

ISSN 1999-4125 (Print)

ISSN 2949-0642 (Online)

Научная статья

УДК 004.422.83

DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-15-22

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИНТЕРПОЛЯЦИИ ДАННЫХ В ГЕОРАДАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

Колбаса Олег Анатольевич, Степанов Юрий Александрович,
Бурмин Леонид Николаевич

Кемеровский государственный университет

*для корреспонденции: 773o@mail.ru



Информация о статье

Поступила:

21 марта 2024 г.

Одобрена после
рецензирования:

29 мая 2024 г.

Принята к публикации:

29 мая 2024 г.

Опубликована:

28 июня 2024 г.

Ключевые слова:

Георадар, интерполяция
данных, кубический метод,
сравнительный анализ,
аномалии, методы
интерполяции, георадарная
обработка

Аннотация.

В связи с растущей потребностью в повышении точности георадарных исследований для обнаружения аномалий и мониторинга подземных горных выработок актуальность применения современных методов интерполяции данных становится особенно важной. Это исследование посвящено анализу и сравнению различных методов интерполяции, в частности выявлению преимуществ кубического метода интерполяции для оптимизации обработки георадарных измерений. В ходе работы были рассмотрены и применены различные методы интерполяции, включая линейную и полиномиальную интерполяции, а также сплайны, с целью оценки их точности и применимости к данным георадарных измерений. Особое внимание уделено кубическому методу интерполяции, который был применен к реальным георадарным данным для оценки его эффективности в восстановлении полной картины на основе неполных или разреженных данных. Результаты исследования продемонстрировали, что кубический метод интерполяции обеспечивает значительное повышение точности георадарных исследований, позволяя более эффективно выявлять аномалии и предотвращать потенциальные опасности. Было установлено, что кубический метод способен точнее восстанавливать пропущенные участки данных, что делает его предпочтительным выбором для специалистов, работающих с георадарными измерениями. Исследование подтвердило высокую применимость и эффективность кубического метода интерполяции в георадарной обработке данных, предоставив ценные рекомендации для выбора наиболее подходящего метода интерполяции, способствующего повышению точности и безопасности георадарных исследований.

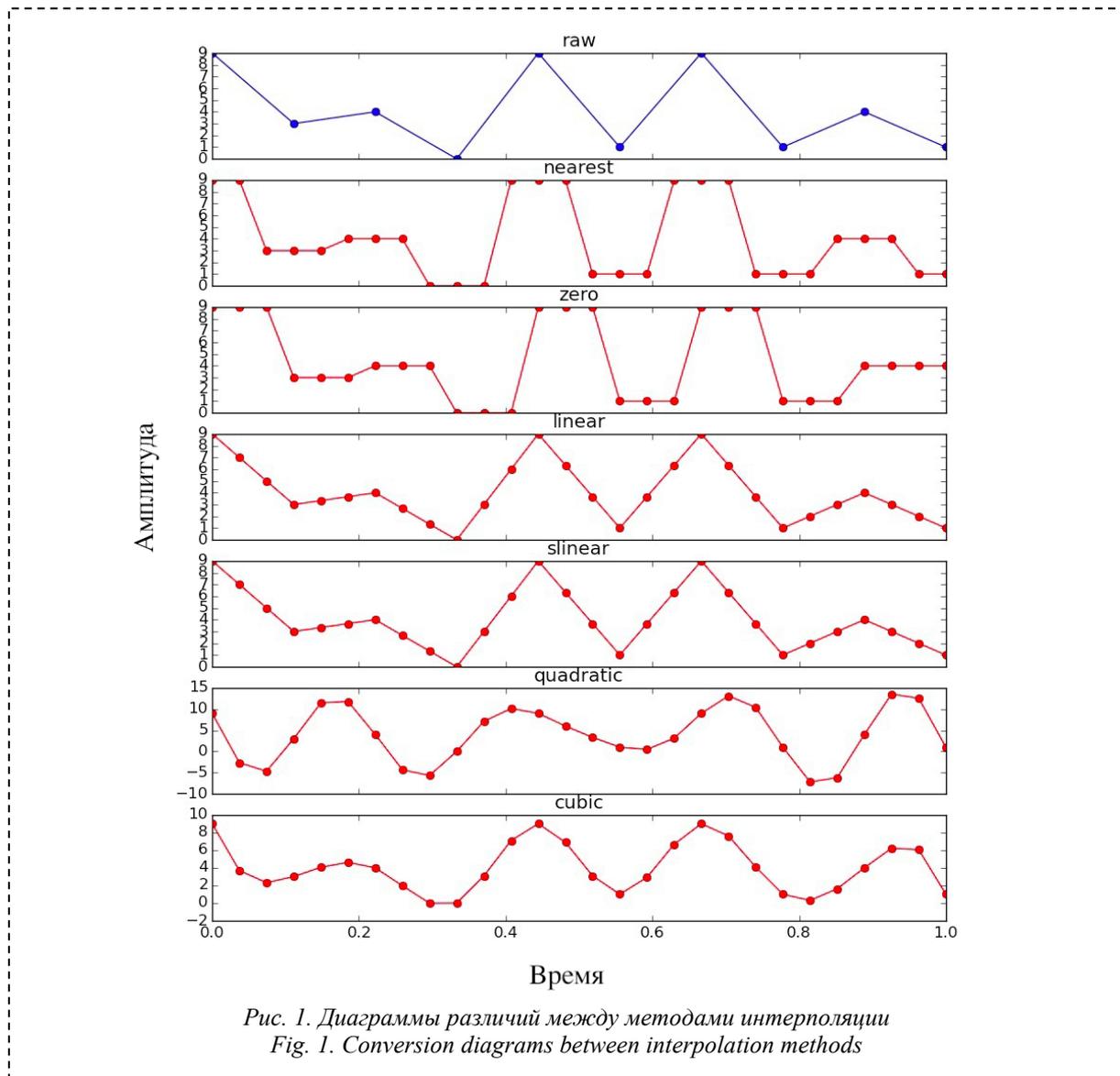
Для цитирования: Колбаса О.А., Степанов Ю.А., Бурмин Л.Н. Сравнительный анализ методов интерполяции данных в георадарной обработке // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 3 (163). С. 15-22. DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-15-22, EDN: CWFFIF

Введение

Георадарные исследования представляют собой неотъемлемую часть современных методик, обеспечивая детальный мониторинг и анализ подземных структур и горных выработок. Немаловажной задачей при работе с данными является их интерполяция, что необходимо для восстановления полной картины на основе неполных или разреженных данных. Настоящее

исследование сосредотачивается на применении кубического метода интерполяции к данным, собранным георадаром ОКО-2, в контексте его практического использования для улучшения процесса анализа и принятия решений.

В рамках геомеханики особое внимание уделяется применению аналитических и численных методов, представленных в виде сеточных моделей, для предварительных оценок



и, что особенно важно, для моделирования мониторинга состояний горных пород и выработок. Основное отличие нашего исследования заключается в фокусировке на моделировании процессов мониторинга с использованием данных георадара, что позволяет не только анализировать текущее состояние горных пород, но и предсказывать потенциальные риски. Этот подход позволяет специалистам оперативно реагировать на изменения в структуре горных пород, минимизируя риски и обеспечивая безопасность проведения подземных работ.

Методы

На сегодняшний день существует целый перечень различных методов интерполяции данных для дальнейшего их использования при моделировании состояния углепородного массива в действующем очистном забое. К некоторым из них можно отнести:

- Raw (Исходные данные): Этот метод интерполяции просто копирует исходные данные без изменений на пропущенные участки.
- Nearest (Ближайший сосед): Метод использует значение ближайшего соседа для интерполяции данных.
- Zero (Нулевой): В данном методе все пропущенные значения заполняются нулевыми значениями.
- Linear (Линейный): Линейная интерполяция использует линейную функцию для заполнения пропущенных данных, основываясь на ближайших известных точках.
- Slinear (Слайн линейный): Сплайн-линейная интерполяция аппроксимирует пропущенные значения с использованием линейных сплайнов, гладко соединяющих известные точки.
- Quadratic (Квадратичный): Этот метод использует квадратичную функцию для интерполяции данных на основе известных точек.

- Cubic (Кубический): Кубическая интерполяция представляет собой метод, который использует кубические сплайны для заполнения пропусков между известными данными.

Для проведения сравнительного анализа методов интерполяции данных мы использовали подход, состоящий из нескольких этапов:

- Подготовка данных: Мы использовали реальные георадарные данные с пропущенными участками для нашего исследования.

- Применение методов интерполяции: каждый из перечисленных методов интерполяции был применен к пропущенным участкам данных.

- Оценка точности: была изменена точность каждого метода, сравнивая интерполированные значения с исходными данными на известных участках.

- Применимость и вычислительная

сложность: рассмотрена применимость каждого метода в контексте георадарной обработки данных и его вычислительная сложность.

Для сравнения методов интерполяции были выбраны следующие критерии:

- Точность интерполяции: была измерена средняя квадратичная ошибка (RMSE) для каждого метода, чтобы определить, насколько близко интерполированные значения к исходным данным.

- Применимость: для этого оценивали, как каждый метод справляется с различными типами георадарных данных и уровнем разреженности.

- Вычислительная сложность: проведен анализ вычислительных ресурсов, необходимых для применения каждого метода, чтобы определить его эффективность в практическом применении.

Таким образом, по результатам анализа были получены следующие диаграммы зависимостей

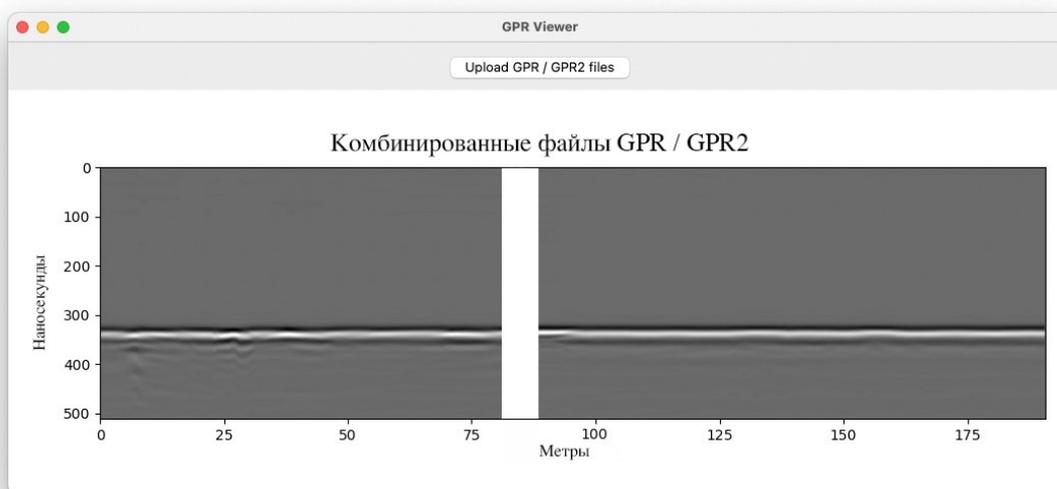


Рис. 2. Интерполируемая область
Fig. 2. Interpolated area

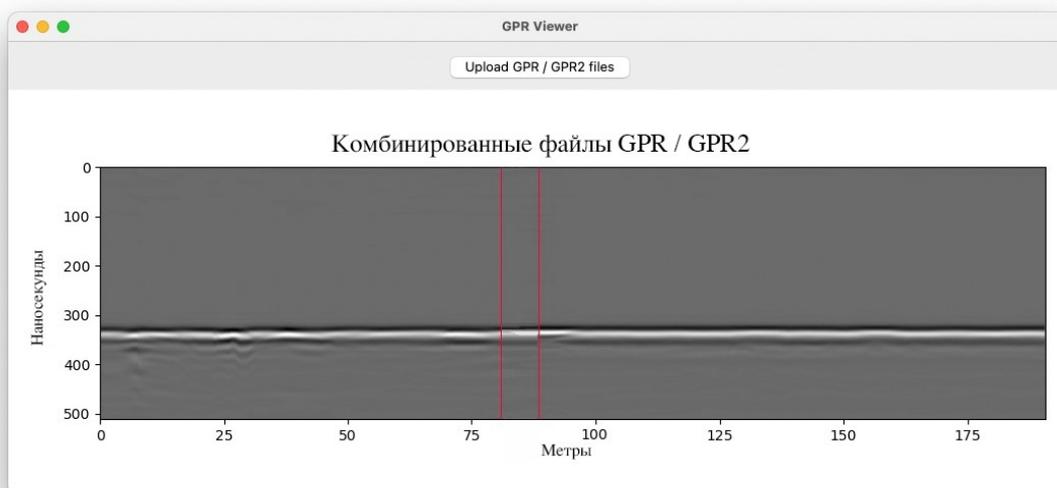


Рис. 3. Результат интерполяции с использованием собственной разработки
Fig. 3. Result of interpolation using our own development

между методами интерполяции (рис. 1).

Как видно из Рис. 1, кубический метод интерполяции (Cubic) показал наилучшие результаты по точности интерполяции, имея наименьшее значение RMSE среди рассмотренных методов. Это позволяет утверждать, что именно кубический метод интерполяции данных способен адекватно и с наиболее высокой точностью восстанавливать пропущенные участки каких-то показателей.

Анализ влияния кубической интерполяции на качество данных, полученных с помощью георадара, выявил значительное повышение точности исследований. Это особенно критично для определения аномалий и прогнозирования потенциальных опасностей. Ключевым показателем, подтверждающим эффективность кубической интерполяции, стала ее способность увеличивать плавность переходов между данными, обеспечивая высокую степень точности. Средняя квадратичная ошибка (RMSE) и коэффициент детерминации (R^2) для кубической интерполяции показали лучшие результаты по сравнению с другими методами, с хорошей точностью предсказания до 82%. Эти показатели подчеркивают значимость выбора кубической интерполяции для георадарных исследований, направленных на повышение безопасности подземных работ.

Следует отметить, что кубический метод обладает высокой применимостью и показывает хорошую производительность даже при значительной разреженности данных. Анализ сравнения также выявил, что вычислительная сложность кубического метода остается приемлемой для практического применения.

Такой всесторонний анализ привел к установлению обоснованных аргументов в пользу выбора кубического метода интерполяции как оптимального варианта для обработки георадарных данных. Кубический метод интерполяции обладает свойством аппроксимации данных с высокой точностью благодаря использованию более плотной сетки интерполяционных точек.

Перечисленные ранее факторы играют решающую роль при принятии решения о предпочтительности кубического метода в контексте георадарной обработки данных.

Результаты исследования

Кубический метод интерполяции данных, как было продемонстрировано в нашем исследовании, обладает значимым практическим применением в области георадарных исследований. Одним из выдающихся примеров является процесс склейки двух файлов GPR2, между которыми имеется расстояние. Этот процесс склейки может быть представлен следующим образом. На Рис. 2 представлена интерполируемая область.

На Рис. 3 представлен результат интерполяции.

Зона интерполяции (находится между красными линиями на рисунке красным цветом) представляет собой участок данных, который отсутствовал в одном из файлов, но может быть восстановлен с использованием кубического метода интерполяции. Применение данного метода обеспечивает точное и непрерывное восстановление данных в зоне интерполяции, что делает процесс склейки более надежным и информативным.

Обсуждение

Был проанализирован вклад кубического метода интерполяции в улучшение качества георадарных данных. Эта методика значительно повышает точность исследований, особенно важных для идентификации аномалий и прогнозирования потенциальных опасностей под землей. Применение кубической интерполяции позволяет обнаруживать скрытые угрозы в породе и эффективно предотвращать аварийные ситуации, спасая жизни. Эффективность кубической интерполяции подтверждается сравнительным анализом, основанным на средней квадратичной ошибке (RMSE) и коэффициенте детерминации (R^2), демонстрируя превосходство метода с точностью анализа, достигающей 82%. Такой высокий показатель точности, наилучший среди рассмотренных методов интерполяции, указывает на его значительный вклад в улучшение надежности и информативности георадарных исследований, повышая их эффективность и безопасность выполнения подземных работ.

Выводы

В данном исследовании был проведен сравнительный анализ различных методов интерполяции данных в контексте георадарной обработки. Основной целью исследования было определение наилучшего метода интерполяции для улучшения точности и применимости георадарных данных. В результате анализа мы пришли к следующим важным выводам:

1. Кубический метод интерполяции оказался наиболее точным и эффективным среди рассмотренных методов. Его способность аппроксимировать данные с высокой степенью гладкости и точности делает его предпочтительным выбором для георадарной обработки.

2. Важность точности в георадарных исследованиях не может быть недооценена, поскольку они не только обнаруживают аномалии в породе, но и предсказывают потенциальные обрушения и опасные ситуации под землей. Данные, полученные с использованием кубической интерполяции, способствуют предупреждению аварийных ситуаций и спасению человеческих жизней.

3. В исследовании было продемонстрировано практическое применение кубического метода интерполяции при склейке файлов GPR2, между которыми имеется расстояние. Этот метод улучшает качество данных и делает георадарные исследования более информативными.

4. Результаты исследования предоставляют ценную информацию и рекомендации для специалистов в области георадарных исследований, помогая им сделать обоснованный выбор метода интерполяции в своей работе.

В целом данное исследование подтверждает, что кубический метод интерполяции данных является оптимальным выбором для обработки георадарных данных, обеспечивая высокую точность и применимость в практических задачах. Также в итоге анализа подчеркивается высокая эффективность кубического метода интерполяции, предлагая его как оптимальный инструмент для анализа данных, полученных с помощью георадиолокационного оборудования. Автоматизация процесса интерполяции поможет в создании более полной картины горных выработок. Это позволит инженерам-геофизикам анализировать потенциально рискованные участки и принимать обоснованные решения относительно необходимости дополнительных исследований или укрепления конструкций для обеспечения безопасности. Также выбор кубического метода интерполяции и построение более четкой картины в итоге способствует более эффективному предупреждению и предотвращению аварийных ситуаций, повышая общую надежность и безопасность подземных работ.

Список литературы

1. Yelf R. J., Annan A. P. Design of a GPR Survey: Basic Principles // *Geophysics*. 1995. №60(6) Pp. 1770–1779.
2. Cassiano J. C., Filho F. L., Dall'Agnol R. Comparative study of interpolation methods in geophysical data analysis // In: *Proceedings of the 2018 International Symposium on Visual Computing* Springer Publishing, 2018. Pp. 204–215.
3. Russow, P. J. Silhouettes: A graphical aid in interpreting and validating cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1987. №20. Pp. 53–65.
4. Hossain M. A., Guido R. (2010). Review of online failure prediction methods // *Industrial Computers*. 2010. №61(5). 399–414.
5. Kuhment L. *Mathematics of computed tomography*. Publishing house SIAM. 2008.
6. Brown W. M., Wilson S. D., Austin J. S. (2002). Interpretation of GPR data using back diffusion and migration methods: Part 1. Theory and verification // *Geophysics*. 2002. №67(6). Pp. 1942–1951.
7. Kim K. Y., Kim S. W., Kang S. W. (2002). Inversion of ground penetrating radar data for road surface assessment // *Geophysical Research*. 2002. №50(5). Pp. 513–524.
8. Petrov V. S., Alania V. L., Dzeladze V. V., Varenjuk, V. V. Evaluation of GPR data using advanced inversion techniques // In: *Environmental Geosciences and Engineering*. Springer Publishing. 2017. Pp. 153–165.
9. Андрианов С. В. Опыт применения георадиолокации при поиске местоположения ликвидированных скважин различного назначения // *Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации* : Материалы Пятнадцатой Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций, Москва, 26–29 ноября 2019 года. Москва : Геомаркетинг, 2019. С. 342–345.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022610465 Российская Федерация. GeoScan32: № 2021681724: заявл. 23.12.2021: опублик. 12.01.2022 / Шибанов А. Р.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Логические Системы».
11. Степанов Ю. А. Геоинформационные системы и промышленная безопасность угольных предприятий // *Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. 2015. № 4. С. 50–54.
12. The SEG-Y-Y format. URL: <https://segymat.readthedocs.io/en/latest/format.html>.
13. Шахатова А. Т., Ожигин С. Г., Оленюк С. П. Обработка данных на основе интерпретации результатов по электромагнитному полю угольного месторождения // *Труды университета*. 2021. № 4(85). С. 344–350.
14. Романов С. С. Об инфологическом моделировании баз данных с помощью нормализации Eг-диаграмм // *Таврический научный обозреватель*. 2017. № 1(18). С. 127–137.
15. Сковпин Н. С., Паринов М. В. Предварительная обработка и масштабирование данных для последующего применения машинного обучения // *Инновации в науке и практике: сборник статей по материалам XIII международной научно-практической конференции*, Барнаул, 26 декабря 2018 года. Том Часть 1(5). Барнаул : Общество с ограниченной ответственностью Дендра, 2018. С. 197–203.
16. Артемов И. Ю. Алгоритмы фильтрации данных, построенные с учетом специфики обрабатываемых данных // *Математические методы в технике и технологиях – ММТТ*. 2020. Т. 7. С. 72–75.
17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022616490 Российская Федерация. Предобработка цифровых изображений на основе методов фильтрации: № 2022612822: заявл. 28.02.2022: опублик. 19.04.2022 / Антипова С. А., Сухоруков Д. О., Зайнуллин Ш. Г.; заявитель Федеральное государственное

казенное военное учреждение высшего образования «Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А. В. Хрулева» Министерства обороны Российской Федерации. EDN MWNFNG.

18. Михайличенко А. А. Аналитический обзор методов оценки качества алгоритмов

классификации в задачах машинного обучения // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2022. № 4(311). С. 52–59. DOI: 10.53598/2410-3225-2022-4-311-52-59. EDN FVSMBM.

© 2024 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Колбаса Олег Анатольевич, студент, Кемеровский государственный университет, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6), e-mail: 773o@mail.ru

Степанов Юрий Александрович, д.т.н., профессор, Кемеровский государственный университет, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6), e-mail: dambo290@yandex.ru

Бурмин Леонид Николаевич, к.т.н., доцент, Кемеровский государственный университет, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Красная, 6), e-mail: lnburmin@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Колбаса Олег Анатольевич - Анализ данных (вклад в анализ полученных данных с использованием различных методов интерполяции для оценки их точности и пригодности), разработка алгоритма для модуля интерполяции.

Степанов Юрий Александрович - Концептуализация исследования (разработка общей концепции исследования, включая формулировку гипотез и определение методологии), научный менеджмент и постановка исследовательской задачи (определение основных направлений исследования, включая формулировку гипотез и определение методологии).

Бурмин Леонид Николаевич - Обзор существующей литературы (анализ и обзор существующих исследований и публикаций по теме георадарной обработки данных и методов интерполяции).

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

COMPARATIVE ANALYSIS OF DATA INTERPOLATION METHODS IN GPR PROCESSING

Oleg A. Kolbasa, Yuri A. Stepanov,
Leonid N. Burmin

Kemerovo State University

*for correspondence: 773o@mail.ru

**Article info**

Received:

21 March 2024

Accepted for publication:

29 May 2024

Accepted:

29 May 2024

Published:

28 June 2024

Keywords: Ground penetrating radar, data interpolation, cubic method, comparative analysis, anomalies, interpolation methods, georadar processing

Abstract.

Due to the growing need to improve the accuracy of GPR studies for detecting anomalies and monitoring underground mine workings, the relevance of using modern data interpolation methods becomes especially important. This study analyzes and compares different interpolation methods, in particular identifying the advantages of the cubic interpolation method, to optimize the processing of GPR measurements. During the work, various interpolation methods were considered and applied, including linear and polynomial interpolation, as well as splines, in order to evaluate their accuracy and applicability to GPR data. Particular attention is paid to the cubic interpolation method, which was applied to real GPR data to evaluate its effectiveness in reconstructing a complete picture from incomplete or sparse data. The results of the study demonstrated that the cubic interpolation method provides significant improvements in the accuracy of GPR studies, allowing for more effective detection of anomalies and prevention of potential hazards. The cubic method was found to be able to more accurately recover missing data areas, making it the preferred choice for GPR specialists. The study confirmed the high applicability and efficiency of the cubic interpolation method in GPR data processing, providing valuable recommendations for selecting the most suitable interpolation method to improve the accuracy and safety of GPR studies.

For citation: Kolbasa O.A., Stepanov Yu.A., Burmin L.N. Comparative analysis of data interpolation methods in GPR processing. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*=Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024; 3(163):15-22. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1999-4125-2024-3-15-22, EDN: CWFIF

REFERENCES

1. Yelf R.J., Annan A.P. Design of a GPR Survey: Basic Principles. *Geophysics*. 1995; 60(6):1770–1779.
2. Cassiano J.C., Filho F.L., Dall'Agnol R. Comparative study of interpolation methods in geophysical data analysis. In: *Proceedings of the 2018 International Symposium on Visual Computing Springer Publishing*. 2018. Pp. 204–215.
3. Russow P.J. Silhouettes: A graphical aid in interpreting and validating cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 1987; 20:53–65.
4. Hossain M.A., Guido R. Review of online failure prediction methods // *Industrial Computers*. 2010; 61(5):399–414.
5. Kuhment L. Mathematics of computed tomography. *Publishing house SLAM*. 2008.
6. Brown W.M., Wilson S.D., Austin J.S. Interpretation of GPR data using back diffusion and migration methods: Part 1. Theory and verification. *Geophysics*. 2002; 67(6):1942–1951.
7. Kim K.Y., Kim S.W., Kang, S.W. Inversion of ground penetrating radar data for road surface assessment. *Geophysical Research*. 2002; 50(5):513–524.
8. Petrov V.S., Alania V.L., Dzeladze V.V., Varenjuk V.V. Evaluation of GPR data using advanced inversion techniques. In: *Environmental Geosciences and Engineering*. 2017. Pp. 153–165. Springer Publishing.
9. Andrianov S.V. Experience in using georadar when searching for the location of abandoned wells for various purposes. *Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation: Materials of the Fifteenth All-Russian Scientific and Practical Conference of Survey Organizations*. Moscow, 26– November 29, 2019. Moscow: Geomarketing; 2019. Pp. 342–345.

10. Certificate of state registration of a computer program No. 2022610465 Russian Federation. GeoScan32: No. 2021681724: application. 12/23/2021: publ. 01/12/2022 / Shibyanov A.R.; applicant Limited Liability Company "Logical Systems".

11. Stepanov Yu.A. Geoinformation systems and industrial safety of coal enterprises. *Bulletin of the Scientific Center for Work Safety in the Coal Industry*. 2015; 4:50–54.

12. The SEGY-Y format. URL: <https://segymat.readthedocs.io/en/latest/format.html>.

13. Shakhmatova A.T., Ozhigin S.G., Olenyuk S.P. Data processing based on interpretation of results on the electromagnetic field of a coal deposit. *Proceedings of the University*. 2021; 4(85):344–350.

14. Romanov S.S. On infological modeling of databases using Er-diagram normalization. *Tauride Scientific Observer*. 2017; 1(18):127–137.

15. Skovpin N.S., Parinov M.V. Preliminary processing and scaling of data for subsequent application of machine learning. *Innovations in science and practice: collection of articles based on the materials of the XIII International Scientific and Practical*

Conference. Barnaul, December 26. 2018; 1(5):197-203. Barnaul: Limited Liability Company Dendra; 2018.

16. Artemov I.Yu. Data filtering algorithms built taking into account the specifics of the processed data. *Mathematical methods in engineering and technology – MMTT*. 2020; 7:72–75.

17. Certificate of state registration of a computer program No. 2022616490 Russian Federation. Preprocessing of digital images based on filtering methods: No. 2022612822: application. 02/28/2022: publ. 04/19/2022 / Antipova S.A., Sukhorukov D.O., Zainullin Sh.G.; applicant Federal State Treasury Military Institution of Higher Education “Military Academy of Logistics and Technical Support named after Army General A.V. Khrulev” of the Ministry of Defense of the Russian Federation. EDN MWNFNG.

18. Mikhailichenko A.A. Analytical review of methods for assessing the quality of classification algorithms in machine learning problems. *Bulletin of the Adygea State University. Series 4: Natural, mathematical and technical sciences*. 2022; 4(311):52–59. DOI: 10.53598/2410-3225-2022-4-311-52-59. EDN FVSMBM.

© 2024 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

Oleg A. Kolbasa, student, Kemerovo State University, (6 street Krasnaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: 773o@mail.ru

Yuri A. Stepanov, Dr. Sc. in Engineering, Professor, Kemerovo State University, (6 street Krasnaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: dambo290@yandex.ru

Leonid N., Burmin C. Sc. in Engineering, Associate Professor, Kemerovo State University, (6 street Krasnaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation), e-mail: lnburmin@mail.ru

Contribution of the authors:

Oleg A. Kolbasa - Data Analysis (contribute to the analysis of acquired data using various interpolation techniques to assess its accuracy and suitability), Development of an algorithm for the interpolation module.

Yuri A. Stepanov - Conceptualization of the study (development of the overall concept of the study, including the formulation of hypotheses and definition of methodology), Scientific management and formulation of the research problem (determination of the main directions of research, including the formulation of hypotheses and the definition of methodology).

Leonid N. Burmin - Review of existing literature (analysis and review of existing studies and publications on the topic of georadar data processing and interpolation methods).

All authors have read and approved the final manuscript.

