



УДК 556

ГИБРИДНАЯ АКУСТИКО-ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ДЕФОРМАЦИЙ ЛАНДШАФТА ВОЛЖСКОГО БАССЕЙНА

Парфенов Андрей Ильич, студент 3 курса направления 09.03.02 «Информационные системы и технологии»

ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта».
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

Созанков Владислав Олегович, студент 3 курса направления 09.03.02

«Информационные системы и технологии»

ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта».
603950, г. Нижний Новгород, ул. Нестерова, 5

Аннотация. Существующие способы мониторинга деформаций ландшафта имеют ряд ограничений, связанных с атмосферными условиями. Предлагаемая система объединяет два метода измерений для компенсации недостатков друг друга. Архитектура системы включает четыре стационарные вышки с акустическими передатчиками, лазерными дальномерами и метеостанциями. Система обеспечивает непрерывный мониторинг изменений береговой линии и донного рельефа речных бассейнов. Разработанное решение позволяет прогнозировать изменения русла рек и зоны затопления с высокой точностью.

Ключевые слова: Гибридная акустико-лазерная система, мониторинг деформаций земной поверхности, речные бассейны, пространственное распределение погрешностей, стационарные вышки, акустические передатчики, лазерные дальномеры, береговая эрозия, донные отложения, гидрологическое моделирование

Современные методы мониторинга деформаций земной поверхности сталкиваются с системными ограничениями, обусловленными физическими принципами их работы. Радиолокационная интерферометрия (InSAR), несмотря на способность покрывать значительные территории, обладает существенным недостатком - периодичностью измерений, определяемой временем повторного пролета спутника. Это ограничивает ее применение для задач, требующих непрерывного мониторинга в реальном режиме времени. Лазерное сканирование (LiDAR), в свою очередь, демонстрирует высокую точность, но критически зависит от атмосферных условий и теряет эффективность при наличии в атмосфере аэрозольных частиц, тумана или осадков.

Анализ существующих акустических методов выявил фундаментальные проблемы, препятствующие их практическому применению. Основной сложностью является нестабильность скорости распространения звука в атмосфере, которая варьируется в зависимости от температуры, влажности, давления и скорости ветра. Кроме того, существующие методы не учитывают распределение возникающих погрешностей в пространстве и не предлагают эффективных механизмов для их корректировки. Все это

приводит к росту количество ошибок при увеличении расстояния между акустической системой и контролируемым объектом.

Предлагаемая концепция гибридной акустико-лазерной системы объединяет два независимых метода измерений - акустический и лазерный. В этом заключается инновационность подхода, так как такой подход позволяет компенсировать недостатки каждого из перечисленных методов.

Разрабатываемая к использованию система предназначена для функционирования в условиях, когда традиционные оптические и радиолокационные методы демонстрируют снижение эффективности, обеспечивая при этом непрерывный мониторинг с высокой точностью.

Разрабатываемая и предлагаемая система мониторинга, фиксируя изменения береговой линии и донного рельефа, обеспечивает комплексное наблюдение за динамикой речных бассейнов. С помощью регулярного наблюдения отслеживаются процессы механического разрушения и сноса горных пород в пониженные участки земной поверхности в береговой зоне водоёмов, накопление донных отложений в зонах замедленного течения.

В случае интеграции с гидрологическими моделями предлагаемая система мониторинга позволит прогнозировать вероятные изменения русла реки и зоны затопления, а также моделировать размеры и площадь зоны затопления. Система позволит выявить результаты воздействия строительных работ на самой реке или дноуглубительных работ вблизи водного бассейна на береговую линию, склоны с возможностью деформации.

Полученные путем мониторинга данные позволят оценить влияние изменения участков суши в береговой зоне водоёмов на русло реки, рельеф дна, формирование потоков воды и структуру берегов в зонах рекреационной нагрузки. Таким образом, система будет способна предоставить комплексные данные для управления речными бассейнами и прогнозирования их развития.

Архитектура системы построена на основе сети из четырех стационарных вышек, образующих замкнутый полигон вокруг контролируемой территории. Каждая вышка представляет собой комплекс высокоточного измерительного оборудования, включающий:

- акустические передатчики, работающие в низкочастотном ультразвуковом диапазоне (20-40 кГц), что обеспечивает оптимальное соотношение между разрешающей способностью и затуханием сигнала в атмосфере;
- массивы приемных микрофонов с динамическим диапазоном около 120 дБ, оснащенные ветрозащитными экранами и системами термостабилизации;
- прецизионные поворотные лазерные дальномеры с точностью ± 1 мм на расстоянии примерно 500 метров;
- метеорологические станции, измеряющие температуру, влажность, атмосферное давление и скорость ветра с частотой 10 Гц;
- вычислительные модули на базе одноплатных компьютеров с специализированными ЦАП и АЦП для обработки сигналов.

Программное обеспечение системы реализует трехуровневую архитектуру обработки данных. На первом уровне выполняется синхронизация всех измерительных узлов с точностью до 1 микросекунды, что обеспечивает когерентность измерений. Второй уровень отвечает за цифровую обработку сигналов - применяются адаптивные фильтры Калмана, алгоритмы выделения полезного сигнала на фоне шумов и компенсации многолучевого распространения.

Третий, аналитический уровень, реализует уникальный алгоритм интеллектуального слияния данных. Особенностью алгоритма является учет пространственного распределения погрешностей - для каждой точки контролируемой территории определяется весовой коэффициент достоверности данных от каждой вышки, основанный на расстоянии до объекта и текущих атмосферных условиях.

Важнейшим элементом системы является сеть калибровочных отражателей, равномерно распределенных по контролируемой территории. Лазерные дальномеры выполняют регулярные измерения расстояний до этих отражателей, что позволяет строить поправочные поля для компенсации атмосферных искажений (рисунок).

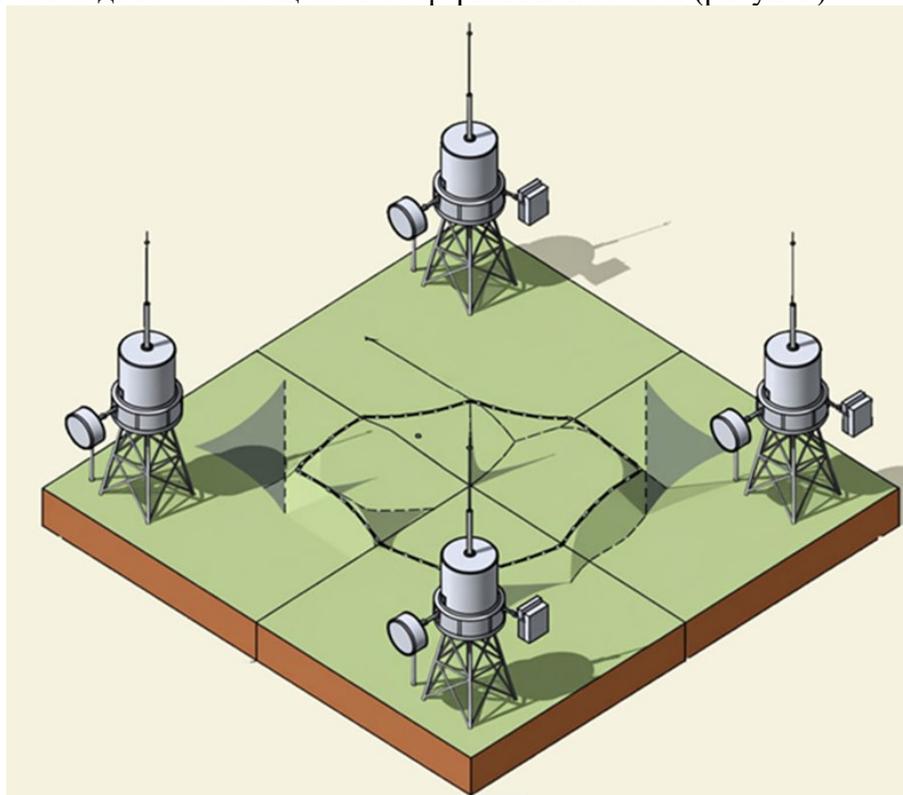


Рис. Схема расположения вышек

Процедура калибровки выполняется каждые 5 минут, обеспечивая постоянную актуальность корректирующих параметров.

Рабочий цикл системы начинается с одновременного излучения всеми вышками кодированных акустических сигналов. Использование уникальных временных меток для каждого передатчика позволяет идентифицировать источник сигнала при обработке эхо-сигналов. Измеренное время прохождения сигнала преобразуется в расстояние с учетом текущих метеорологических параметров, измеренных в реальном времени.

Лазерные дальномеры выполняют верификацию измерений, направляя импульсы на калибровочные отражатели. Расхождение между акустическими и лазерными измерениями используется для расчета поправочных коэффициентов, которые применяются ко всей области измерений. Это позволит нам компенсировать часто появляющиеся погрешности, вызванные переменной атмосферой вокруг речных бассейнов.

Таким образом, проведенная работа позволит разработать комплексное решение, которое сможет успешно преодолевать ограничения существующих методов мониторинга ландшафтных основ функционирования речных бассейнов. Данная система будет показывать высокий показатель в условиях, где текущие оптические и радиолокационные технологии оказываются малоэффективными.

Внедрение акустико-лазерного подхода обеспечит создание адаптивной системы для коррекции погрешностей, которая будет учитывать различные ошибки измерений. Это позволит достичь высокой точности измерений при этом сохранит непрерывность мониторинга, что представляет значительный прорыв в области акустического измерения ландшафта.

Для будущего улучшения системы можно выделить следующие направления: оптимизация энергопотребления акустических излучателей и увеличение дальности действия акустической системы.

Если эти улучшения будут достигнуты, то это откроет ряд возможностей для создания конкурентоспособного решения в области мониторинга критически важных объектов водной инфраструктуры. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку более эффективных алгоритмов обработки сигналов и расширение функциональных возможностей системы.

Список литературы:

1. Кортаев Г. К., Ранькова Э. Я., Чапин В. В. Гидроакустические системы контроля состояния водной среды. – СПб.: Наука, 2018. – 212 с.
2. Chen, Q., & Wang, L. Integrating Terrestrial Laser Scanning and Acoustic Wave Technology for High-Resolution Topographic Monitoring of Coastal Erosion // Journal of Coastal Research. – 2022. – Vol. 38(3). – P. 512-525.
3. Лупачёв Ю. В., Скворцов А. В. Лазерные дальнометры в гидрологических исследованиях: теория и практика. – М.: Издательство МГУ, 2020. – 168 с.
4. Иванов А. В., Петрова Л. Н. Дистанционный мониторинг и моделирование процессов в речных бассейнах. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2021. – 305 с.

HYBRID ACOUSTIC-LASER SYSTEM FOR MONITORING DEFORMATIONS OF THE VOLGA BASIN LANDSCAPE

Andrey I. Parfenov, Vladislav O. Sozankov

Annotation. Existing methods for monitoring landscape deformations have a number of limitations related to atmospheric conditions. The proposed system combines two measurement methods to compensate for each other's shortcomings. The architecture of the system includes four stationary towers with acoustic transmitters, laser range finders and weather stations. The system provides continuous monitoring of changes in the coastline and bottom relief of river basins. The developed solution makes it possible to predict riverbed changes and flood zones with high accuracy.

Keywords: Hybrid acoustic-laser system, monitoring of deformations of the Earth's surface, river basins, spatial distribution of errors, stationary towers, acoustic transmitters, laser rangefinders, coastal erosion, bottom sediments, hydrological modeling.