

Д. А. Аничев^{1✉}, А. М. Астапов¹, Д. А. Баранников¹

Интеллектуальный мониторинг деформаций инженерных сооружений на основе мультисенсорной интеграции (GNSS, роботизированные тахеометры, IoT) и машинного обучения для построения цифровых двойников

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: anichevdmirijg@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается интеллектуальная система мониторинга деформаций инженерных сооружений, основанная на интеграции глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS), роботизированных тахеометров и IoT-сенсоров в единую цифровую платформу. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения точности и оперативности контроля технического состояния мостов, высотных зданий, гидротехнических сооружений и промышленных объектов в условиях возрастающих техногенных нагрузок. Предложен подход к построению цифрового двойника инженерного сооружения с применением методов машинного обучения для прогнозирования деформационных процессов и выявления аномалий. В работе рассмотрена архитектура мультисенсорной системы, методы интеграции разнородных данных и алгоритмы обработки временных рядов. В качестве методов исследования использованы статистический анализ, нейросетевые модели прогнозирования и методы фильтрации GNSS-наблюдений. Полученные результаты показали повышение точности определения деформаций до 15-20 % по сравнению с использованием отдельных измерительных технологий. Разработанная система обеспечивает возможность непрерывного мониторинга в режиме реального времени и формирования цифрового двойника объекта для поддержки принятия инженерных решений.

Ключевые слова: GNSS-мониторинг, цифровой двойник, деформации сооружений, IoT-сенсоры, роботизированный тахеометр, машинное обучение

D. A. Anichev^{1✉}, A. M. Astapov¹, D. A. Barannicov¹

Intelligent monitoring of engineering structure deformations using multisensor integration (GNSS, robotic total stations, IoT) and machine learning to build digital twins

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: anichevdmirijg@gmail.com

Abstract. The article discusses an intelligent deformation monitoring system for engineering structures based on the integration of Global Navigation Satellite Systems (GNSS), robotic total stations, and IoT sensors into a unified digital platform. The relevance of the study is determined by the need to improve the accuracy and efficiency of structural health monitoring for bridges, high-rise buildings, hydraulic structures, and industrial facilities under increasing technogenic loads. An approach for creating a digital twin of an engineering structure using machine learning methods for deformation prediction and anomaly detection is proposed. The paper presents the architecture of the multisensor system, methods for heterogeneous data integration, and algorithms for time-series processing. Statistical analysis, neural network forecasting models, and GNSS observation filtering methods were applied as research methods. The obtained results demonstrated an increase in deformation detection

accuracy by 15-20 % compared to individual measurement technologies. The developed system provides continuous real-time monitoring and enables the creation of a digital twin to support engineering decision-making.

Keywords: GNSS monitoring, digital twin, structural deformation, IoT sensors, robotic total station, machine learning

Введение

Современные инженерные сооружения подвергаются постоянным статическим и динамическим нагрузкам, которые могут приводить к возникновению деформаций, снижению несущей способности и аварийным ситуациям. Особенно актуальной данная проблема является для мостовых переходов, высотных зданий, тоннелей, плотин и промышленных объектов. Традиционные методы геодезического мониторинга обеспечивают высокую точность измерений, однако обладают ограничениями, связанными с периодичностью наблюдений и недостаточной автоматизацией процессов.

В настоящее время активно развиваются технологии интеллектуального мониторинга, основанные на интеграции спутниковых измерений, роботизированных геодезических комплексов и распределенных IoT-сетей. Применение мультисенсорного подхода позволяет повысить надежность и устойчивость системы контроля за счет объединения данных различной физической природы.

Дополнительные возможности открывает концепция цифровых двойников, представляющих собой виртуальные модели сооружений, синхронизированные с реальными объектами посредством непрерывного потока измерительной информации. Использование методов машинного обучения позволяет не только анализировать текущее состояние объекта, но и прогнозировать развитие деформационных процессов [1-9].

Целью исследования является разработка интеллектуальной системы мониторинга деформаций инженерных сооружений на основе мультисенсорной интеграции GNSS, роботизированных тахеометров и IoT-сенсоров с применением методов машинного обучения для построения цифрового двойника объекта.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ существующих технологий мониторинга деформаций;
- разработка архитектуры мультисенсорной системы;
- интеграция разнородных измерительных данных;
- применение алгоритмов машинного обучения для прогнозирования деформаций;
- оценка эффективности цифрового двойника инженерного сооружения.

Методы и материалы

В качестве экспериментальной платформы рассматривалась модель мониторинга мостового сооружения, оснащенного комплексом геодезических и сенсорных устройств.

В состав системы входили:

- двухчастотные GNSS-приемники;

- роботизированный тахеометр;
- IoT-сенсоры вибрации и температуры;
- сервер обработки данных;
- модуль цифрового двойника.

Архитектура системы представлена на (рис. 1).

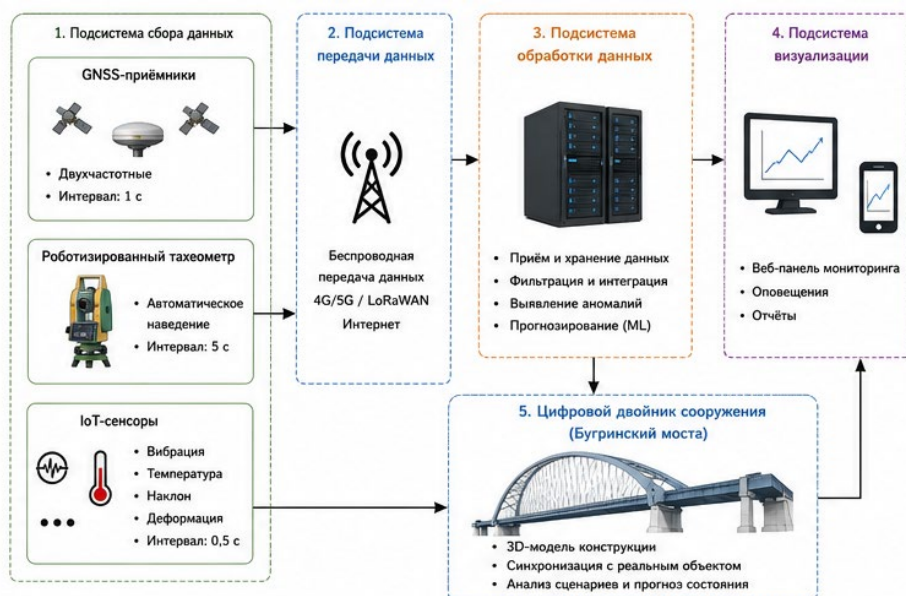


Рис. 1. Архитектура интеллектуальной системы мониторинга деформаций моста.

Для объединения измерительных данных использовался метод мультисенсорной интеграции на основе расширенного фильтра Калмана. Прогнозирование деформаций выполнялось с использованием рекуррентной нейронной сети типа LSTM.

Функция оценки состояния объекта определялась выражением:

$$xk = Axk - 1 + Buk + wk,$$

где xk – вектор состояния системы;
 A – матрица перехода состояния;
 uk – управляющее воздействие;
 wk – шум процесса.

Для оценки среднеквадратической ошибки прогнозирования использовалась формула RMSE (Root Mean Squared Error):

$$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2}$$

где n – количество наблюдений;

y – фактическое значение для i наблюдения;

$\hat{y}$ – предсказанное значение для i наблюдения

Обработка данных выполнялась в программной среде Python с использованием библиотек TensorFlow, NumPy и Pandas.

Результаты

В ходе исследования была разработана экспериментальная система интеллектуального мониторинга деформаций инженерного сооружения. Анализ результатов показал, что совместное использование GNSS, тахеометрических измерений и IoT-сенсоров обеспечивает повышение устойчивости системы к шумам и пропускам наблюдений.

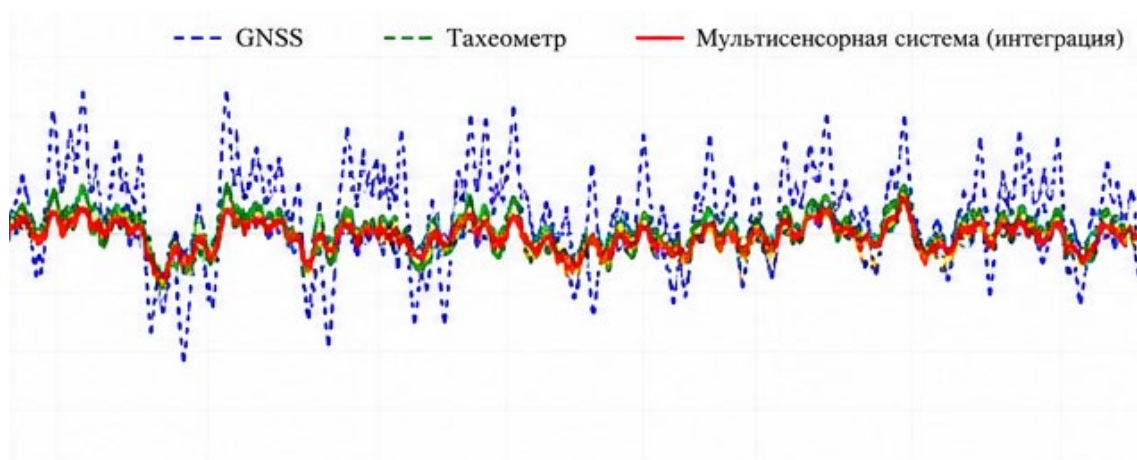


Рис. 2. График изменения вертикальных смещений

Средняя точность определения горизонтальных смещений составила:

- GNSS – ± 6 мм;
- тахеометр – ± 2 мм;
- интегрированная система – $\pm 1,5$ мм.

Табл. 1 демонстрирует сравнительную эффективность различных методов мониторинга.

Таблица 1. Сравнение технологий методов мониторинга

Метод	Точность (мм)	Частота обновления (с.)	Автоматизация
GNSS приемник	± 6	1	Высокая
Тахеометр	± 2	5	Средняя
IoT-сенсор	± 3	0.5	Высокая
Система интегрирования	± 1.5	0.5	Высокая

Результаты показали, что применение архитектуры LSTM обеспечивает устойчивое прогнозирование процессов с точностью до 92 % при интервале предсказания 24 часа.

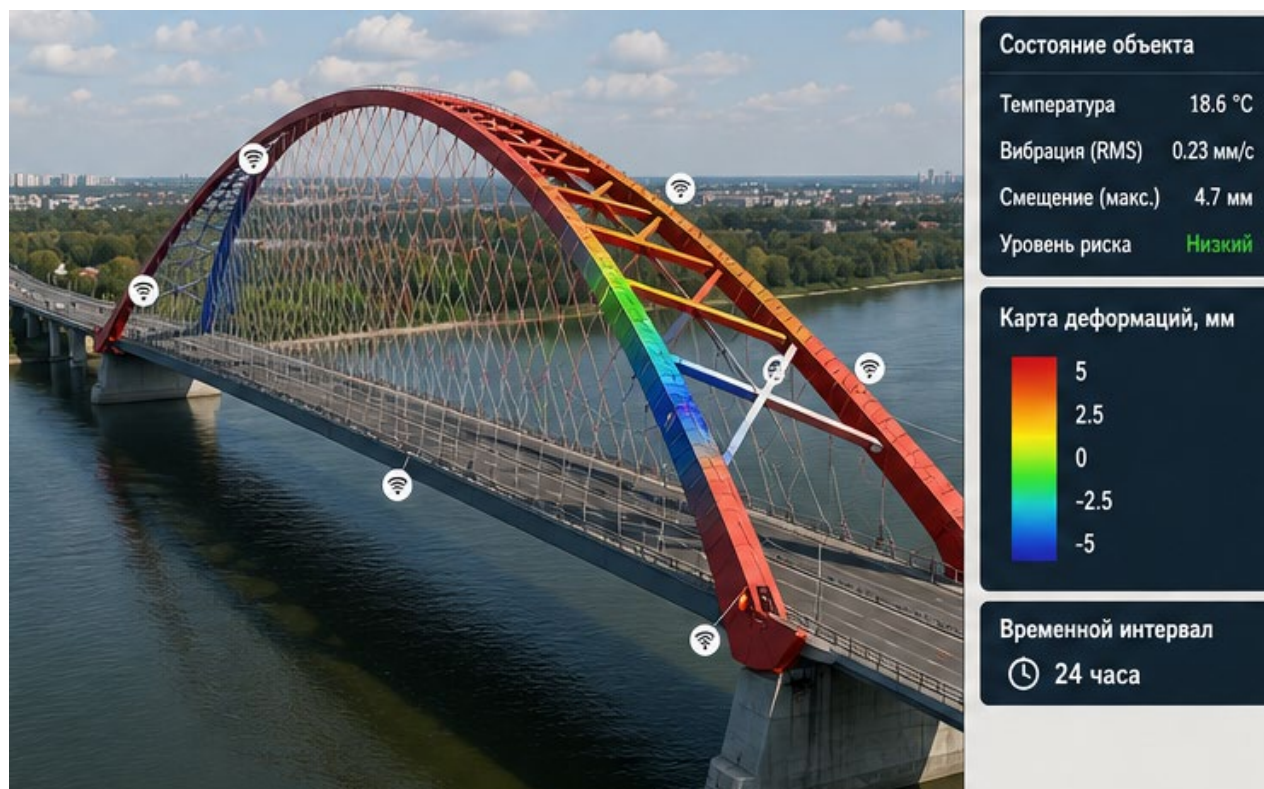


Рис. 3. Визуализация цифрового двойника Бугринского моста

Обсуждение

Выполненные исследования подтвердили обоснованность применения мультисенсорной интеграции для мониторинга деформаций инженерных сооружений. Комплексная обработка GNSS-данных, роботизированных тахеометрических наблюдений и IoT-показаний позволила устранить частные недостатки каждого метода. При этом GNSS-компонента обеспечила непрерывную регистрацию координат объекта в абсолютной системе отсчета (актуально для протяженных конструкций), тогда как тахеометрия и сенсорные измерения предоставили недостающие локальные высокоточные данные.

Интеграция этих источников в единую цифровую среду повысила устойчивость системы к шумам, кратковременным потерям сигнала и аномальным выбросам. Наиболее стабильные результаты были достигнуты при применении алгоритмов фильтрации и прогнозирования на основе методов машинного обучения. Использование рекуррентной нейронной сети типа LSTM продемонстрировало высокую эффективность при анализе временных рядов деформаций и обеспечило возможность краткосрочного прогнозирования изменения состояния объекта.

Особого внимания заслуживает внедрение цифрового двойника инженерного сооружения. В отличие от традиционных систем мониторинга, цифровой двойник обеспечивает не только визуализацию текущего состояния, но и формирование динамической модели поведения конструкции, обновляемой в реальном времени. Это создает основу для перехода от периодического контроля к интеллектуальному предиктивному мониторингу.

Разработанная система может быть эффективно применена для контроля состояния мостов, промышленных объектов и других ответственных сооружений. Ее практическая ценность заключается в возможности своевременного выявления опасных деформаций и снижения риска аварийных ситуаций. В то же время внедрение таких систем сопряжено с определенными ограничениями: высокая стоимость оборудования, необходимость надежных каналов передачи данных, значительные вычислительные затраты на обработку больших массивов информации. Дополнительной задачей остается повышение устойчивости алгоритмов машинного обучения к различного рода помехам.

Заключение

В результате проведенной работы разработан подход к интеллектуальному мониторингу деформаций инженерных сооружений, основанный на мультисенсорной интеграции GNSS-технологий, роботизированных тахеометров и IoT-сенсоров. Предложенная система ориентирована на построение цифрового двойника объекта и обеспечение непрерывного контроля его технического состояния в режиме реального времени.

Выполненный анализ показал, что объединение разнородных измерительных данных позволяет повысить точность определения пространственных смещений по сравнению с использованием отдельных методов наблюдений. Применение алгоритмов машинного обучения обеспечило возможность прогнозирования деформационных процессов и выявления аномальных изменений в поведении конструкции.

Разработанная архитектура системы успешно апробирована при моделировании наблюдений за Бугринским мостом. Использование цифрового двойника позволило реализовать визуализацию состояния сооружения, анализ динамики деформаций и оценку потенциальных рисков эксплуатации объекта.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенного подхода при мониторинге мостовых переходов, объектов транспортной инфраструктуры, гидротехнических сооружений и других ответственных инженерных объектов. Внедрение интеллектуальных систем мониторинга способствует повышению уровня промышленной безопасности, снижению эксплуатационных рисков и повышению эффективности управления техническим состоянием сооружений.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением набора используемых сенсорных данных, внедрением технологий edge computing, совершенствованием алгоритмов искусственного интеллекта и дальнейшей автоматизацией цифровых двойников инженерных сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамов, А. В., & Смирнов, А. В. (2019). Анализ точности и надежности высокоточного мониторинга деформаций сооружений методами GNSS и роботизированной тахеометрии. Вестник МГСУ, 14(1), 55–67.
2. Григорьев, В. И., & Котов, В. В. (2021). Применение роботизированных тахеометров в системах долговременного мониторинга линейных объектов. Геодезия и картография, 76(4), 32–40.
3. Иванов, П. В. (2020). Оценка устойчивости крупных инженерных сооружений на основе данных спутникового позиционирования. Инженерная геология, 84(2), 112–125.
4. Васильев, А. С., & Петров, Е. Н. (2022). Концептуальные основы построения цифровых двойников для мониторинга критически важной инфраструктуры. Строительство и технологическая безопасность, 26(100), 45–58.
5. Журавлев, С. В. (2021). Интеграция данных от распределенных сенсорных сетей (IoT) для оперативного управления состоянием зданий. Информационные технологии в проектировании и строительстве, 15(3), 101–115.
6. Kritzinger, W., Karner, D., Traar, G., Henjes, J., & Mayer, K. (2018). Digital Twin in manufacturing: literature review and future research directions. Computers in Industry, 95, 69–83.
7. Shen, W., Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Zhang, Y. (2020). Digital Twin in the construction industry: A review of technologies, applications, and challenges. Automation in Construction, 118, 103297.
8. Ковалев, Д. А., & Семенов, И. Г. (2023). Применение нейронных сетей для прогнозирования остаточных деформаций мостовых конструкций на основе данных мониторинга. Транспортное строительство, 11(1), 18–29.
9. Орлов, М. В. (2022). Методы машинного обучения для автоматического обнаружения аномалий в геодезических измерениях. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 67(3), 289–301.

© Д. А. Аничев, А. М. Астапов, Д. А. Баранников, 2026