces barriers to the participation of a wide range of users in ensuring the engineering stability of facilities.

Keywords: geodetic monitoring, low-budget sensors, video clinometer, laser reference beam, GNSS observations, open solutions, MonCenterLib, measurement automation, deformation control

Введение

Геодезический мониторинг играет важную роль в обеспечении безопасной эксплуатации зданий, инженерных сооружений и природных объектов, особенно в условиях растущих геотехнических и геодинамических рисков. В Российской Федерации около 20 % жилищного фонда составляют здания массовой советской застройки, до 80 % из которых нуждаются в физическом обновлении, а темпы реновации явно отстают от скорости накопления износа [1, 2]. Аналогичная ситуация наблюдается в промышленной сфере: значительная часть инфраструктуры, включая гидроэлектростанции, мосты, тоннели и промышленные комплексы, нередко эксплуатируется сверх проектного срока, что повышает вероятность аварийных ситуаций.

К этим вызовам добавляются климатические факторы – в частности, деградация многолетнемерзлых грунтов в регионах Крайнего Севера, где сосредоточено около 75 % объемов добычи нефти и газа в России. По оценкам [3], совокупный экономический ущерб от этих процессов к 2050 г. может достичь 5 трлн руб. Несмотря на очевидную необходимость, системы непрерывного геодезического мониторинга остаются недоступными для большинства хозяйствующих субъектов. Стоимость одного функционального узла (роботизированный тахеометр, высокоточный инклинометр или GNSS-станция) достигает сотен тысяч рублей, а комплексное решение для объекта – десятков миллионов рублей. Для сравнения, широко распространенные системы противопожарной безопасности (дымовые и тепловые датчики, GSM-оповещатели, модульные контроллеры) стали массовыми благодаря низкой стоимости, открытости архитектур и стандартизации компонентов. Их можно быстро развернуть и обслуживать силами персонала без специального образования, а также масштабировать под объекты любого класса – от отдельного помещения до крупного промышленного комплекса. Такой уровень доступности в геодезическом мониторинге пока недостижим, что создает значительный разрыв между уровнем рисков и возможностями их своевременного выявления.

В этой связи особенно актуальными становятся исследования, направленные на создание малобюджетных, но технически надежных решений на основе открытого программного обеспечения и коммерчески доступных микрокомпонентов. Лаборатория автоматического геодезического мониторинга и СГУГиТ [4] ведет системную работу по разработке прототипов доступных измерительных узлов: двухчастотных GNSS-приемников на базе модулей u-blox ZED-F9P и их аналогов; цифровых видеоинклинометров с использованием цилиндрических

уровней и камер ESP32-CAM; лазерно-оптических датчиков вертикальных и горизонтальных смещений, реализованных на основе анализа расходимости лазерного пучка; а также свободной библиотеки MonCenterLib, обеспечивающей обработку данных в режиме, близком к реальному времени, на стандартных Linux-серверах и микроконтроллерах.

Интерес к системам, сочетающим лазерные опорные линии и компьютерное зрение, проявляют исследователи по всему миру. В работе [5] предложен лазерный датчик для мониторинга прогибов мостов, обеспечивающий точность на уровне долей миллиметра; в работе [6] экспериментально подтверждена применимость подобных решений в реальных условиях гражданской инфраструктуры. Обзорные работы [7, 8] показывают, что ключевыми вызовами остаются устойчивость к изменяющемуся освещению, вибрациям и атмосферной турбулентности, а открытые библиотеки (в первую очередь OpenCV) играют решающую роль в повышении доступности таких технологий. Отдельного внимания заслуживают методы оценки расстояния по расходимости лазерного луча: в работе [9] продемонстрирована принципиальная возможность измерения дальности с помощью лазерного указателя и веб-камеры, а в работе [10] показана возможность трекинга в режиме реального времени с параллельной обработкой нескольких пятен. Эти результаты подтверждают, что интеграция лазерных систем наблюдений на опорном лазерном луче и методов технического зрения представляет собой перспективное и достаточно зрелое направление, готовое к переходу от лабораторных прототипов к промышленному внедрению.

Настоящая статья обобщает ключевые результаты указанных исследований и демонстрирует, как комбинация открытых аппаратных платформ, алгоритмов компьютерного зрения и GNSS-обработки позволяет снизить стоимость одного наблюдательного узла до 10–30 тыс. руб., что в перспективе позволит повысить плотность инструментального контроля и обеспечить автоматизированный мониторинг в автономных условиях – в том числе при экстремальных температурах. Это создает предпосылки для перехода от отдельных дорогостоящих измерителей к массовому, повсеместному геодезическому мониторингу – по аналогии с противопожарной безопасностью, когда каждый объект получает техническую возможность раннего выявления угрозы и своевременного оповещения специализированных служб.

Методы и материалы

Цифровой видеоинклинометр (ВИМ) реализует неинвазивный подход к измерению углов наклона с использованием простых компонентов и алгоритмов компьютерного зрения. В качестве чувствительного элемента применяется цилиндрическая спиртовая ампула с пузырьком, жестко закрепленная на основании объекта мониторинга. Наблюдение за положением пузырька осуществляется с помощью недорогой цифровой видеокамеры (например, ESP32-CAM с сенсором OV2640 – 2 Мпикс). Обработка видеопотока выполняется с помощью библиотеки OpenCV: применяются методы бинаризации, контурного анализа и расчета центраида пузырька.

Для повышения стабильности показаний используется температурный датчик (DS18B20) и теплозащитная пластина из акрилового стекла, снижающая влияние конвективных потоков и внешних температурных колебаний. Точность измерений текущего прототипа зависит от измеряемого диапазона углов и температурных условий:

- в диапазоне $\pm 200'' - \pm 3''$;
- от $\pm 200''$ до $\pm 400''$ – ошибка возрастает до $\approx 15''$;
- от $\pm 400''$ до $\pm 600''$ – ошибка достигает 25–30''.

Температурная стабильность устройства на текущем этапе оценивается в $\approx 3''/^\circ\text{C}$. Характеристики точности и температурного дрейфа приблизительно втрое хуже, чем у промышленного цифрового клинометра Leica Nivel 220. Тем не менее, предварительные исследования показывают, что за счет совершенствования алгоритмов обработки изображений – в частности, введения коррекции дрейфа по градиенту яркости, применения модели теплового расширения корпуса и компенсации нелинейности шкалы ампулы – в перспективе можно достичь уровня температурной устойчивости и точности, сопоставимого с характеристиками коммерческих приборов зарубежного производства. Также планируется применение калибровки с учетом локального градиента яркости в зоне крепления ампулы, что теоретически позволит расширить эффективный диапазон точных измерений.

Общая стоимость компонентов составляет около 10 000 руб., включая камеру, микроконтроллер, датчик температуры, оптические элементы, крепеж и корпус. Это более чем на порядок ниже стоимости коммерческих аналогов (например, Leica Nivel 220 – от 400 000 руб.).

Ключевыми ограничениями текущего прототипа являются зависимость показаний от температуры и ее градиентов (воздействие на размер пузырька и геометрию ампулы), а также нелинейность шкалы ампулы вблизи краев, ограничивающая эффективный диапазон точных измерений.

Результат

Система наблюдений на опорном луче для геодезического мониторинга основана на методе тригонометрического нивелирования с использованием стабилизированного лазерного луча в качестве опорной линии. В состав установки входят два модуля: измерительный модуль, включающий полупроводниковый лазер (длина волны 650 нм, мощность 50 мВт) и цифровой инклинометр, фиксирующий его наклон относительно горизонта и реперный модуль, содержащий матовый экран и видеокамеру (ESP32-CAM + OV2640), отслеживающую смещение проекции лазерного пятна.

Изменение высоты между модулями определяется по формуле:

$$\Delta H = D_0 \cdot \sin(\alpha_0 + \Delta\alpha) + \Delta s \cdot \cos(\alpha_0 + \Delta\alpha), \quad (1)$$

где D_0 , α_0 – начальная наклонная дальность и угол наклона, $\Delta\alpha$ – изменение угла по данным инклинометра, Δs – смещение пятна на экране. Для повышения устой-

чивости к внешнему освещению используется поляризационный фильтр и подсветка на светодиодной ленте [4].

Эксперименты показали следующие характеристики точности измерения вертикальных смещений:

- на расстоянии 15 м – СКО $\approx 0,6$ мм (априорная оценка – 0,9 мм);
- на расстоянии 30 м – СКО $\approx 1,3$ мм (априорная – 1,1 мм);
- на расстоянии 50 м – СКО $\approx 2,1$ мм (априорная – 1,4 мм) [4].

Точность определения смещения лазерного пятна на экране оценивается в 0,3 мм. Основной вклад в погрешность вносят калибровка камеры инклинометрического модуля и изменение температуры в процессе измерений. Полная система (оба модуля) обходится примерно в 10–12 тыс. руб., что на порядок дешевле аналогичных коммерческих систем (например, Trimble Laser-TiltMeter – от 1 000 \$).

Прибор имеет следующие технические ограничения:

- расстояние между модулями – до 50 м (при прямой видимости и слабой турбулентности);
- измеряемые смещения – до 50 мм;
- углы наклона лазерного луча – до $\pm 2^\circ$ относительно горизонта;
- требует прямой оптической видимости и устойчивого закрепления;
- чувствителен к неравномерной освещенности.

Обсуждение

Малобюджетный GNSS-приемник MonCenter GNSS Receiver (MGR) представляет собой модульную конструкцию, включающую микроконтроллер ESP32, плату с GNSS-модулем (u-blox ZED-F9P, Simple ST901P-L1105, NEO-M8N), автономную систему энергоснабжения на базе суперконденсаторов и солнечной панели, а также средства связи (Wi-Fi, LoRa). Приемник поддерживает запись «сырых» фазовых и кодовых измерений в формате RINEX, их преобразование и обработку (в том числе относительным фазовым методом) с использованием встроенных модулей на базе RTKLIB и собственной библиотеки MonCenterLib [4].

Система обеспечивает автономную работу при температурах до -40°C без подключения к внешним сетям электропитания и связи. В ходе экспериментальных исследований установлено следующее:

- при обработке в режиме статики с использованием RTKLIB: на коротких базовых линиях (< 3 км) – СКО по высоте 7–8 мм (для ZED-F9P);
- на 8-километровой линии – СКО по высоте 5,7 мм [4];
- при обработке «сырых» измерений в программе Bernese GNSS Software (версия 5.2) точность определения относительных смещений на коротких линиях достигает ≈ 2 мм (3D СКО), что сопоставимо с характеристиками геодезических приемников.

Таким образом, аппаратная часть MGR, несмотря на низкую стоимость, способна выполнять измерения, удовлетворяющие требованиям высокоточного мониторинга при условии соответствующей постобработки. Ориентировочная стоимость

комплекта компонентов составляет порядка 30–35 тыс. руб. на полную автономную станцию – против 400–900 тыс. руб. за коммерческую станцию геодезического класса.

Эксплуатационные параметры текущего прототипа:

- рабочая температура: от -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$ (без активного обогрева);
- длительность непрерывного цикла наблюдений: до 5 ч/сут (при питании от солнечной панели на средних широтах);
- дальность связи: до 7 км по LoRa на открытой местности;
- поддерживаемые GNSS: GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou (L1/L2); частота записи данных: до 1 Гц (для фазовых измерений); собственное энергопотребление: < 1 Вт в активном режиме.

Заключение

Представленные в статье прототипы малобюджетных геодезических датчиков – цифрового видеоинклинометра, системы наблюдений на опорном лазерном луче и автономной GNSS-станции – демонстрируют принципиальную возможность снижения стоимости наблюдательного узла на порядок (до 10–35 тыс. руб.) при сохранении достаточного уровня точности для ряда практических задач мониторинга. Хотя текущие характеристики – особенно в части температурной стабильности и диапазона высокоточных измерений – пока уступают профессиональным приборам, уже достигнутые результаты (СКО в пределах 0,6–2,1 мм для вертикальных смещений, $\pm 3''$ в центральном диапазоне измерений ВИМ, ≈ 2 мм 3D СКО для относительных GNSS-смещений при постобработке) позволяют с умеренным оптимизмом рассматривать эти решения как основу для массовых систем постоянно действующего геодезического мониторинга. Повышение точностных характеристик представляется потенциально достижимым за счет дальнейшей оптимизации аппаратной и программной составляющих:

- для видеоинклинометра за счет усовершенствования алгоритмов анализа изображений (градиент яркости, компенсация нелинейности шкалы)
- для лазерной системы за счет стабилизации излучателя с применением оптической обратной связи;
- для GNSS-станции за счет применения малобюджетных, но высококачественных антенн (например, печатаемых по технологии «Choke Ring» на 3D-принтере) и алгоритмов подавления многолучевости, что может приблизить точность к параметрам коммерческих геодезических систем.

Ключевое преимущество предлагаемых решений – не только в низкой стоимости, но и в открытой архитектуре: все аппаратные компоненты основаны на коммерчески доступных микрокомпонентах, а программное обеспечение (включая библиотеку MonCenterLib) распространяется под свободной лицензией. Это делает технологии тиражируемыми, адаптируемыми под специфические условия и применимыми за пределами классического геодезического мониторинга – например, в задачах высокоточной навигации, геодинамического и геомеханического контроля, а также при создании распределенных сетей наблюдений в

удаленных регионах.

Широкое внедрение подобных решений может изменить подход к управлению геотехническими рисками: переход от редких «точечных» замеров к повсеместному, непрерывному и автоматизированному контролю – по аналогии с эволюцией систем противопожарной безопасности. При этом снижение «порога вхождения» в технологию открывает возможности для участия малых и средних предприятий, муниципальных служб и даже отдельных заинтересованных граждан в обеспечении инженерной безопасности. Мы призываем научное и инженерное сообщество к совместной доработке, тестированию и адаптации прототипов как в рамках академической кооперации, так и в практических пилотных проектах.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке государственной бюджетной НИР «Автоматический геодезический мониторинг природной среды и инженерных сооружений средствами малобюджетных высокоточных датчиков вертикальных перемещений в условиях Крайнего Севера» (шифр FEFS-2023-0003).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Комплексные методы реконструкции и модернизации массовой жилой застройки / И. В. Чувилова, В. В. Кравченко // Academia. Архитектура и строительство. – 2011. – № 3. – С. 94–100.
2. Волынский В. Э. О необходимости модернизации пятиэтажного типового жилого фонда Российской Федерации // Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – № 4. – С. 71–75.
3. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050 / V. P. Melnikov, V. I. Osipov, A. V. Brouchkov [et al.] // Natural Hazards. – 2022. – Vol. 112, № 1. – P. 231–251. – DOI: 10.1007/s11069-021-05179-6.
4. LoSG-GNSS/About-MonCenter [Электронный ресурс]. – URL: <https://github.com/LoSG-GNSS/About-MonCenter> (дата обращения: 04.08.2024).
5. Vicente M., Gonzalez D., Minguez J. et al. A Novel Laser and Video-Based Displacement Transducer to Monitor Bridge Deflections // Sensors. – 2018. – Vol. 18, № 4. – P. 970. – DOI: 10.3390/s18040970.
6. Brown N., Schumacher T., Vicente M. A. Evaluation of a novel video- and laser-based displacement sensor prototype for civil infrastructure applications // Journal of Civil Structural Health Monitoring. – 2021. – Vol. 11, № 2. – P. 265–281. – DOI: 10.1007/s13349-020-00450-z.
7. Zhuang Y., Chen W., Jin T. et al. A Review of Computer Vision-Based Structural Deformation Monitoring in Field Environments // Sensors. – 2022. – Vol. 22, № 10. – P. 3789. – DOI: 10.3390/s22103789.
8. Ferraris C., Amprimo G., Pettiti G. Computer Vision and Image Processing in Structural Health Monitoring: Overview of Recent Applications // Signals. – 2023. – Vol. 4, № 3. – P. 539–574. – DOI: 10.3390/signals4030029.
9. Portugal-Zambrano C. E., Mena-Chalco J. P. Robust Range Finder Through a Laser Pointer and a Webcam // Electronic Notes in Theoretical Computer Science. – 2011. – Vol. 281. – P. 143–157. – DOI: 10.1016/j.entcs.2011.11.031.
10. Cao J., Chen Y., Yu D. et al. Real-time laser spot detection and tracking system based on parallel multi-target detection and determination algorithm // Review of Scientific Instruments. – 2023. – Vol. 94. – DOI: 10.1063/5.0157141.

© А. В. Мареев, Д. С. Мамаев, В. Р. Янгальшев, Л. А. Каргина, 2026