

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева

ӘБЕН АРДАНА СЕРЖАНҚЫЗЫ

**«Совершенствование методологии 3D реконструкции опор воздушных
линий электропередач на основе геопространственных данных»**

6D071100 – Геодезия

АННОТАЦИЯ

к диссертационной работе на соискание степени
доктора философии PhD

Научные консультанты:
Доктор PhD,
ассоц. профессор Жакыпбек Ы.
Доктор технических наук,
профессор Дай Хуаян

Республика Казахстан
Алматы, 2025

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертационной работы. Обеспечение бесперебойной и надёжной работы энергетической инфраструктуры — основа национальной безопасности и социально-экономического развития любой страны. В этом контексте своевременный контроль технического состояния воздушных линий электропередачи (ВЛ) и предупреждение неисправностей являются одной из важнейших задач.

В настоящее время опоры ВЛ в различных регионах Казахстана охватывают обширные географические территории, что требует значительных ресурсных и временных затрат при их ручной проверке и обслуживании. Кроме того, сложный рельеф, природные препятствия и климатические условия снижают эффективность традиционных методов мониторинга.

Развитие цифровых геоинформационных технологий (LiDAR, фотограмметрия, съёмки с дронов, спутниковое наблюдение и др.) предлагает новый уровень решения этих задач. В частности, возможность 3D-моделирования опор на основе облаков точек, автоматического распознавания их конструктивных элементов и проведения мониторинга открывает путь к оптимизации современных процессов технического обслуживания и ремонта.

Актуальность данного направления сегодня усиливается следующими факторами:

- широкое распространение и конструктивное разнообразие системы ВЛ по территории Казахстана;
- ограниченность ручного контроля и нехватка кадровых ресурсов;
- физический износ элементов ВЛ и их подверженность климатическим воздействиям;
- необходимость автоматизированной обработки опор со сложной геометрической формой;
- рост требований к дистанционному управлению энергетическими объектами в рамках цифровизации и программы «Цифровой Казахстан».

В связи с этим разработка и внедрение автоматизированных методов 3D-моделирования, обеспечивающих точное и надёжное восстановление конструкций опор, представляет собой исследовательское направление, имеющее не только научную, но и высокую производственно-практическую значимость.

Целью работы является совершенствование методики 3D реконструкции опор воздушных линий электропередачи на основе геопространственных данных.

Основные проблемы, решаемые в диссертации:

- всестороннее изучение развития методов мониторинга состояния воздушных линий электропередачи и способов их реконструкции;
- оценка точности линейной сопоставления при реконструкции электрических сетей;

- предложение методов перенаправления и сегментации опор ВЛ;
- обоснование реконструкции структуры линий электропередачи путём определения и расчёта топологических связей между угловыми точками.

Метод исследования. Для решения поставленных задач применялись системный анализ, методы проектирования, а также комплексные исследовательские подходы с использованием стандартных методов программного обеспечения.

Научные положения, выносимые на защиту:

Компонентный алгоритм, основанный на делении опор ВЛ на нижние (перевернутый треугольник), средние (прямоугольные) и верхние или боковые (сложные) конструкции, позволяет выполнять отдельный анализ конструкций опор и точно определять позиции их сегментации.

Объединение алгоритмов 2D альфа-форм и метода консенсуса случайных выборок (RANSAC) позволяет точно и эффективно реконструировать 3D-координаты опор за счёт моделирования их внутренней и внешней структуры, а также определения топологических связей между угловыми точками.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

Предложен метод сегментации, основанный на компонентном алгоритме, соответствующий геометрическим особенностям опор ВЛ (нижняя, средняя и верхняя части).

Для реконструкции опор ВЛ эффективно использовано сочетание 2D альфа-форм и алгоритма RANSAC, что позволило моделировать внутреннюю и внешнюю структуру и определять топологические связи между угловыми точками на основе расчёта их 3D-координат.

Обоснованность и достоверность научных результатов и выводов подтверждается:

- выбором методов и моделей на основе анализа научной литературы, предыдущих исследований и международного опыта с учётом конструктивных и геометрических особенностей опор ВЛ;
- взаимосвязанным и комплексным применением компонентной сегментации, алгоритмов 2D альфа-форм, RANSAC и методов топологического анализа;
- тестированием предложенных алгоритмов на основе облаков точек и визуальных данных реальных воздушных линий электропередачи, что подтвердило их прикладную значимость и эффективность;
- сравнением полученных результатов с традиционными и альтернативными методами, демонстрируя преимущества по точности моделирования, времени восстановления и уровню автоматизации.

Таким образом, выводы диссертационного исследования являются научно обоснованными, методически проработанными и пригодными для практического применения.

Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе Казахского национального исследовательского технического университета имени К. И. Сатпаева и при проведении проектов на производстве.

Основные результаты исследований получены в лаборатории «Научно-исследовательская лаборатория цифрового, компьютерного моделирования технологий добычи руд из блоков различной сложности строения» инновационно-инжинирингового центра ГМК Горно-металлургического института в рамках ПЦФ BR21881939 по теме «Разработка ресурсосберегающих энергогенерирующих технологий для горно-металлургического комплекса и создание инновационного инжинирингового центра».

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция «Сатпаевские чтения» на тему «Инновационные технологии — ключ к успешному решению фундаментальных и прикладных задач в горнодобывающей и нефтегазовой отраслях экономики РК» (г. Алматы, 2019 г.); Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии в геопространственном цифровом инжиниринге», посвящённая 115-летию чл.-корр. АН КазССР А.Ж. Машанова и 100-летию академика АН КазССР Ж.С. Ержанова (г. Алматы, 2022 г.); Международная научно-техническая конференция Actual Questions and Innovations in Science. Proceedings (Румыния, 2019 г.).

Научные публикации.

По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе: 5 статей в журналах, рекомендованных Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК; 4 статьи в сборниках международных научно-практических конференций; 1 статья в журнале Remote Sensing, входящем в базу Web of Science (Q1 квартиль, 91-й перцентиль); выпущено учебное пособие по дисциплине «Геодезия» на государственном языке.

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и 103 списка использованной литературы, 126 страниц и 74 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе данной работы рассматриваются структурные особенности объектов электрических сетей, требования к их безопасности, а также современные тенденции развития средств контроля. В частности, подробно анализируются геометрические характеристики опор, их роль в обеспечении устойчивости линий, а также основные риски, возникающие при их деформации или разрушении. Особое внимание уделяется нормативным требованиям к эксплуатации опор и соответствующим методам технического надзора.

Далее представлена классификация и сравнительный анализ методов, используемых в контроле состояния конструкций ЛЭП. Это включает в себя как традиционные визуальные и инструментальные методы (инспекция с земли, использование теодолитов, лазерных дальномеров), так и современные цифровые технологии: аэрофотосъёмка, лазерное сканирование (LiDAR), фотограмметрия, беспилотные летательные аппараты (БПЛА), а также методы, основанные на машинном обучении и автоматическом анализе данных. Их эффективность, точность, временные затраты и применимость в различных условиях сравниваются на основе опубликованных исследований и практических примеров.

Важным аспектом рассматриваемой темы является оценка возможностей и преимуществ каждого подхода. Например, лидарные технологии позволяют проводить высокоточный дистанционный мониторинг без отключения линий электропередачи, в то время как методы компьютерного зрения могут использоваться для автоматического распознавания повреждений и дефектов. С другой стороны, традиционные методы остаются востребованными в силу своей простоты и низкой стоимости.

Таким образом, первая глава закладывает теоретическую и аналитическую базу для дальнейшего изучения методов реконструкции опор и восстановления структур линий электропередачи. Учитывая растущие требования к цифровизации и автоматизации контроля инфраструктурных объектов, системный обзор и оценка текущих решений представляют собой важный шаг на пути к разработке более эффективных и экономичных технологий технического обслуживания и мониторинга ЛЭП.

Во второй главе данной работы рассматриваются и анализируются как традиционные, так и современные подходы к 3D-моделированию и реконструкции опор ЛЭП на основе пространственных данных.

Первоначально внимание уделяется ручным и полуавтоматическим методам построения 3D-моделей. Несмотря на относительно высокую точность, ручные методы требуют значительных временных и человеческих ресурсов, что ограничивает их применимость в масштабных проектах. Полуавтоматические методы, напротив, позволяют ускорить процесс моделирования за счет использования алгоритмов анализа точечных облаков

и предварительно заданных шаблонов конструкций. Эти подходы обеспечивают баланс между точностью и производительностью, особенно при наличии стандартных или типовых форм опор.

Затем рассматриваются стохастические методы, основанные на вероятностной геометрии. Они позволяют учитывать неопределенность и шум в исходных данных, а также варьированность форм опор. Такие методы особенно эффективны при работе с неполными или зашумлёнными данными, полученными, например, с помощью LiDAR-сканирования в сложных погодных условиях. Применение стохастических моделей позволяет повысить устойчивость и точность реконструкции за счет моделирования множества возможных конфигураций на основе статистических характеристик.

Кроме того, в главе представлена эвристическая методология реконструкции, основанная на накопленном опыте, логических правилах и эмпирических зависимостях. Эвристические алгоритмы применяются для распознавания повторяющихся шаблонов, фильтрации ложных срабатываний и оптимизации параметров реконструкции. Они особенно полезны при обработке больших объемов данных, где требуется быстрое принятие решений и автоматизация аналитических процессов.

В совокупности, рассмотренные подходы демонстрируют широкий спектр инструментов для реконструкции опор ЛЭП в условиях реального мира. Их интеграция позволяет разрабатывать гибкие и масштабируемые решения, применимые как в рамках локальных обследований, так и в проектах национального масштаба. Глава завершается сравнительным анализом эффективности описанных методов, что закладывает основу для их применения в комплексных системах мониторинга и моделирования.

В третьей главе рассматриваются методы и критерии оценки точности линейного сопоставления, а также способы повышения качества реконструкции на основе анализа проекций и обработки облаков точек.

Основным показателем качества линейного сопоставления является степень соответствия реконструированных сегментов линий их реальным геометрическим формам, включая как прямолинейные, так и изогнутые участки проводов. Для количественной оценки точности применяются такие метрики, как среднеквадратичная ошибка остатков (RMSE), соотношение внутренних и внешних точек, а также ошибки проекций на 2D-плоскости.

Для повышения точности ключевое значение имеет предварительная фильтрация исходных данных, что позволяет снизить влияние шума и выбросов. Эффективные методы кластеризации, в том числе с использованием сеточных структур, способствуют выделению значимых линейных сегментов из больших массивов точек. Особое внимание уделяется интеграции различных алгоритмов для повышения стабильности и точности сопоставления.

Одним из эффективных инструментов является преобразование Хафа, позволяющее надежно выделять линейные структуры в проекциях точечных

данных даже при наличии шума и частичной неполноты. Вероятностные модификации преобразования Хафа демонстрируют улучшенные результаты при работе с прерванными и короткими линиями, упрощая последующее объединение сегментов в цельную модель.

Также рассматривается применение алгоритма RANSAC, известного своей устойчивостью к выбросам и возможностью выделения надежных моделей на основе случайных подмножеств данных. RANSAC обеспечивает высокую точность распознавания сложных конфигураций проводов, в том числе разрывов и слабовыраженных сегментов.

В целом, глава подчёркивает, что сочетание классических и современных алгоритмов позволяет достичь высокого уровня точности и надежности при реконструкции электрических линий на основе геопространственных данных, получаемых с помощью LiDAR и аэрофотосъемки. Такие подходы обеспечивают фундамент для автоматизированных систем мониторинга и обслуживания линий электропередачи.

В четвертой главе всесторонне проанализирован метод реконструкции электрических опор с использованием абстрактных шаблонных структур на основе аэро-лидара (ALS). На основе данных облака точек высокой плотности, собранных с помощью устройства RIEGL VUX-1, были рассмотрены способы точного описания геометрических форм опор и автоматизированного построения их 3D-моделей.

В результате проведенных экспериментов:

- были точно определены основные параметры, используемые на этапах декомпозиции и реконструкции опор (пороговые значения по высоте, ширине, коэффициент достоверности, порог RANSAC и др.);
- оценена эффективность моделей и точность сопоставления в зависимости от типа конструкции опор;
- доказано, что интервал выборки (sampling distance) и плотность точек напрямую влияют на качество модели;
- результаты 3D-реконструкции обеспечивают точное пространственное размещение элементов опор, что служит основой для автоматической оценки безопасности линий электропередачи.

Предлагаемый метод позволяет полуавтоматически моделировать сложные конструкции опор с высокой точностью и значительной экономией времени. Полученные результаты пригодны для дальнейшего широкого применения — при автоматизации контроля деформаций опор, определении опасных зон и проведении технических обследований.

Использование лидарных технологий в задачах моделирования и реконструкции конструкций опор ЛЭП:

- сокращает временные затраты в десятки раз;
- повышает точность измерений;
- уменьшает потребность в трудовых и логистических ресурсах;
- позволяет автоматически обрабатывать цифровые данные.

Соответственно, данный подход обладает высокой экономической эффективностью по сравнению с традиционными методами и является оптимальным решением для крупномасштабных исследований.

По результатам проведенного экономического анализа установлено, что при использовании LiDAR-технологий для 3D-моделирования и технического обследования линий электропередачи окупаемость инвестиций (ROI) составляет 200%. Этот показатель доказывает высокую эффективность лидарного подхода по сравнению с традиционными геодезическими методами. Кроме того, высокий уровень ROI позволяет эффективно применять данный метод и на больших территориях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена теме «Совершенствование методики 3D восстановления опор воздушных линий электропередачи на основе геопространственных данных». Данное исследование имеет особую актуальность в контексте цифровизации энергетической инфраструктуры, повышения эффективности технического обслуживания и реализации дистанционного мониторинга.

Протяженность территории Казахстана, сложный рельеф, климатические условия, а также ограничения кадровых и материальных ресурсов снижают эффективность традиционных методов контроля технического состояния опор воздушных линий электропередачи (ВЛЭП). В этой связи совершенствование методов 3D-моделирования на основе геопространственных технологий, таких как LiDAR, фотограмметрия, аэро- и спутниковая съемка, является современной и актуальной научной задачей.

Основной целью данной работы является совершенствование методики 3D восстановления опор воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) на основе геопространственных данных. В процессе достижения поставленной цели были решены несколько важных научных и прикладных задач:

- Проведен обзор современных методов моделирования конструкций опор ВЛЭП, определены их эффективность и ограничения;
- Предложены алгоритмы повышения точности линейной идентификации и автоматического перенаправления опор;
- Разработан компонентный алгоритм, основанный на разделении конструкций опор на три основные части (нижняя, средняя и верхняя) в соответствии с их геометрическими характеристиками;
- Посредством комбинированного применения алгоритмов 2D альфа-форм и RANSAC были определены внутренняя и внешняя структура опор, а также топологические связи между угловыми точками, с последующим точным расчетом их 3D-координат.

Результаты исследования были протестированы на реальных данных облаков точек (point cloud), что позволило доказать значительное преимущество предложенных методов по сравнению с традиционными подходами — как по точности моделирования, так и по уровню автоматизации. Разработанные алгоритмы эффективно различают сложные конструкции опор, обеспечивают восстановление их пространственного расположения, сокращают затраты времени и снижают риски, связанные с человеческим фактором.

Научная новизна исследования заключается в разработке компонентного алгоритма сегментации опор в соответствии с их трехуровневой структурой, а также в использовании комбинированного подхода (2D альфа-формы + RANSAC) для построения точной 3D-модели с учетом топологических связей между структурными элементами.

Достоверность и обоснованность научных результатов подтверждаются следующими факторами:

- Методы и алгоритмы были отобраны с учетом геометрических и конструктивных особенностей опор, анализа научной литературы, предшествующих исследований и международного опыта;
- Все предложенные решения интегрированы в единую методику и апробированы на реальных данных;
- Эффективность алгоритмов доказана экспериментально на лидарных и фотограмметрических данных конкретных участков ВЛЭП;
- Результаты сравнивались с традиционными и альтернативными подходами, выявлены преимущества в точности моделирования, скорости обработки и уровне автоматизации.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут быть непосредственно внедрены в процессы цифрового управления энергетическими объектами. 3D-моделирование опор позволяет выполнять дистанционный мониторинг, прогнозировать технические неисправности, оптимизировать планово-предупредительные работы, тем самым снижая эксплуатационные затраты и повышая надежность электросетей.

Результаты диссертационного исследования были внедрены в учебный процесс Казахского национального исследовательского технического университета имени К. И. Сатпаева, а также использованы при выполнении производственных проектов, что подтвердило их практическую эффективность. Кроме того, научные выводы были представлены и обсуждены на международных и республиканских научных конференциях, где получили положительную оценку профессионального сообщества.

По теме диссертации опубликовано 11 научных трудов, включая статьи в авторитетных международных научных изданиях и учебные пособия.

В целом, диссертационная работа представляет собой значимую научную и практическую основу для дальнейших исследований и прикладных разработок в таких областях, как энергетика, геоинформационные системы, дистанционное зондирование и цифровое моделирование. Полученные результаты способны придать импульс будущим исследованиям в данной сфере и способствуют внедрению новых технологий в производственную практику.

Оценка полноты решения поставленных вопросов

В ходе диссертационного исследования все поставленные цели и задачи были выполнены в полном объеме. Были всесторонне рассмотрены научные и прикладные аспекты усовершенствования методики 3D восстановления опор воздушных линий электропередачи (ВЛЭП) на основе геопространственных данных. С учётом сложных геометрических характеристик опор, предложена компонентная модель сегментации, объединены алгоритмы 2D альфа-форм и RANSAC для определения топологических связей и расчёта 3D-координат. Результаты подтверждены

экспериментальными данными и сравнительным анализом с традиционными методами, что доказывает как научную, так и практическую значимость предложенных решений.

Рекомендации и исходные данные о фактическом использовании научных результатов

Научные результаты диссертационного исследования могут быть эффективно использованы в следующих сферах:

- Системы управления энергетической инфраструктурой – автоматизация построения 3D моделей опор позволит оптимизировать техобслуживание и прогнозировать неисправности.
- Геоинформационные системы (ГИС) – точные пространственные данные об опорах интегрируются в цифровые карты, что обеспечивает наглядный и аналитический контроль инфраструктуры.
- Дистанционное зондирование и мониторинг – регулярное наблюдение за объектами с помощью спутников и БПЛА (дронов).
- Образование и научные исследования – результаты внедрены в образовательный процесс в КазНТУ им. К.И. Сатпаева по дисциплинам «Геодезия», «Цифровой инжиниринг», «ГИС-технологии».

Исходные данные включали: лазерное сканирование (LiDAR), фотограмметрические снимки, облака точек, векторные и растровые картографические материалы, полученные для конкретных участков воздушных ЛЭП.

Оценка технико-экономической результативности внедрения

Технико-экономическая эффективность предложенной методики 3D восстановления подтверждается следующими показателями:

- Сокращение времени обслуживания – автоматизированная обработка опор сокращает трудозатраты на 30–40% по сравнению с традиционными методами;
- Снижение влияния человеческого фактора – отпадает необходимость в работах в труднодоступных и опасных зонах;
- Повышение точности и снижение ошибок – достигнута точность 3D моделирования до 95% за счёт точных алгоритмов сегментации и анализа;
- Оптимизация затрат на техобслуживание – более точное планирование ремонта на основе цифровых моделей;
- Долгосрочная надёжность системы – регулярное обновление цифровых данных позволяет поддерживать стабильную работу ЛЭП.

Таким образом, внедрение данной методики способствует снижению производственных затрат и повышению эффективности процессов технического обслуживания.

Оценка научного уровня выполненной работы по сравнению с лучшими достижениями в данной области

Научные результаты, полученные в диссертации, сопоставимы по уровню с ведущими мировыми исследованиями в области геоинформатики и дистанционного зондирования:

- В работах, опубликованных в ведущих журналах, таких как Remote Sensing чаще всего используются классические методы RANSAC или машинное обучение. Однако они зачастую ограничены в точности при работе со сложными геометрическими структурами опор.

- В данной работе предложена трёхуровневая компонентная модель (нижняя, средняя и верхняя части опор), что позволяет более точно сегментировать и классифицировать элементы конструкции.

- Комбинация 2D альфа-форм и RANSAC позволила не только сегментировать объекты, но и точно определить топологические связи между угловыми точками, обеспечивая восстановление пространственного расположения опор.

Таким образом, научный уровень выполненной работы соответствует современным международным стандартам и дополняет существующие подходы новыми эффективными методами, применимыми как в научных исследованиях, так и в производственной практике.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих научных работах:

1. Shichao Chen, Cheng Wang, Huayang Dai, Hebing Zhang, Feifei Pan, Xiaohuan Xi, Yueguan Yan, Pu Wang, Xuebo Yang, Xiaoxiao Zhu, Ardana Aben. Power Pylon Reconstruction Based on Abstract Template Structures Using Airborne LiDAR Data // Remote Sens. 2019, 11, 1579 Процентиль 92,809 ISSN: 20724292.

2. Әбен А.С., Жакыпбек Ы. Алматы метрополитені құрылысы кезіндегі қаланың геодезиялық торабын қайта қалпына келтірудің маңыздылығын талдау // Вестник КазНУ-Алматы, 2019, №2. С. 88-92. ISSN 1680-9211..

3. Әбен А.С., Ы. Жакыпбек, А. Әсетқызы. Изучение важности строительства метрополитена в мегаполисе для улучшения пассажиропотока и создания его геодезической опорной сети // Алматы, Горный журнал Казахстана, 2019, №4. -С.12-15. ISSN 2227-4766

4. Ы. Жакыпбек, Т.Калыбеков, С.В.Турсбеков, А.С. Әбен. Малеев кен орнының мысалында лазерлік сканерлеуді қолдану тиімділігі // Горный журнал Казахстана, 2023, №4. С. 48-52.

5. Е.Б.Кенжехан, Ы. Жакыпбек, Ж.Т.Кожаев, А.С. Әбен. Жолбарысты, Шован, Келіншектау алтын кен орындарында жоспарлы-биіктік негіздеме картасын құру // Горный журнал Казахстана, 2023, №6. С. 48-53.

6. А.С. Әбен, Х.Дай, Ы. Жакыпбек, Б.Б.Күмісханова. Электр желі тректерін қалпына келтірудегі LiDAR деректерін геодезиялық есептеу // Горный журнал Казахстана, 2025, №3. С.18-24.

7. Әбен А.С., Әсетқызы А., Жакыпбек Ы. Галамдық навигациялық спутниктік жүйені пайдаланумен қалалық геодезиялық тораптарды құруды зерделеу // Труды Сатпаевских чтений «Инновационные технологии – ключ к успешному решению фундаментальных и прикладных задач в рудном и нефтегазовом секторах экономики РК», 2019. Т 1. С. 837-841. ISBN 978-601-323-145-7.

8. Әбен А.С., Жакыпбек Ы. Дәстүрлі геодезиялық әдістерді метрополитен құрылысында қолдануды талдау // Actual Questions and Innovations in Science. Proceedings – Craiova: Eurasian Center of Innovative Development «DARA», 2019. P. 82-85. ISBN 978-601-341-174-3.

9. Тойшы А.Б., Жакыпбек Ы, Әбен А.С.. Бұрғылау штрегін лазерлік сканерлеу арқылы кен қазбаларын модельдеу // Развитие горно-металлургического комплекса Казахстана по реализации государственного инвестиционного проекта. Труды международной научно-технической конференции, Алматы, КазНУ им.К.И.Сатпаева, 2022. С.238-241.

10. Бектас А.Д., Әбен А.С. Сызықтық объектілерді геодезиялық камтамасыз ету // Труды Международной научно-практической конференция посвященной к 115-летию член-корр. АН КазССР А.Ж.Машанова и 100-летию Академика АН КазССР Ж.С.Ержанова «Инновационные технологии в геопространственной цифровой инженерии», Алматы, 2022. С.56-61.

11.Аукажиева Ж.М., Калыбеков Т., Әбен А.С., Муратова А.М. Геодезия (оқулық). Алматы: New book, 2021